

## DISSERTATION

# Genauigkeit der digitalen Photogrammetrie

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften unter Leitung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Kraus  
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (E122),  
Technische Universität Wien

eingereicht an der Technische Universität Wien  
Fakultät für Mathematik und Geoinformation

von

Dipl.-Ing. Veselina Dencheva  
Matr.Nr 0127290  
Mostgasse 2/1/16  
A-1040 Wien

Diese Arbeit wurde vom Neumaier-Stipendium zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung finanziert.

Danksagung:

Ich möchte mich bei Prof. Dr. K. Kraus für die wissenschaftliche Betreuung dieser Dissertation und die ständige Unterstützung bedanken. Ebenso möchte ich Herrn Dr. H. Kager, Prof. Dr. J. Jansa, Dr. C. Ressler für die sehr wertvollen kritischen Anregungen danken. Ich bedanke mich auch für das Neumaier-Stipendium in den vergangenen beiden Jahren, das die finanzielle Basis für den Forschungsaufenthalt am I.P.F. bildete.

## Abstract

Few literature has been published on the quality of the photogrammetric evaluation of scanned and digital aerial imagery. Therefore, extensive series of manual and semi-automatic measurements are analysed in this thesis. Among others, the following questions are answered:

- a) What is the accuracy of manual point and line measurements, depending on the point or line type, the type of the film (colour, black and white), the pixel size, the scale and the flying altitude?
- b) What is the accuracy of semi-automatic, three-dimensional line evaluations through snakes, depending on the image quality and some influencing factors mentioned under point a)?
- c) Which pixel size is best concerning measurement reliability and accuracy?
- d) In which way do image scale and flying altitude affect the accuracy of reconstructed objects? In addition to relative accuracies that are deduced from replicated measurements, some absolute accuracies are presented that stem from comparisons with terrestrial observations.

In addition to relative accuracies that are deduced from replicated measurements, some absolute accuracies are presented that stem from comparisons with terrestrial observations.

The answers to the questions a) to d) are of great importance for the photogrammetric practice. The proposed concepts for the analysis of series of measurements are interesting from a scientific point of view.

Some of the outstanding results are:

- a) The linewise evaluation in digital photogrammetry is generated pointwise.
- b) The accuracy of digital, linewise evaluations is on a par with the accuracy of analytical, pointwise evaluations.
- c) The image measurement accuracy amounts to  $\frac{1}{2.5}$  pixels.
- d) Best image measurement accuracy is achieved with  $20 \mu m$  pixels.
- e) The semi-automatic method yields results that are better by about 30 %.

## Kurzfassung

Über die Qualität der Auswertergebnisse, die aus digitalisierten bzw. digitalen Luftbildern entstehen, gibt es wenig wissenschaftliche Literatur. In diesem Beitrag werden deshalb umfangreiche Messreihen, die manuell und halbautomatisch entstanden sind, analysiert und unter anderem folgende Fragen erörtert:

- a) Wie genau ist die manuelle punkt- und linienweise Auswertung in Abhängigkeit von der Punktart und von der Linienart, vom Filmtyp (Farbe, Schwarzweiß), von der Pixelgröße, vom Bildmaßstab und von der Flughöhe?
- b) Wie genau ist die halbautomatische dreidimensionale Linienauswertung mit Snakes in Abhängigkeit von der Bildqualität und einiger unter a) genannten Einflussfaktoren?
- c) Welche Pixelgröße ist für die Messsicherheit und für die Messgenauigkeit am besten?
- d) Wie wird die Genauigkeit an rekonstruierten Objekten in Abhängigkeit vom Bildmaßstab und von der Flughöhe beeinflusst?

Zusätzlich zu relativen Genauigkeiten, die aus Wiederholungsmessungen abgeleitet werden, werden auch einige absolute Genauigkeiten, die aus dem Vergleich mit terrestrischen Messungen entstehen, angegeben.

Die Beantwortung der Fragen a) bis d) ist für die Praxis von großer Bedeutung. Die vorgeschlagenen Konzepte für die Analyse der Messreihen sind aus wissenschaftlicher Sicht von Interesse.

Einige herausragende Ergebnisse sind:

- a) Die Linienauswertung in der digitalen Photogrammetrie entsteht punktweise.
- b) Die Genauigkeit der digitalen Linienauswertung ist der Genauigkeit der analytischen Punktmessung ebenbürtig.
- c) Die Bildmessgenauigkeit beträgt  $\frac{1}{2.5}$  Pixel.
- d) Die beste Bildmessgenauigkeit wird mit  $20 \mu m$  Pixel erreicht.
- e) Die halbautomatische Methode liefert um 30 % bessere Resultate.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitender Teil</b>	<b>1</b>
1.1	Ziel und Aufgaben . . . . .	1
1.2	Motivation der Zielsetzung und Begründung der ausgewählten Methode . . . .	2
1.2.1	Genauigkeiten der automatischen Punktbestimmung . . . . .	2
1.3	Aufbau der Arbeit . . . . .	3
1.4	Ausgewähltes aus der Statistik . . . . .	4
1.4.1	Zufallsgrößen . . . . .	4
1.4.2	Wahrer Wert . . . . .	4
1.4.3	Erwartungswert . . . . .	4
1.4.4	Standardabweichung . . . . .	4
1.4.5	Die Normalverteilung . . . . .	5
1.4.6	Grobe Fehler . . . . .	5
1.4.7	Systematische und zufällige Fehler . . . . .	5
1.4.8	Genauigkeit . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Konzepte zur Ableitung von Genauigkeiten</b>	<b>8</b>
2.1	Struktur des Konzeptes und einige Anmerkungen dazu . . . . .	8
2.2	Relative und absolute Genauigkeit der Punktauswertungen . . . . .	10
2.3	Abstand eines Punktes von einer Geraden . . . . .	12
2.3.1	Genauigkeit der Abstandsberechnungen . . . . .	15
2.4	Relative Genauigkeit der Linienauswertungen . . . . .	16
2.4.1	Relativer Messfehler einer Linie . . . . .	16
2.4.2	Repräsentativer Wert für die Liniengenauigkeit beim Vorliegen von Wiederholungsmessungen mehrerer Linien, die zu einer Linienart gehören .	19
2.4.3	Elimination der groben Fehler . . . . .	19

2.5	Absolute Genauigkeit der Linienauswertungen . . . . .	20
2.6	Übergangsformeln zwischen objektbezogenen und bildbezogenen Genauigkeits- maßen . . . . .	22
2.6.1	Einige ergänzende Begriffe zur Genauigkeit . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Halbautomatische Linienauswertung durch Snakes</b>	<b>24</b>
3.1	Kurze Einführung in die Theorie der Snakes . . . . .	24
3.2	Interne Terme . . . . .	25
3.3	Photometrische Terme . . . . .	26
3.3.1	Der Sigma Filter . . . . .	27
3.3.2	Bestimmung der Schranke aus dem Roberts Gradient . . . . .	28
3.3.3	Anpassung an die Snakes-Problemstellung . . . . .	28
3.4	Externe Terme . . . . .	34
3.5	Stereosnakes . . . . .	34
3.5.1	Korrespondenzen aus den beiden 2D-Snakes . . . . .	34
3.5.2	Schnitt einer Geraden mit einer Ebene . . . . .	36
3.6	Genauigkeit der halbautomatischen Linienmessung . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Vorbereitung des Zahlenmaterials</b>	<b>40</b>
4.1	Bildmaterial . . . . .	41
4.2	Die manuellen Auswertungen . . . . .	42
4.3	Die halbautomatische Linien-Extraktion . . . . .	43
4.4	Terrestrische Messungen als Referenzinformationen . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Empirische Genauigkeiten</b>	<b>45</b>
5.1	Relative Punktgenauigkeit im Objektkoordinatensystem . . . . .	45
5.2	Relative Liniengenauigkeit im Objektkoordinatensystem . . . . .	47
5.3	Absolute Liniengenauigkeit im Objektkoordinatensystem . . . . .	49
5.4	Genauigkeit der halbautomatisch gewonnenen Linien im Objektkoordinatensy- stem . . . . .	50
5.4.1	Das Rauschen im Bild und die Reproduzierbarkeit der Snakes . . . . .	50
5.4.2	Relative Genauigkeiten mit den manuellen Splines als Referenz . . . . .	51
5.4.3	Absolute Genauigkeiten mit terrestrischen Vergleichsmessungen als Re- ferenz . . . . .	53

<b>6 Genauigkeitsanalyse</b>	<b>55</b>
6.1 Relative Genauigkeit der manuellen Punktauswertung . . . . .	55
6.2 Relative Genauigkeit der manuellen Linienauswertung . . . . .	61
6.3 Relative Genauigkeit der manuellen digitalen Auswertung. Optimale Pixelgröße	66
6.3.1 Die Pixelgröße (Optimale Pixelgröße) . . . . .	66
6.3.2 Die Flugdynamik . . . . .	68
6.3.3 Der Maßstab und die Flughöhe über Grund . . . . .	68
6.4 Absolute Genauigkeit der manuellen digitalen Auswertung . . . . .	70
6.5 Genauigkeit der halbautomatischen Linienextraktion . . . . .	72
6.5.1 Reproduzierbarkeit . . . . .	72
6.5.2 Relative Genauigkeit mit manuellen Splines als Referenz. Optimale Pixelgröße . . . . .	73
6.5.3 Absolute Genauigkeit der Snake-Linien mit terrestrischen Messungen als Referenz. Vergleich mit anderen relativen und absoluten Genauigkeiten . . . . .	78
<b>7 Abschließender Teil</b>	<b>81</b>
7.1 Planung von Projektparametern . . . . .	81
7.2 Verallgemeinerung der Aussagen . . . . .	82
7.3 Zusammenfassung . . . . .	84
7.4 Ausblick . . . . .	85
<b>A Zusammenhang zwischen Koordinaten und Streckenfehler im ein-, zwei und dreidimensionalen Raum</b>	<b>86</b>
<b>B Empirische Genauigkeiten aus den Punktauswertungen</b>	<b>88</b>
B.1 Relative Genauigkeit natürlicher Punkte . . . . .	88
<b>C Empirische Genauigkeiten aus den Linienauswertungen</b>	<b>97</b>
C.1 Relative Genauigkeit natürlicher Linien . . . . .	97
<b>D Empirische Genauigkeiten aus den Snake-Auswertungen</b>	<b>106</b>
D.1 Reproduzierbarkeit der Snake-Linien . . . . .	106
D.2 Relative Genauigkeiten der Snake-Linien mit den manuellen Splines als Referenz	108
D.2.1 Relativer Gesamtkoordinatenfehler der Snake-Linien . . . . .	108
D.2.2 Systematische und zufällige Anteile des relativen Gesamtkoordinatenfehlers der Snake-Linien . . . . .	110
<b>E Abbildungen zu einigen Linien</b>	<b>113</b>

# Verzeichnis der Bezeichnungen

	R	Distanz zwischen Punkt und Segment im Raum berechnet aus dem Datensatz für die Ermittlung der <i>relativen</i> Genauigkeit
$d_{rel}$	XY	Distanz zwischen Punkt und Segment in XY berechnet aus dem Datensatz für die Ermittlung der <i>relativen</i> Genauigkeit
	Z	Distanz zwischen Punkt und Segment im Z berechnet aus dem Datensatz für die Ermittlung der <i>relativen</i> Genauigkeit
$\bar{d}_{rel}$	R	behandelte Distanz zwischen Punkt und Segment im Raum
	XY	behandelte Distanz zwischen Punkt und Segment in XY
	Z	behandelte Distanz zwischen Punkt und Segment im Z
$d_{abs}$	R	Gesamtdistanz zwischen Punkt und Segment im Raum berechnet aus dem Datensatz für die Ermittlung der <i>absoluten</i> Genauigkeit
	XY	Gesamtdistanz zwischen Punkt und Segment in XY berechnet aus dem Datensatz für die Ermittlung der <i>absoluten</i> Genauigkeit
	Z	Gesamtdistanz zwischen Punkt und Segment im Z berechnet aus dem Datensatz für die Ermittlung der <i>absoluten</i> Genauigkeit
$d_{abs}^{zuf}$	XY	zufälliger Anteil der "absoluten" Gesamtdistanz in XY
	Z	zufälliger Anteil der "absoluten" Gesamtdistanz in Z
$s_{abs}^{Linie, sys}$	XY	systematischer Anteil der "absoluten" Gesamtdistanz in XY für die jeweilige <i>Linie</i>
	Z	systematischer Anteil der "absoluten" Gesamtdistanz in Z für die jeweilige <i>Linie</i>
$s_{abs}^{nL, sys}$	XY	repräs. systematischer Anteil der "absoluten" Gesamtdistanz in XY natürlicher Linien
	Z	repräs. systematischer Anteil der "absoluten" Gesamtdistanz in Z natürlicher Linien
$s_{rel}^{S, sys}$	XY	repräs. systematischer Anteil der "relativen" Gesamtdistanz in XY der Snake-Linien
	Z	repräs. systematischer Anteil der "relativen" Gesamtdistanz in Z der Snake-Linien
$s_{abs}^{S, sys}$	XY	repräs. systematischer Anteil der "absoluten" Gesamtdistanz in XY der Snake-Linien
	Z	repräs. systematischer Anteil der "absoluten" Gesamtdistanz in Z der Snake-Linien
$\sigma_{rel}^{sP}$	XY	Standardabweichung für die <i>relative</i> Objektgenauigkeit <i>in der Lage</i> signalisierter Punkte
	Z	Standardabweichung für die <i>relative</i> Objektgenauigkeit <i>in der Höhe</i> signalisierter Punkte

	<i>Punkt</i>	
$\sigma$	<i>rel,</i> X Y Z	Standardabweichung für die <i>relative</i> Objektgenauigkeit in X für einen <i>Punkt</i> Standardabweichung für die <i>relative</i> Objektgenauigkeit in Y für einen <i>Punkt</i> Standardabweichung für die <i>relative</i> Objektgenauigkeit in Z für einen <i>Punkt</i>
	<i>nP</i>	
$\sigma$	<i>rel,</i> X Y Z	repräs. Wert der <i>relativen</i> Objektgenauigkeit in X natürlicher <i>Punkte</i> repräs. Wert der <i>relativen</i> Objektgenauigkeit in Y natürlicher <i>Punkte</i> repräs. Wert der <i>relativen</i> Objektgenauigkeit in Z natürlicher <i>Punkte</i>
	<i>Linie</i>	
$\sigma$	<i>rel,</i> R XY Z	Standardabweichung für die <i>relative</i> Objektgenauigkeit <i>im Raum</i> für eine <i>Linie</i> Standardabweichung für die <i>relative</i> Objektgenauigkeit <i>in der Lage</i> für eine <i>Linie</i> Standardabweichung für die <i>relative</i> Objektgenauigkeit <i>in der Höhe</i> für eine <i>Linie</i>
	<i>nL</i>	
$\sigma$	<i>rel,</i> R XY Z	repräs. Wert der <i>relativen</i> Objektgenauigkeit <i>im Raum</i> natürlicher <i>Linien</i> repräs. Wert der <i>relativen</i> Objektgenauigkeit <i>in der Lage</i> natürlicher <i>Linien</i> repräs. Wert der <i>relativen</i> Objektgenauigkeit <i>in der Höhe</i> natürlicher <i>Linien</i>
	<i>Linie</i>	
$\sigma$	<i>abs,</i> R XY Z	Standardabweichung für die gesamte <i>absolute</i> Objektgenauigkeit <i>im Raum</i> für eine <i>Linie</i> Standardabweichung für die gesamte <i>absolute</i> Objektgenauigkeit <i>in der Lage</i> für eine <i>Linie</i> Standardabweichung für die gesamte <i>absolute</i> Objektgenauigkeit <i>in der Höhe</i> für eine <i>Linie</i>
	<i>nL</i>	
$\sigma$	<i>abs,</i> R XY Z	repräs. Wert der gesamten <i>absoluten</i> Objektgenauigkeit <i>im Raum</i> natürlicher <i>Linien</i> repräs. Wert der gesamten <i>absoluten</i> Objektgenauigkeit <i>in der Lage</i> natürlicher <i>Linien</i> repräs. Wert der gesamten <i>absoluten</i> Objektgenauigkeit <i>in der Höhe</i> natürlicher <i>Linien</i>
	<i>Linie, zuf</i>	
$\sigma$	<i>abs,</i> R XY Z	zufälliger Anteil der gesamten <i>absoluten</i> Objektgenauigkeit <i>im Raum</i> für eine <i>Linie</i> zufälliger Anteil der gesamten <i>absoluten</i> Objektgenauigkeit <i>in der Lage</i> für eine <i>Linie</i> zufälliger Anteil der gesamten <i>absoluten</i> Objektgenauigkeit <i>in der Höhe</i> für eine <i>Linie</i>
	<i>nL, zuf</i>	
$\sigma$	<i>abs,</i> R XY Z	repräs. <i>zufälliger</i> Anteil der gesamten <i>absoluten</i> Objektgenauigkeit <i>im Raum</i> natürlicher <i>Linien</i> repräs. <i>zufälliger</i> Anteil der gesamten <i>absoluten</i> Objektgenauigkeit <i>in der Lage</i> natürlicher <i>Linien</i> repräs. <i>zufälliger</i> Anteil der gesamten <i>absoluten</i> Objektgenauigkeit <i>in der Höhe</i> natürlicher <i>Linien</i>
$\sigma$	<i>S</i> <i>repr</i>	Reproduzierbarkeit der Snake-Linien im Bild
	<i>S</i>	
$\sigma$	<i>rel,</i> R XY Z	repräs. Wert der gesamten <i>relativen</i> Objektgenauigkeit <i>im Raum</i> der Snake-Linien repräs. Wert der gesamten <i>relativen</i> Objektgenauigkeit <i>in der Lage</i> der Snake-Linien repräs. Wert der gesamten <i>relativen</i> Objektgenauigkeit <i>in der Höhe</i> der Snake-Linien
	<i>S, zuf</i>	
$\sigma$	<i>rel,</i> R XY Z	repräs. <i>zufälliger</i> Anteil der gesamten <i>relativen</i> Objektgenauigkeit <i>im Raum</i> der Snake-Linien repräs. <i>zufälliger</i> Anteil der gesamten <i>relativen</i> Objektgenauigkeit <i>in der Lage</i> der Snake-Linien repräs. <i>zufälliger</i> Anteil der gesamten <i>relativen</i> Objektgenauigkeit <i>in der Höhe</i> der Snake-Linien
	<i>S</i>	
$\sigma$	<i>abs,</i> R XY Z	repräs. Wert der gesamten <i>absoluten</i> Objektgenauigkeit <i>im Raum</i> der Snake-Linien repräs. Wert der gesamten <i>absoluten</i> Objektgenauigkeit <i>in der Lage</i> der Snake-Linien repräs. Wert der gesamten <i>absoluten</i> Objektgenauigkeit <i>in der Höhe</i> der Snake-Linien
	<i>S, zuf</i>	
$\sigma$	<i>abs,</i> XY Z	repräs. <i>zufälliger</i> Anteil der gesamten <i>absoluten</i> Objektgenauigkeit <i>in der Lage</i> der Snake-Linien repräs. <i>zufälliger</i> Anteil der gesamten <i>absoluten</i> Objektgenauigkeit <i>in der Höhe</i> der Snake-Linien

$sP$		
$\sigma_{rel, B, Z}$	$XY$	repräs. Wert der <i>relativen Bildmessgenauigkeit in der Lage</i> signalisierter Punkte
	$Z$	repräs. Wert der <i>relativen Bildmessgenauigkeit in der Höhe</i> signalisierter Punkte
$nP$		
$\sigma_{rel, B, Z}$	$X$	repräs. Wert der <i>relativen Bildmessgenauigkeit in X</i> natürlicher Punkte
	$Y$	repräs. Wert der <i>relativen Bildmessgenauigkeit in Y</i> natürlicher Punkte
	$Z$	repräs. Wert der <i>relativen Bildmessgenauigkeit in Z</i> natürlicher Punkte
$nL$		
$\sigma_{rel, B, Z}$	$R$	repräs. Wert der <i>relativen Bildmessgenauigkeit im Raum</i> natürlicher Linien
	$XY$	repräs. Wert der <i>relativen Bildmessgenauigkeit in XY</i> natürlicher Linien
	$Z$	repräs. Wert der <i>relativen Bildmessgenauigkeit in Z</i> natürlicher Linien
$S, zuf$		
$\sigma_{rel, B, Z}$	$R$	repräs. <i>zufälliger Anteil</i> der gesamten <i>relativen Bildmessgenauigkeit im Raum</i> der Snake-Linien
	$XY$	repräs. <i>zufälliger Anteil</i> der gesamten <i>relativen Bildmessgenauigkeit in XY</i> der Snake-Linien
	$Z$	repräs. <i>zufälliger Anteil</i> der gesamten <i>relativen Bildmessgenauigkeit in Z</i> der Snake-Linien
$nL$		
$\sigma_{abs, B, Z}$	$XY$	repräs. Wert der gesamten <i>absoluten Bildmessgenauigkeit in XY</i> natürlicher Linien
	$Z$	repräs. Wert der gesamten <i>absoluten Bildmessgenauigkeit in Z</i> natürlicher Linien
$nL, zuf$		
$\sigma_{abs, B, Z}$	$XY$	repräs. <i>zufälliger Anteil</i> der gesamten <i>absoluten Bildmessgenauigkeit in XY</i> natürlicher Linien
	$Z$	repräs. <i>zufälliger Anteil</i> der gesamten <i>absoluten Bildmessgenauigkeit in Z</i> natürlicher Linien
$S$		
$\sigma_{abs, B, Z}$	$XY$	repräs. Wert der gesamten <i>absoluten Bildmessgenauigkeit in XY</i> der Snake-Linie
	$Z$	repräs. Wert der gesamten <i>absoluten Bildmessgenauigkeit in Z</i> der Snake-Linie
$S, zuf$		
$\sigma_{abs, B, Z}$	$XY$	repräs. <i>zufälliger Anteil</i> der gesamten <i>absoluten Bildmessgenauigkeit in XY</i> der Snake-Linie
	$Z$	repräs. <i>zufälliger Anteil</i> der gesamten <i>absoluten Bildmessgenauigkeit in Z</i> der Snake-Linie

# Kapitel 1

## Einleitender Teil

### 1.1 Ziel und Aufgaben

Der Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die digitale Auswertung. Die Ergebnisse sollen vor allem eine Antwort auf die Frage ermöglichen, in welchem Bereich die Genauigkeit der digitalen Photogrammetrie liegt. Die Genauigkeit soll in Abhängigkeit von unterschiedlichen Faktoren (Flughöhe, Bildmaßstab, Pixelgröße, Filmtyp, etc.) analysiert werden. Dabei ist mit digitaler Photogrammetrie die dreidimensionale Auswertung in der digitalen Photogrammetrie gemeint. In erster Linie wird die Genauigkeit der *manuellen* dreidimensionalen Punkt- und Linienauswertung verfolgt. Es wird aber auch das Potenzial einer *automatisierten* (halbautomatischen) dreidimensionalen Linienauswertung erschlossen.

Mit dieser Arbeit setzen wir uns das Ziel, Konzepte zur Ermittlung von den Genauigkeiten der gegenwärtigen digitalen Photogrammetrie auszuarbeiten.

Diese Zielsetzung erfordert zuerst eine Präzision des Begriffes Genauigkeit.

Danach sollen Konzepte zur Ableitung von Genauigkeiten angepasst erstens an der Problematik der zwei *Messkategorien* - Punkte und Linien - und zweitens an der Problematik der *Messungsart* - manuell oder halbautomatisch - ermittelt werden. Für die Ermittlung von Genauigkeiten bieten sich die statistischen Schätzungen auf der Basis großer Messreihen an. Die statistische Analyse kann sehr unkompliziert und anschaulich die Genauigkeiten für ein konkretes Projekt liefern.

Das spricht die nächste Aufgabe an: Man soll sich im Rahmen dieses Projektes, das auch als Experiment bezeichnet werden kann, umfangreiche Messreihen beschaffen, um eine Basis für die Genauigkeitsschätzungen zu liefern. Wir sollen also Wiederholungsmessungen auf digitaler Weise unternehmen, die die genannten Messkategorien und Messungsarten enthalten. Die Datenmenge soll groß genug sein, um daraus realistisch schließen zu können. Dabei müssen wir uns im Klaren sein, dass die Schlüsse nur auf das konkrete Experiment bezogen werden können.

Eine weitere Aufgabe ist, die Resultate in Abhängigkeit von den Einflussfaktoren - Flughöhe, Bildmaßstab, Pixelgröße, Filmtyp etc. - zu analysieren und Gesetzmäßigkeiten in der Genauigkeit für die digitale Photogrammetrie, falls möglich, festzulegen.

## 1.2 Motivation der Zielsetzung und Begründung der ausgewählten Methode

Grundlegend für die Motivation der Zielsetzung ist die Teilaufgabe, Gesetzmäßigkeiten in der Messgenauigkeit *für die digitale Photogrammetrie* zu finden.

Der Schwerpunkt der Photogrammetrie ist, indirekt (durch Bilder) geometrische Objektinformationen zu gewinnen, indem die bei der Aufnahme geltenden Abbildungsgesetze rekonstruiert werden. Durch den enormen Fortschritt der mathematischen Methoden für die Anwendungen der Photogrammetrie in Zusammenhang mit der vollen Integration von Rechenkapazität ist es gelungen, die manuellen Arbeiten zur Rekonstruktion der Aufnahmedispositionen der Bilder in der gegenwärtigen digitalen Photogrammetrie zu automatisieren. Die automatische Orientierung der Bilder, aber auch die automatische Bestimmung einiger Punkte<sup>1</sup> in einem übergeordneten Koordinatensystem, werden von der automatischen Aerotriangulation (AAT) geliefert. Da die AAT mit digitalen Bildern heutzutage sehr erfolgreich im praktischen Einsatz ist, *existieren bereits viele Studien und Zahlenangaben* (siehe Abschnitt 1.2.1) *besonders über die Genauigkeit der automatischen Punktbestimmung* (sowohl 2D als auch 3D). Geometrische Objektinformationen aus *Situationsauswertungen und Bruchkantenvverfolgung* werden immer noch überwiegend manuell gewonnen und sind immer noch die gebräuchteste Methode der auf dem Markt befindlichen photogrammetrischen Systeme. *Über diese manuelle dreidimensionale Linienauswertungen der gegenwärtigen digitalen Photogrammetrie gibt es wenig Genauigkeitsangaben.* Es fehlen sowohl Konzepte über die Ermittlung der Qualitätsparameter als auch Zahlenwerte.

Konzepte für Genauigkeitsanalysen und selbstverständlich Ergebnisse sind auch aus wissenschaftlicher Sicht von Interesse.

Wie angedeutet, wird in dieser Arbeit als Methode für die Ableitung der Genauigkeiten die statistische Analyse verwendet, bevorzugt mit Wiederholungsmessungen. Die Ergebnisse sind dann empirische Genauigkeiten. Genauigkeiten können auch aus theoretischen Modellen (z.B. durch das Fehlerfortpflanzungsgesetz) geschätzt werden. Theoretische Genauigkeitsangaben haben den Nachteil, dass sie die Realität nicht genügend erfassen. Empirisch ermittelte Genauigkeitsangaben sind dagegen unmittelbar mit den realen Gegebenheiten verbunden. Genauigkeiten, die aus empirischen Untersuchungen entstanden sind, enthalten alle Fehlereinflüsse und werden deshalb von den Benutzern besonders geschätzt. Allerdings haben die empirischen Genauigkeitsmaße den Nachteil, dass sie nicht leicht verallgemeinert werden können. In dieser Arbeit werden die empirischen Genauigkeitsmaße mit einer begleitenden theoretischen Unterstützung abgeleitet.

### 1.2.1 Genauigkeiten der automatischen Punktbestimmung

In diesem Abschnitt soll gezielt am Beispiel eines Vergleiches zwischen der analytischen und digitalen Aerotriangulation der gegenwärtige Zustand der automatischen Punktbestimmung kurz vorgestellt werden.

Der Vergleich sollte uns über den großen Fortschritt der automatischen digitalen Photogrammetrie zahlenmäßig informieren, da wir in den darauf folgenden Kapiteln einige Zahlen aus der manuelle und halbautomatischen digitalen Photogrammetrie kennenlernen werden.

---

<sup>1</sup>In Frage kommen vor dem Bildflug signalisierte Punkte, auch diverse Pass- und Verknüpfungspunkte.

Wie schon angedeutet, ist die automatische Punktbestimmung (z.B. Verknüpfungspunkte) durch die Aerotriangulation (AT) eine Standardmethode der gegenwärtigen digitalen photogrammetrischen Auswertesysteme.

Kaczynski Romuald Ziobro Jan (1999)<sup>2</sup> hat Resultate (Tabelle 1.1) von durchgeführten Aerotriangulation mit der analytischen und digitalen Methode präsentiert.

		Analytisch (Planicomp P-1)		Digital (ImageStation)	
		Unabhängige Modelle	Bündelblock	Unabhängige Modelle	Bündelblock
$\sigma_0$ [ $\mu m$ ]	XY	8.1	5.5	5.8	4.9
	Z	28.2	-	22.3	-
Verknüpfungspunkte [cm]	XY	4.6	4.9	3.4	3.9
	Z	15.3	15.4	13.2	12.1

*Tabelle 1.1: Resultate aus der analytischen und digitalen AT*

Es wurde bewiesen, dass die digitale AT sehr genau ist. Ihre Genauigkeit ist mindestens auf demselben Niveau wie bei der analytischen Methode, die durch den präzisen analytischen Plotter Planicomp P1 und einen sehr erfahrenen Operateur repräsentiert ist. Im Falle dieses Versuchs sind generell die Resultate der digitalen AT um 20 % besser als die der analytischen Photogrammetrie.

Die Genauigkeit der Verknüpfungspunkte mit der analytischen Methode ist 4.9 cm in der Lage und mit der digitalen Methode 3.9 cm, beides durch einer Bündelblockausgleichung. Das entspricht etwa einer Genauigkeit von 0.2 Pixel ( $\rightarrow 4.4 \mu m$  im Bild für  $22.2 \mu m$ -Pixelgröße). Der Fehler in der Höhe ist um den Faktor 4 schlechter als der der Lage, weil eine Kamerakonstante mit 30 cm verwendet wurde (theoretisch wäre nur eine Verschlechterung um den Faktor 3 zu erwarten). Bei guten Bedingungen (freies und flaches Gelände, gute Textur) steigert sich die Genauigkeit der automatisch abgeleiteten natürlichen Punkte (Verknüpfungspunkte) auf  $0.15 \text{ Pixel}^3$  ( $\rightarrow 3.3 \mu m$  bei  $22.2 \mu m$  Pixelgröße), in sehr seltenen Situation sogar auf zu  $0.11 \text{ Pixel}$  ( $\rightarrow 2.2 \mu m$  bei  $22.2 \mu m$  Pixelgröße). Solche Genauigkeiten sind mit der Genauigkeit der signalisierten Punkte in der analytischen Photogrammetrie vergleichbar.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Im Kapitel 2 werden die Konzepte zur Bewertung der manuellen (punktweisen und linienweisen) digitalen Auswertungen vorgestellt. Die mathematischen und statistischen Grundlagen die dabei gebraucht werden, werden erwähnt. Die Problematik der halbautomatischen Liniengenerierung und die Evaluierung ihres Genauigkeitspotentials sind im nächsten Kapitel 3 behandelt. Es wird auf die Theorie der Snakes, soweit es notwendig ist, eingegangen.

Im Kapitel 4 wird der Leser mit dem Bildmaterial aus dem Testgebiet und der Durchführung der Wiederholungsmessungen vertraut gemacht.

<sup>2</sup>Kaczynski Romuald Ziobro Jan, 1999: Digital and analytical aerial triangulation - A comparison test, OEEPE Workshop, Paris

<sup>3</sup>Christian Heipke & Konrad Eder, 1999: Performance of tie point extraction in automatic aerial triangulation - OEEPE Workshop, Paris, 1999

Die Ergebnisse - empirische Genauigkeiten aus diesem Zahlenmaterial - werden im Kapitel 5 präsentiert und im Kapitel 6 analysiert. Die Analyse wird in Abhängigkeit von unterschiedlichen Faktoren - Pixelgröße, Bildmaßstabszahl, Flughöhe über Grund etc. - vorgenommen. Es wird die Frage der optimalen Pixelgröße für eine beste Messgenauigkeit in der digitalen Photogrammetrie erörtert.

Im Kapitel 7 wird am Beispiel einiger Aufgaben die Handhabung der wichtigsten Abbildungen gezeigt. Anschließend werden einige Aussagen über die Leistungsfähigkeit der digitalen Photogrammetrie gemacht, die aus dem vorhandenen Material entstanden sind. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

## 1.4 Ausgewähltes aus der Statistik

Im letzten Abschnitt der Einführung sollen einige fundamentale Kenntnisse aus der Statistik in Erinnerung gerufen werden, die wir noch in der vorliegenden Arbeit brauchen werden.

### 1.4.1 Zufallsgrößen

Eine Größe, die bei einem zufälligen Versuch unterschiedliche Werte annehmen kann, heißt *Zufallsgröße*. Wenn die Werte der Zufallsgröße durch eine Messung bestimmt werden, wird sie *Messgröße* genannt. Der *Messwert* ist der einzelne Wert, der die Messgröße nach der Beobachtung annimmt.

### 1.4.2 Wahrer Wert

Der wahre Wert einer Messgröße ist selten bekannt. Jede Messgröße hat im Augenblick der Messung einen Wert der aber immer vom wahren Wert abweicht, weil es kein fehlerfreies Messverfahren gibt. Normalerweise wird er durch eine Messung, die unter hochgenauen/präzisen Umständen entstanden ist, ersetzt, weil ihre Abweichung vom wahren Wert vernachlässigt werden kann. Dieser Bezugswert nennt man auch quasi-wahrer Wert.

### 1.4.3 Erwartungswert

Der Erwartungswert  $\mu$  ist der Mittelwert aller möglichen Messwerte  $x_j$ . Er kann empirisch durch den arithmetischen Mittelwert  $\bar{x}$  geschätzt werden.

### 1.4.4 Standardabweichung

Die Standardabweichung  $\sigma$ , noch als mittlerer Fehler bekannt, ist ein Maß für die Streuung der Werte einer Zufallsgröße. Da sie sehr oft für die Koordinaten angegeben wird, wird sie in solche Fällen noch Koordinatengenauigkeit (od. Koordinatenfehler) genannt. Wenn der Erwartungswert bekannt ist, ist sie definiert durch:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i \varepsilon_i}{n}} \quad (1.1)$$

$\varepsilon_i = x_i - \mu \dots$  wahre Abweichung

Wenn der Erwartungswert empirisch geschätzt wird, dann:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i v_i}{n-1}} \quad (1.2)$$

$v_i = x_i - \bar{x} \dots$  Verbesserung

### 1.4.5 Die Normalverteilung

Die Normalverteilung ist die wichtigste Verteilung. Ihre besondere Bedeutung beruht auf dem zentralen Grenzwertsatz, der besagt, dass die Summe von  $n$  voneinander unabhängigen, beliebig verteilten Zufallsvariablen in der Grenze  $n \rightarrow \infty$  normalverteilt sind.

Die Normalverteilung ist stetig, symmetrisch und definiert durch den Erwartungswert  $\mu$  und die Standardabweichung  $\sigma$  um den Erwartungswert, kurz  $N(\mu, \sigma)$ . Ihre Dichtefunktion, die noch Glockenkurve genannt wird, weil sie die Form einer Glocke hat, ist symmetrisch um den Erwartungswert. Das heißt, dass positive und negative Abweichungen vom Erwartungswert gleich wahrscheinlich sind. Die Standardabweichung bestimmt die Breite dieser Kurve.

### 1.4.6 Grobe Fehler

Große Messreihen sind normalverteilt. Alle Werte einer normalverteilten eindimensionalen Zufallsgröße, die innerhalb  $\mu \pm 3\sigma$  liegen, betragen 99.73% und werden als richtige Messwerte akzeptiert. Die Werte die darüber liegen, werden als grobe Fehler oder Ausreißer klassifiziert, weil deren Abweichung vom Erwartungswert als zu groß angesehen wird, und weil deren Wahrscheinlichkeit für das Auftreten zu gering ist. Sie sind nicht normalverteilt und führen zur Verfälschung der Messreihe, deshalb werden sie mit der Drei-sigma-Regel eliminiert.

Die Ursachen für Ausreißer können sehr unterschiedlich sein, am meisten durch Fehler der Beobachter oder durch Anwendung eines falsches Messverfahrens.

### 1.4.7 Systematische und zufällige Fehler

Die Unterscheidung in systematische und zufällige Fehler wird mit der Ursache der Entstehung des Fehlers begründet.

Die numerischen Resultate einer Messung liegen immer in einem gewissen Streubereich. Sie schwanken zufällig. Zufällige Einflüsse auf die Messwerte führen zu zufälligen Messfehlern

und zu einer ungerichteten Schwankung um den wahren Wert. Solche Messwerte sind im mathematischen Sinn die Zufallsgrößen und unterliegen somit den Gesetzen der Statistik. Sie werden noch zufällige (unregelmäßige) Abweichungen genannt.

Die systematischen Fehler sind einseitige Abweichungen vom wahren Wert, entweder in Richtung zu höheren oder zu niedrigeren Werten. Sie sind ein Maß für der Annäherung des Erwartungswertes an den wahren Wert. Systematische Fehler entstehen, weil die Wirklichkeit durch ein zu einfaches mathematisches oder physikalisches Modell ersetzt wird. Wenn sie auftreten, dann verfälschen sie alle Messwerte der Messreihe. Sie werden regelmäßige Abweichungen genannt.

Ein systematischer Fehler bleibt bei einer Veränderung der Messbedingungen entweder konstant oder er verändert sich als Funktion der Messparameter. Wir stellen also eine Gesetzmäßigkeit seines Verhaltens fest. Bekannte systematische Fehler können durch Korrekturen beseitigt werden. Unbekannte systematische Fehler können auf Grund experimenteller Erfahrung nur vermutet werden.

### 1.4.8 Genauigkeit

Unser Ziel erfordert eine genaue Definition des Begriffes Genauigkeit und der damit unmittelbar verbundenen Fachausdrücke. Folgende Definitionen stammen aus [Staudinger & Navratil, 2003]<sup>4</sup>.

**Definition 1.1** *Die Genauigkeit ist die qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der Annäherung eines Messergebnisses an den Bezugswert (das kann der wahre Wert, der quasi-wahre Wert oder der Erwartungswert sein). Sie setzt sich aus der Richtigkeit und der Präzision zusammen.*

**Definition 1.2** *Die Präzision ist die qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der gegenseitigen Annäherung der Messergebnisse bei mehrfacher Anwendung des Messverfahrens. Ein quantitatives Maß für die Präzision ist die Standardabweichung  $\sigma$ .*

Die Präzision beschreibt die zufälligen Fehler und wird auch als innere Genauigkeit bezeichnet. Je kleiner die Standardabweichung ist, desto präziser wurden die Messungen durchgeführt.

**Definition 1.3** *Die Richtigkeit ist die qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der Annäherung des Erwartungswertes an den wahren Wert (oder quasi-wahren Wert). Ein entsprechendes quantitatives Maß für die Richtigkeit ist demnach die systematische Abweichung  $\delta$ .*

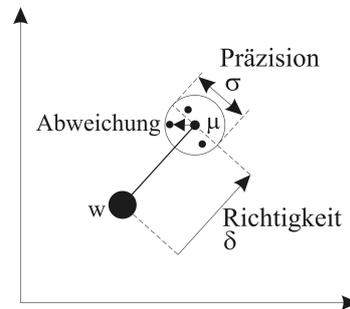
Die Richtigkeit beschreibt die systematischen Fehler und wird auch als äußere Genauigkeit bezeichnet. Je kleiner die systematische Abweichung ist, desto richtiger ist das Messergebnis. Es wird sehr oft angenommen, dass die systematischen Abweichungen bekannt sind, und dass sie vollständig korrigiert sind. In diesem Fall ist die Genauigkeit mit der Präzision äquivalent.

**Definition 1.4** *Eine Abweichung ist die Differenz zwischen einer beobachteten Messgröße (Ist-Wert) und einer bestimmten ihr zugeordneten Bezugsgröße (Soll-Wert).*

---

<sup>4</sup>Staudinger, M., Navratil, G., 2003: Die Anwendung statistischer Methoden im Vermessungswesen und GIS, Vorlesungsmanuskript - S. 67-68

Die beschriebene Situation ist mit der nächsten Abbildung 1.1 skizziert.



*Abbildung 1.1: Die Genauigkeit als Oberbegriff für Richtigkeit und Präzision*

$w$ ... wahrer Wert

$\mu$ ... Erwartungswert

$\sigma$ ... Standardabweichung

$\delta$ ... systematische Abweichung

## Kapitel 2

# Konzepte zur Ableitung von Genauigkeiten

Dieses Kapitel wird einen Beitrag zur Ermittlung von Genauigkeitsanalysekonzepten für die digitale Auswertung leisten. Im ersten Abschnitt (2.1) werden wir die allgemeine Struktur des Konzeptes kennenlernen. Im Weiteren werden wir auf die Einzelheiten der Anforderungen der Messkategorien und der Messarten eingehen.

### 2.1 Struktur des Konzeptes und einige Anmerkungen dazu

Wir brauchen ein Konzept zur Ermittlung der Genauigkeit der gegenwärtigen digitalen Auswertung. Bis jetzt haben wir gesagt, dass sie den Anforderungen der Messkategorien (Punkte und Linien) entsprechen soll. Das bildet die erste Stufe des Konzeptes (Abbildung 2.1). Die Berücksichtigung der Messungsart bildet die zweite Stufe. Die Trennung des Begriffes Genauigkeit in innere und äußere Genauigkeit (siehe Abschnitt 1.4.8) zwingt auch die weitere Trennung jedes Unterkonzeptes in noch zwei Teilen wie gezeigt.

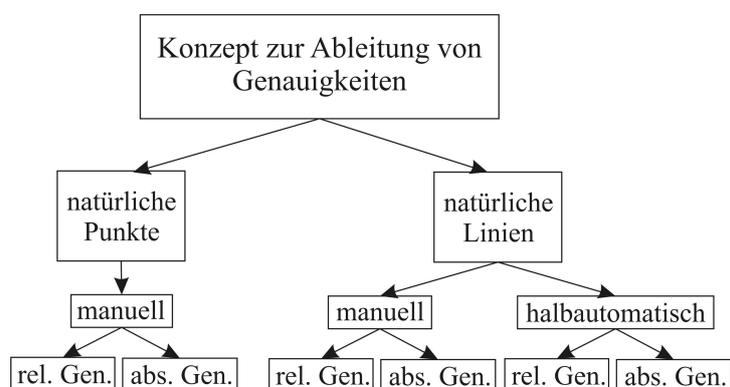


Abbildung 2.1: Struktur des Konzeptes zur Ableitung von Genauigkeiten

In der Abbildung sind die innere und äußere Genauigkeit durch relative und absolute Genauigkeit (rel. Gen./abs. Gen.) ersetzt. *Relativ* und *absolut* sollten deutlicher zeigen, dass es sich auf

der einen Seite um die gegenseitige Annäherung der Messungen und auf der anderen Seite um die Annäherung an den wahren Wert handelt. Dabei sind die Definitionen für Präzision (innere Genauigkeit, [Staudinger & Navratil, 2003], Kapitel 1.4.8) und Richtigkeit (äußere Genauigkeit) in Verbindung zur relativen und absoluten Genauigkeit zu setzen:

1. Die *relative Genauigkeit* in dieser Arbeit ist von systematischen Einflüssen befreit, weil sie sich beim gegenseitigen Vergleich der Messungen annullieren. Sie beschreibt nur die zufälligen Fehler beim Messen. Die relative Genauigkeit ist identisch mit der Definition für innere Genauigkeit. In dieser Untersuchung werden wir die relative Genauigkeit mit der Standardabweichung im lokalen Koordinatensystem ausmessen.
2. Die *absolute Genauigkeit* ist dagegen mit der Definition für äußere Genauigkeit nicht identisch. In unserem Fall deckt sie sich voll mit der allgemeinen Definition für Genauigkeit. Die absolute Genauigkeit setzt sich aus systematischen und zufälligen Fehlern zusammen, weil wir die Messungen mit dem wahren Wert bzw. quasi-wahren Wert von der Außenwelt<sup>1</sup> vergleichen. Der quasi-wahre Wert ist in diesem Fall eine Vergleichsmessung höherer Genauigkeit im übergeordneten Koordinatensystem (auch Referenzmessung genannt, weil wir die anderen Messungen zu dieser in Beziehung setzen). Wir sind aber mehr an den zufälligen Fehler interessiert, deshalb bemühen wir uns, die Systematik stets zu eliminieren, damit die Messergebnisse "richtig" sind. In dieser Untersuchung werden wir die absolute Genauigkeit mit der Standardabweichung im übergeordneten Koordinatensystem ausmessen.

Die besten Bedingungen für die statistische Analyse wären Messergebnisse mit einer übergeordneten Genauigkeit als Referenz. Der Aufwand zur Beschaffung von solchen Messungen ist allerdings in der Regel zu aufwändig. Man begnügt sich deshalb mit der Analyse der Abweichungen der Wiederholungsmessungen in der jeweiligen Projektumgebung.

Die einzelnen Konzepte werden auf statischen Schätzungen basieren. Einfache mathematische Operationen werden der Statistik in brauchbarer Form unsere Rohdaten (rohe Wiederholungsmessungen) liefern.

An dieser Stelle können wir das Ziel dieses 2. Kapitels formulieren: Es werden Konzepte zur Ableitung der relativen und absoluten Genauigkeit *manueller* dreidimensionaler *punktweiser* und *linienweiser* Digitalauswertungen mittels mathematischer und statistischer Methoden ausgearbeitet.

Wir werden uns mit der Problematik der *halbautomatischen Linienauswertung* im nächsten Kapitel 3 befassen.

Wir beginnen zuerst mit der Ermittlung der Genauigkeitsparameter einer punktweisen Auswertung.

---

<sup>1</sup>Die Außenwelt sind die Messungen inkl. des wahren Wertes im übergeordneten Koordinatensystem, wenn die Innenwelt die Messungen im lokalen Koordinatensystem darstellt.

## 2.2 Relative und absolute Genauigkeit der Punktauswertungen

Wir gehen davon aus, dass für ein Experiment der Bildmaßstab, die Kamerakonstante, das Basis/Höhenverhältnis, der Filmtyp, die Pixelgröße und das Auswertesystem unverändert bleiben. Es variieren aber die gemessenen Punkte.

Die manuell messbaren Punkte werden üblicherweise in signalisierte und natürliche Punkte<sup>2</sup> eingeteilt. Die natürlichen Punkte werden weiter in verschiedenen Punktarten (Hausecken, Punkte auf Dachfirste, etc.) klassifiziert.

Die Genauigkeit der natürlichen Punkte wird sehr oft auf die Genauigkeit der signalisierten Punkte bezogen, indem sie um die so genannte Definitionsunsicherheit<sup>3</sup>  $\sigma^{def}$  erweitert wird:

$$\begin{aligned} \text{Lage: } \sigma_{rel,XY}^{Punkt} &= \sqrt{(\sigma_{rel,XY}^{sP})^2 + (\sigma_{XY}^{def})^2} \\ \text{Höhe: } \sigma_{rel,Z}^{Punkt} &= \sqrt{(\sigma_{rel,Z}^{sP})^2 + (\sigma_Z^{def})^2} \end{aligned} \tag{2.1}$$

$\sigma_{rel,XY}^{sP}, \sigma_{rel,Z}^{sP}$  ... relative Objektgenauigkeit der signalisierten **Punkte**

$\sigma_{rel,XY}^{Punkt}, \sigma_{rel,Z}^{Punkt}$  ... relative Objektgenauigkeit der natürlichen **Punkte**

$\sigma_{XY}^{def}, \sigma_Z^{def}$  ... **Definitionsunsicherheit** der natürlichen Punkte

Richtlinien für die Genauigkeit der signalisierten Punkte im Einzelmodell in der analytischen Photogrammetrie findet man in der Literatur<sup>4</sup>:

$$\begin{aligned} \text{Lage: } \sigma_{rel,XY}^{sP} &= \sigma_{B,XY}^{sP} m_B \\ \text{Höhe: } \sigma_{rel,Z}^{sP} &= \sigma_{B,Z}^{sP} \frac{Z}{B} m_B \end{aligned} \tag{2.2}$$

$m_B$  ... Bildmaßstabszahl

$B$  ... Basis

$Z$  ... Flughöhe über Grund

$\sigma_B^{sP}$  ... Bildmessgenauigkeit, die für signalisierte **Punkte** mit  $6 \mu\text{m}$  angegeben wird

Wenn bei der Ermittlung der Objektkoordinaten die systematischen Anteile der Bildkoordinatenfehler mit zusätzlichen Parametern im mathematischen Modell eliminiert werden, ist eine Genauigkeitssteigerung bis zu 50 % möglich.

Die Definitionsunsicherheit  $\sigma^{def}$  jedes Punktes ist von dem Bildmaßstab, der Bildqualität, der Pixelgröße und dem Filmtyp (Schwarzweiß oder Farbe) abhängig. Da die Bestimmung ihrer Größe Arbeit für eine eigene Untersuchung ist (es gibt wenig vorhandene und rentable Angaben darüber), kann die **Koordinatengenauigkeit für jeden gemessenen natürlichen Punkt** sehr leicht aus Wiederholungsmessungen nach den Formeln<sup>5</sup> 2.3 geschätzt werden. Diese Formeln greifen auf der Grundformel 1.2 zurück.

<sup>2</sup>In diesem Experiment ist für uns die Genauigkeit der natürlichen Punkte von Interesse.

<sup>3</sup>Kraus, K., 2004: Photogrammetrie - Band 1, 7. Auflage, S. 271

<sup>4</sup>Kraus, K., 2004: Photogrammetrie - Band 1, 7. Auflage, S. 32

<sup>5</sup>Kraus, K., 2004: Photogrammetrie - Band 1, 7. Auflage, S. 270

$$\sigma_{rel,X}^{Punkt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad \sigma_{rel,Y}^{Punkt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad \sigma_{rel,Z}^{Punkt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2}{n-1}} \quad (2.3)$$

$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ ... arithmetisches Mittel für den jeweiligen Punkt

$n$ ... Anzahl der Messungen einer Koordinate des jeweiligen Punktes

Im Fall der Genauigkeit eines einzelnen Punktes enthalten die  $n$  Wiederholungsmessungen alle  $n$  Messungen dieses einzigen Punktes. Der Mittelwert in der Formel 2.3 wird aus den  $n$  Auswertungen berechnet.

Da alle Messwerte der Punkte im Prinzip fehlerhaft sind, müssen diese, bevor aus denen die Standardabweichung nach 2.3 gebildet wird, einer Grobfehlersuche mit  $3\sigma_{rel,X}$  bzw.  $3\sigma_{rel,Y}$  bzw.  $3\sigma_{rel,Z}$  als Schwellwert, wie gezeigt, unterzogen werden (allgemeine Bemerkungen zur Suche grober Fehler findet man im Abschnitt 1.4.6):

$$|X_i - X_{med}| \leq 3\sigma_X \quad |Y_i - Y_{med}| \leq 3\sigma_Y \quad |Z_i - Z_{med}| \leq 3\sigma_Z \quad (2.4)$$

$X_{med}, Y_{med}, Z_{med}$ ... Medianwerte für den jeweiligen Punkt

wobei  $\sigma_X$  bzw.  $\sigma_Y$  bzw.  $\sigma_Z$  aus Formel 2.3 mit dem arithmetischen Mittel berechnet wird. Der Median in der Formel 2.4 wird dem Erwartungswert bevorzugt, weil er robuster gegen grobe Fehler ist. Die Fehlersuche wird iterativ angewendet, also die Schranke wird nach Elimination jedes groben Fehlers nach Formel 2.3 für jeden Punkt neu berechnet.

Im günstigsten Fall bekommt man in der analytischen Photogrammetrie mit den Formeln 2.3 die Genauigkeit für signalisierte bzw. gut definierte Punkte entsprechend den Formeln 2.2.

Man ist aber in der Photogrammetrie immer an einem **relativen mittleren Koordinatenfehler**, der für **alle natürliche Punkte** in der jeweiligen Punktart **repräsentativ** ist, interessiert. Aus allen verfügbaren Werten einer Punktart kann man die gewünschte Genauigkeit wie folgt berechnen:

$$\sigma_{rel,X}^{nP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{m-u}} \quad \sigma_{rel,Y}^{nP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{m-u}} \quad \sigma_{rel,Z}^{nP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2}{m-u}} \quad (2.5)$$

$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ ... arithmetisches Mittel für den jeweiligen Punkt aus den Wiederholungsmessungen

$m$ ... Anzahl der Messungen einer Koordinate an allen Punkten im Datensatz, die nach der Ausreißerelimination übrig geblieben sind (das entspricht der Anzahl der Beobachtungen in einer Kleinste-Quadrate Ausgleichung).

$u$ ... Anzahl der Punkte im Datensatz (das entspricht der Anzahl der Unbekannten in einer Kleinste-Quadrate Ausgleichung).

$\sigma_{rel,X}^{nP}, \sigma_{rel,Y}^{nP}, \sigma_{rel,Z}^{nP}$ ... repräsentativer relativer mittlerer Koordinatenfehler für natürliche Punkte

Im Fall der repräsentativen Genauigkeit für eine ganze Punktart enthalten die  $m$  Wiederholungsmessungen alle  $n$  Messungen von allen  $u$  Punkten, was eine Anzahl von  $m$  Werten ergibt. Für jeden Punkt wird der Mittelwert aus seinen  $n$  Messungen berechnet. Die Differenzen in

der Formel 2.5 werden immer mit dem entsprechenden für jeden Messwert berechneten Mittel gebildet.

Aus der Sicht einer kleinsten Quadrate Ausgleichung kann man die Koordinaten der einzelnen Punkte einer Punktart als Unbekannten interpretieren. Zu ihrer Bestimmung gibt es  $m$  Beobachtungen. Dann ergibt sich die Genauigkeit einer Beobachtung, also einer gemessenen Koordinate aus der allgemeinen Beziehung 2.6, die die Ausgangsformel für 2.5 war:

$$\sigma = \sqrt{\frac{v^T v}{(m - u)}} \quad (2.6)$$

Angaben für die absolute Koordinatengenauigkeit kann man erhalten, wenn man die wahren Werte - anstatt die Mittelwerte  $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$  - kennen würde und sie in Gleichung 2.5 einsetzte. Dabei muss  $u$  gleich Null gesetzt werden.

### 2.3 Abstand eines Punktes von einer Geraden

Die mathematischen Grundlagen, die für die Ermittlung aussagekräftiger Genauigkeitsparameter mittels statistischer Methoden notwendig sind, sind in diesem Abschnitt formuliert.

#### *Aufgabenstellung:*

Gegeben sind drei Punkte mit ihren Koordinaten:  $Q(X_Q, Y_Q, Z_Q), P_A(X_{P_A}, Y_{P_A}, Z_{P_A}), P_E(X_{P_E}, Y_{P_E}, Z_{P_E})$ . Welcher ist der korrespondierende Punkt zu  $Q$  auf dem Segment  $P_AP_E$ ? Gesucht werden außerdem die Lage- und die Höhenkomponenten des Abstandes des Punktes  $Q$  von dem Segment  $P_AP_E$ .

#### *Aufgabenlösung:*

Als korrespondierender Punkt zu  $Q$  bietet sich auf dem Segment - als beste Möglichkeit - der Lotfußpunkt an. Er ist in der Abbildung 2.2 mit  $\bar{Q}$  bezeichnet.

Die Rechenaufgabe wird zuerst räumlich gelöst, indem der räumliche Abstand des Punktes  $Q$  von der durch  $P_A$  und  $P_E$  gehenden Geraden gefunden wird, aber nur im Fall, wenn der Lotfußpunkt  $\bar{Q}$  auf dem Segment liegt.

#### Allgemeine (räumliche) Lösung:

Die mathematischen Formulierungen 2.7 bis 2.11 findet man in [Bosch, 1998]<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup>Bosch, K., 1998: Mathematik-Taschenbuch - 5. Auflage, S. 265-266

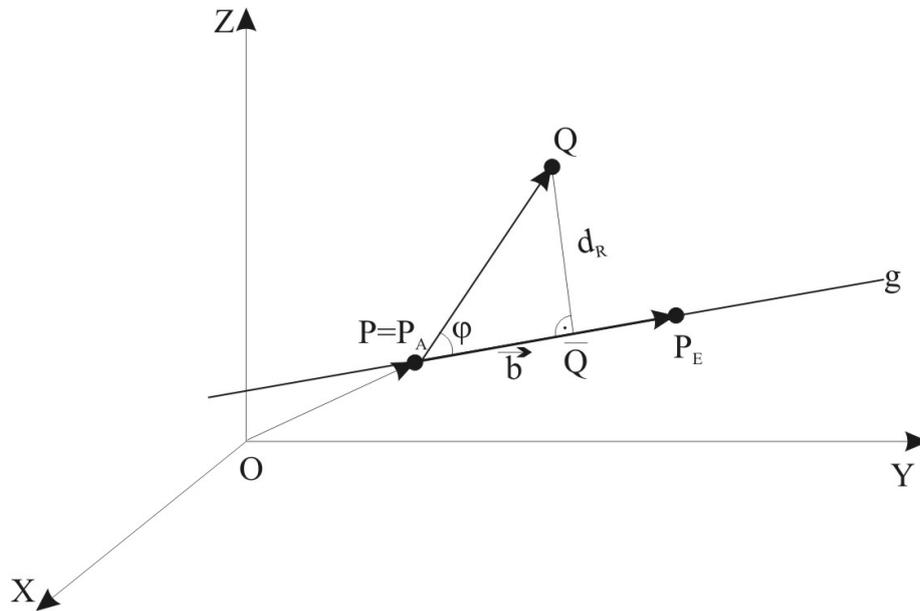


Abbildung 2.2: Distanz zwischen Punkt und Segment auf einer Gerade

Darin sind:

$Q(X_Q, Y_Q, Z_Q)$ ... untersuchter Punkt

$P(X_P, Y_P, Z_P)$ ... beliebiger Punkt auf der Geraden  $g$ , ( $P \equiv P_A$ )

$P_A, P_E$ ... Anfangs- und Endpunkt des Segmentes

$\bar{Q}(X_{\bar{Q}}, Y_{\bar{Q}}, Z_{\bar{Q}})$ ... Projektion (Lotfußpunkt) von  $Q$  auf die Gerade

$\vec{b}$ ... Richtungsvektor auf der Gerade:  $\vec{b} = \overrightarrow{P_A P_E}$

$d_R$ ... räumlicher Abstand:  $d_R = |\overrightarrow{Q\bar{Q}}| = |\overrightarrow{P\bar{Q}}| \sin \varphi; 0 \leq \varphi \leq \pi$

Für das vektorielle Kreuzprodukt gilt:

$$\left| \overrightarrow{P\bar{Q}} \times \frac{\vec{b}}{|\vec{b}|} \right| = |\overrightarrow{P\bar{Q}}| \frac{|\vec{b}|}{|\vec{b}|} \sin \varphi = |\overrightarrow{P\bar{Q}}| \sin \varphi = d_R \quad (2.7)$$

So erhält man den Abstand des Punktes  $Q_j(X_Q, Y_Q, Z_Q)$  von der Gerade  $g$ :

$$\begin{aligned} d_R &= \frac{1}{|\vec{b}|} \left| \vec{b} \times \overrightarrow{P\bar{Q}} \right| = \frac{1}{|\vec{b}|} \left| \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_Q - X_P \\ Y_Q - Y_P \\ Z_Q - Z_P \end{pmatrix} \right| \\ &= \sqrt{\frac{[b_2(Z_Q - Z_P) - b_3(Y_Q - Y_P)]^2 + [b_1(Z_Q - Z_P) - b_3(X_Q - X_P)]^2 + [b_1(Y_Q - Y_P) - b_2(X_Q - X_P)]^2}{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2}} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Den Lotfußpunkt  $\bar{Q}$  erhält man wie folgt:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{Q\bar{Q}} &= \overrightarrow{O\bar{Q}} - \overrightarrow{OQ} = \overrightarrow{O\bar{Q}} - \overrightarrow{OP} - \lambda_0 \vec{b} \\ \overrightarrow{Q\bar{Q}} \perp \vec{b} &\Rightarrow 0 = (\overrightarrow{O\bar{Q}} - \overrightarrow{OP} - \lambda_0 \vec{b}) \cdot \vec{b} = (\overrightarrow{P\bar{Q}} - \lambda_0 \vec{b}) \cdot \vec{b} = \overrightarrow{P\bar{Q}} \cdot \vec{b} - \lambda_0 |\vec{b}|^2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Daraus folgt:

$$\lambda_0 = \frac{\overrightarrow{PQ}\vec{b}}{|\vec{b}|^2} = \frac{(X_Q - X_P)b_1 + (Y_Q - Y_P)b_2 + (Z_Q - Z_P)b_3}{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2} \quad (2.10)$$

**Lotfußpunkt:**  $\overrightarrow{OQ} = \overrightarrow{OP} + \lambda_0\vec{b}$

Falls  $0 \leq \lambda_0 \leq 1$ , dann liegt der Lotfußpunkt  $\overline{Q}$  auf dem Segment  $P_AP_E$ , das in unserem Fall mit der Gerade  $g$  und dem Richtungsvektor übereinstimmt. Mit anderen Worten, der untersuchte Punkt  $Q$  gehört zum Segment  $P_AP_E$ . Wir können dann **den räumlichen Abstand** berechnen:

$$\begin{aligned} d_R = \overline{QQ} &= |\overrightarrow{PQ} - \lambda_0\vec{b}| \\ &= \sqrt{(q_1 - p_1 - \lambda_0 b_1)^2 + (q_2 - p_2 - \lambda_0 b_2)^2 + (q_3 - p_3 - \lambda_0 b_3)^2} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Spezifizierte (Getrennte) Lösung:

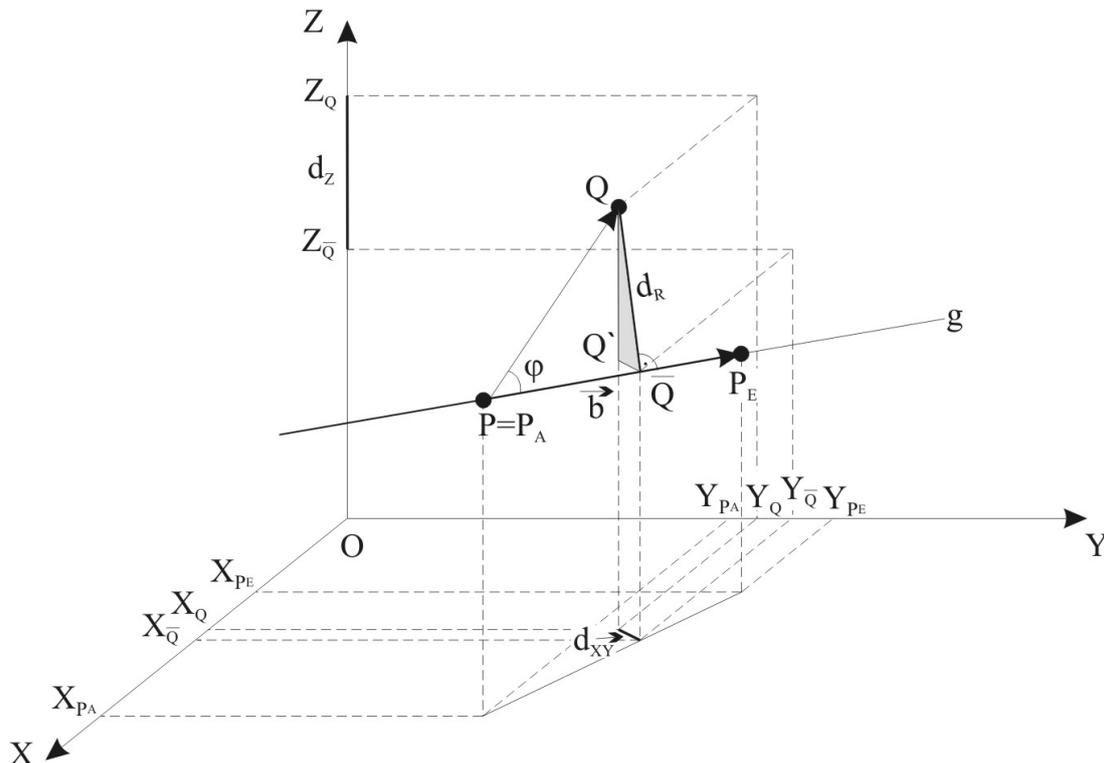


Abbildung 2.3: Lage- und Höhenabweichung zwischen Punkt und Segment auf einer Gerade

Wie aus der Abbildung 2.3 ersichtlich, ist die **Höhenkomponente**  $d_Z$  leicht zu berechnen als:

$$d_Z = Z_Q - Z_{\overline{Q}} \quad (2.12)$$

Mit den schon berechneten  $d_R$  und  $d_Z$  ergibt sich für die **Lagekomponente**  $d_{XY}$  aus dem Dreieck  $QQ'\overline{Q}$  ( $QQ' = d_Z$ ,  $Q'\overline{Q} = d_{XY}$ ):

$$d_{XY} = \sqrt{d_R^2 - d_Z^2} \quad (2.13)$$

### 2.3.1 Genauigkeit der Abstandsberechnungen

Da wir an getrennte Lage- und Höhenkomponenten interessiert sind und da die räumliche Distanz für die Ermittlung der Lagekomponente gebraucht wurde, werden wir uns im Weiteren nur auf die Lage- und Höhenkomponente konzentrieren.

Mit den Distanzen aus den Formeln 2.13 und 2.12 werden im nächsten Abschnitt 2.4 quadratische Mittelwerte gebildet werden. In der Statistik sind aber solche quadratische Mittelwertbildungen nur dann erlaubt, wenn alle Werte a-priori die gleiche Genauigkeit haben. Da bei der Berechnung der Lage- und Höhenkomponente alle drei gegebenen Punkte  $Q, P_A, P_E$  beteiligt sind (alle drei Koordinaten der Punkte sind mit Fehlern behaftet), ist die Genauigkeit solcher Berechnungen von der Konstellation der Punkte sehr abhängig. In solchen Fällen führt man entweder Gewichte für die einzelnen Werte ein oder alle Werte werden rechnerisch auf ein gleiches Genauigkeitsniveau gebracht. Hier wird der zweite Weg vorgeschlagen. In [Kraus & Haussteiner, 1993]<sup>7</sup> wird diese Problemstellung behandelt, die mit der Abbildung 2.4 skizziert ist.

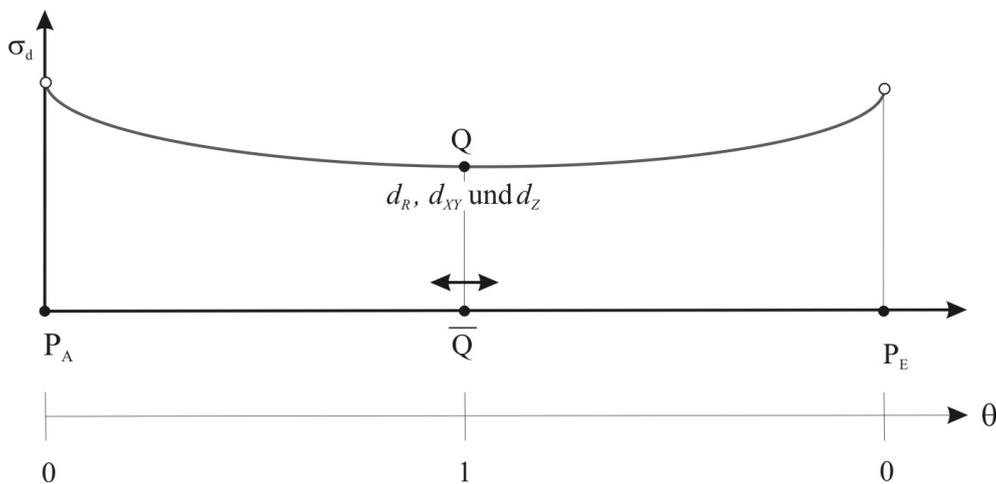


Abbildung 2.4: Abhängigkeit der Distanzberechnung von der Position des Lotfußpunktes

Die berechneten Distanzen ( $d_{XY}, d_Z$ ) haben unterschiedliche Genauigkeiten (graue Kurve in der Abbildung 2.4), die von der Position des Lotfußpunktes auf dem Segment abhängen. Diese Abhängigkeit wird mit dem Verhältnis  $\theta$  repräsentiert:

$$\theta = \frac{P_A \bar{Q}}{\bar{Q} P_E} \quad (2.14)$$

Die Formel für die Genauigkeit<sup>8</sup>  $\sigma_d^2$  solcher Distanzberechnungen in Abhängigkeit der Koordinatengenauigkeit  $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$  sieht dann so aus:

$$\sigma_d^2 = \left( 2 - \frac{2\theta}{(\theta + 1)^2} \right) \sigma_X^2 \text{ bzw. } \sigma_Y^2 \text{ bzw. } \sigma_Z^2 \quad (2.15)$$

<sup>7</sup>Kraus, K. & Haussteiner, H., 1993: Visualisierung der Genauigkeit geometrischer Daten - GIS, Jg 6, Heft 3, S. 7-12

<sup>8</sup>Kraus, K. & Bettin, R., 1970: Kombinierte photogrammetrisch-terrestrische Katastervermessung - BuL 38, S. 241-248

Falls  $\theta$  gleich Null oder Unendlich wird, geht die Formel in die zwei- bzw. dreidimensionale Streckengenauigkeit, bzw. in die Genauigkeit für den Höhenfehler aus zwei Punkten über (Details sind im Anhang A zu finden):

$$\sigma_{d_Z}^2 = 2\sigma_Z^2 \quad \sigma_{d_{XY}}^2 = 2\sigma_{XY}^2 \quad \sigma_{d_{XYZ}}^2 = 2\sigma_{XYZ}^2 \quad (2.16)$$

Die Überführung der Differenzen  $d_{XY}$  und  $d_Z$  auf gleiche a-priori Koordinatengenauigkeiten geschieht mit einer Normierung mit dem Koeffizient  $\sqrt{2 - \frac{2\theta}{(\theta+1)^2}}$ :

$$\overline{d_{XY}} = \frac{d_{XY}}{\sqrt{2 - \frac{2\theta}{(\theta+1)^2}}} \quad \overline{d_Z} = \frac{d_Z}{\sqrt{2 - \frac{2\theta}{(\theta+1)^2}}} \quad (2.17)$$

## 2.4 Relative Genauigkeit der Linienauswertungen

Nun beginnen wir mit der Ermittlung der relativen Genauigkeit der linienweisen Auswertung.

Die Linienauswertung in der digitalen Photogrammetrie besteht aus einer Reihe von Punktmessungen (auch Knoten der Linie genannt), die mit einer Linie verbunden sind. Die Messgrößen (die Knoten) werden direkt beobachtet und sind als solche auch mit einer Unsicherheit behaftet. Für uns ist es von Interesse diese Unsicherheit zu schätzen. Das Problem dabei ist, dass im Fall der Linienmessung die Knoten an den Linien immer an unterschiedlichen Stellen beobachtet werden, außer man merkt zum Beispiel sich "die Spitze vom Buschschatten, die gerade an unserer Linie liegt". Das stört den bekannten Ansatz der quadratischen Mittelwertbildung, weil keine Verbesserungen direkt gebildet werden können. Das Konzept zur Ermittlung von relativen Genauigkeitsangaben aus umfangreichen linienweisen Messreihen, das hier vorgestellt wird, basiert darauf, dass durch die direkten Beobachtungen (die Knoten der Linien) indirekt die Verbesserungen (auch indirekte Beobachtungen genannt) gewonnen werden, indem die Abweichungen zwischen je zwei Linien gebildet werden, m.a.W. die einzelnen Abweichungen sind die Verbesserungen. Da von den Abweichungen Aussagen über die Unsicherheit der Koordinatenmessung gemacht werden sollen, werden diese durch Normierung (Abschnitt 2.3.1) in Abhängigkeit von den Koordinaten der Knoten auf gleiche Genauigkeit gebracht.

Im vorigen Abschnitt 2.3 haben wir kennengelernt, wie der Abstand (jetzt Abweichung genannt) eines Punktes von einer Geraden berechnet werden kann. Im Folgenden werden wir das in unserem Konzept für die Ermittlung der relativen Genauigkeit der Linienauswertung anwenden. Die einzelnen Schritte dieses Konzeptes werden anhand einer Aufgabe demonstriert.

### 2.4.1 Relativer Messfehler einer Linie

*Aufgabenstellung:*

Beim Vorliegen von **mehreren manuellen/halbautomatischen Messungen einer Linie** soll der mittlere relative Messfehler in der Lage, in der Höhe und im Raum dieser Wiederholungsmessungen berechnet werden. Die Wiederholungsmessungen haben etwa die gleiche Anzahl von Knoten, die aber nicht an denselben Punkten liegen.

*Aufgabenlösung:*

Der mittlere relative Messfehler dieser Linie kann in diesem Fall aus den gegenseitigen Abweichungen aller Messungen ermittelt werden. Die einzelnen Abweichungen aus Abschnitt 2.3 werden getrennt für Lage und Höhe berechnet und in den Verbesserungsvektoren gesammelt. Die Indizierungen dieser Abweichungen ( $[d_{XY}]$  und  $[d_Z]$ ) werden hier in Erinnerung an die Abbildungen 2.2 und 2.3 an die gestellten Aufgabe wie folgt angepasst:

$$d_{rel,R} = \sqrt{(q_1 - p_1 - \lambda_0 b_1)^2 + (q_2 - p_2 - \lambda_0 b_2)^2 + (q_3 - p_3 - \lambda_0 b_3)^2} \quad (2.18)$$

$$d_{rel,Z} = Z_Q - Z_{\bar{Q}} \quad (2.19)$$

$$d_{rel,XY} = \sqrt{d_{rel,R}^2 - d_{rel,Z}^2} \quad (2.20)$$

Entsprechend dem Abschnitt 2.3.1 werden die Distanzen  $d_{rel,R}$  bzw.  $Z$  mit  $\sqrt{2 - \frac{2\theta}{(\theta+1)^2}}$  normiert, um auf Distanzen  $\bar{d}_{rel,R}$  bzw.  $\bar{Z}$  mit gleicher Genauigkeit zu kommen.  $d_{rel,XY}$  wird anschließend mit Formel 2.20 direkt als  $\bar{d}_{rel,XY}$  berechnet.

Wenn alle einheitlichen Verbesserungen  $\bar{d}$  gefunden sind, kann eine quadratische Mittelwertbildung vorgenommen werden, um die relative Genauigkeit (mittlerer relativer Messfehler) der linienweisen Messung zu schätzen.

Wie das Sammeln der Abweichungen genauer verläuft, wird zuerst mit der einfacheren Aufgabe - nur mit zwei Messungen einer Linie - etwas detaillierter erklärt:

Beim Vorliegen von zwei Messungen einer Linie:

Wenn wir uns das topographische Modell der ersten Messung der Linie als eine Segmentfolge und der zweiten als eine Punktfolge vorstellen, sind die Abweichungen zwischen zwei Liniemessungen die Abstände der Punkte einer (der zweiten) Linie von der Geraden  $g$  durch die Punkte der anderen (ersten) Linie (Abbildung 2.5).

Da bei der Bestimmung der relativen Genauigkeit keine der beiden Messungen einen Vorzug genießt, werden auch für die Punkte der ersten Messung die Abweichungen von den Geraden durch die Punkte der zweiten Messung berechnet.



Der **mittlere relative räumliche Messfehler** der Linie wird berechnet:

$$\sigma_{rel,R}^{Linie} = \sqrt{\left(\sigma_{rel,XY}^{Linie}\right)^2 + \left(\sigma_{rel,Z}^{Linie}\right)^2} \quad (2.22)$$

$\sigma_{rel,R}^{Linie}$ ,  $\sigma_{rel,XY}^{Linie}$ ,  $\sigma_{rel,Z}^{Linie}$  ... *relative Genauigkeiten* (in *R, XY, Z*) einer/jeder gemessenen *Linie*

## 2.4.2 Repräsentativer Wert für die Liniengenauigkeit beim Vorliegen von Wiederholungsmessungen mehreren Linien, die zu einer Linienart gehören

Wenn wir ein Experiment mit linienweisen Auswertungen haben, bei dem dieselben Rahmenbedingungen gelten, wie sie bei der punktweisen Auswertung geschildert wurden, dann variieren nur die Linienarten (Gehsteigkanten, Firstlinien der Dächer, Linien im flachen Gelände etc.). Bei  $n$  Messungen einer einzelnen Linie können die relativen Messfehler für diese Linie nach Formeln 2.21 und 2.22 ermittelt werden. Ein repräsentativer Wert über alle natürlichen Linien in einer Linienart, die mehrmals ausgewertet wurden, kann wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{rel,XY}^{nL} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l \left(\sigma_{rel,XY,i}^{Linie}\right)^2}{l}} \quad \sigma_{rel,Z}^{nL} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l \left(\sigma_{rel,Z,i}^{Linie}\right)^2}{l}} \quad \sigma_{rel,R}^{nL} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l \left(\sigma_{rel,R,i}^{Linie}\right)^2}{l}} \quad (2.23)$$

$i$  ... Anmerkung für die  $i$ -te Linie

$l$  ... Anzahl der untersuchten einzelnen Linien

$\sigma_{rel,XY}^{Linie}$  bzw.  $\sigma_{rel,Z}^{Linie}$  ... mit den Formeln 2.21 und 2.22 berechneten Standardabweichungen für jede *Linie*

$\sigma_{rel,R}^{nL}$ ,  $\sigma_{rel,XY}^{nL}$ ,  $\sigma_{rel,Z}^{nL}$  ... Repräsentative *relative mittlere Messfehler* für *natürliche Linien*

## 2.4.3 Elimination der groben Fehler

Die linienweisen Wiederholungsmessungen gehören zur Kategorie großer Messreihen. Sie sind normalverteilt. Es wird die Eigenschaft der normalverteilten Zufallsgrößen benutzt, nach welcher alle unter  $3\sigma$  liegen sollen (siehe Abschnitt 1.4.6). Somit werden die Messwerte von Ausreißer befreit:

$$\left|\bar{d}_{rel,XY,i}\right| \leq 3\sigma_{XY}^{Linie}, \quad \left|\bar{d}_{rel,Z,i}\right| \leq 3\sigma_Z^{Linie} \quad (2.24)$$

$\sigma_{XY}^{Linie}$ ,  $\sigma_Z^{Linie}$  ... Mit den Formeln 2.21 berechneten Standardabweichungen

$\bar{d}_{rel,XY,i}$ ,  $\bar{d}_{rel,Z,i}$  ... Mit den Formeln 2.17 ermittelten Abweichungen

Die Fehlersuche wird für die Lage- und Höhenabweichungen getrennt durchgeführt, weil die Lage- und Höhengenaugigkeit stark unterschiedlich ist.

Jede Messreihe<sup>12</sup> wird auf grobe Fehler überprüft, und die Standardabweichung wird solange neu berechnet bis keine Ausreißer (so werden die groben Fehler auch noch genannt) mehr gefunden werden. Anschließend werden die Standardabweichungen nach 2.23 ermittelt.

## 2.5 Absolute Genauigkeit der Linienauswertungen

Beim Vorliegen von  $n$ -Messungen einer oder von mehreren Linien und wenn Referenzinformationen über diese Linie/Linien bekannt sind, ist es nicht schwer die Messreihen in Bezug zu dieser Referenz zu bringen.

Die Gleichungen 2.21 bis 2.22 liefern die relativen Genauigkeiten. Die absoluten Genauigkeiten erhält man, wenn die Linie, entlang der die Geraden  $g$  definiert sind (Abbildung 2.5), als fehlerfreie Referenz angesehen werden kann. Der Unterschied zum vorigen Abschnitt ist der, dass bei  $n$ -Messungen einer Linie die Berechnungen nur  $n$ -mal (vgl. mit  $n(n-1)$ -mal auf Seite 18) durchgeführt werden, weil wir sie nur einmal mit der Referenz vergleichen. Die jeweilige wahre Linie dient für alle Wiederholungsmessungen als fehlerfreie Bezugslinie.

Eine weitere Erweiterung des Analysekonzeptes aus 2.4 ist, dass beim Vergleich mit Referenzinformationen (wahrer Wert), die nach den Formeln 2.13 und 2.12 berechneten *absoluten* Gesamtabweichungen<sup>13</sup> ( $d_{abs,XY}$  und  $d_{abs,Z}$ ) der Messwerte von der Referenz, sich aus zufälligen und systematischen Fehlern zusammensetzen (siehe Abschnitt 1.4.7 und 1.4.8):

$$d_{abs,XY,i} = d_{abs,XY,i}^{zuf} + s_{abs,XY}^{Linie,sys} \quad d_{abs,Z,i} = d_{abs,Z,i}^{zuf} + s_{abs,Z}^{Linie,sys} \quad (2.25)$$

$i \dots$  Anmerkung für  $i$ -te Abweichung aus einer Messreihe (Linie)

Die systematischen Anteile in den vorgenommenen Linienauswertungen werden mathematisch mit Formel 2.26 geschätzt:

$$s_{abs,XY}^{Linie,sys} = \frac{\sum_{i=1}^m d_{abs,XY,i}}{m} \quad s_{abs,Z}^{Linie,sys} = \frac{\sum_{i=1}^m d_{abs,Z,i}}{m} \quad (2.26)$$

$m \dots$  ist die Anzahl der berechneten Abweichungen aus einer Messreihe ( $n$ -Messungen einer Linie), die nach der Elimination grober Fehler übrig geblieben sind

$d_{abs,XY}$  bzw.  $d_{abs,Z} \dots$  nach Formeln 2.13 und 2.12 berechnete Gesamtabweichungen

Anschließend werden die systematischen Anteile von der Gesamtabweichung reduziert:

$$d_{abs,XY,i}^{zuf} = d_{abs,XY,i} - s_{abs,XY}^{Linie,sys} \quad d_{abs,Z,i}^{zuf} = d_{abs,Z,i} - s_{abs,Z}^{Linie,sys} \quad (2.27)$$

<sup>12</sup>Eine Messreihe umfasst alle  $n$ -Messungen einer Linie.

<sup>13</sup>Im Kapitel 2.3.1 wurde erklärt, dass die ermittelten Abweichungen  $d_{rel,XY}$  und  $d_{rel,Z}$  von der Konstellation der drei Punkte abhängig sind und somit auch unterschiedliche Genauigkeiten besitzen. Deswegen wurden sie durch  $\sqrt{2 - \frac{2\theta}{(\theta+1)^2}}$  normiert. Das gilt aber nur dann, wenn alle 3 Punkte mit Fehlern behaftet sind. In unserem Fall, wo Referenzmessungen vorliegen, hat nur der eine Punkt eine Ungenauigkeit, die gesucht wird. Deswegen werden die in diesem Abschnitt ermittelten Distanzen  $d_{abs,XY}$ ,  $d_{abs,Z}$  nicht normiert.

Die zufälligen Fehler stellen den "wahren" Messfehler dar. Wir interessieren uns vorwiegend für diese Werte.

Die Elimination der systematischen Fehler erfolgt nach einer Grobfehlersuche mit den Schranken  $3\sigma_{abs,XY}^{Linie}$  bzw.  $3\sigma_{abs,Z}^{Linie}$ , wo  $\sigma_{abs,XY}^{Linie}$  bzw.  $\sigma_{abs,Z}^{Linie}$  die Gesamtstandardabweichungen in der Lage und in der Höhe für die entsprechende Linie nach Formeln 2.28 sind. Die Grobfehlersuche wird iterativ und für Lage und Höhe getrennt angesetzt.

Aus allen nach der Grobfehlersuche übriggebliebenen  $d_{abs,XY}$  bzw.  $d_{abs,Z}$  und aus allen anschließend nach 2.27 ermittelten Abweichungen  $d_{abs,XY}^{zuf}$  bzw.  $d_{abs,Z}^{zuf}$  werden die entsprechenden absoluten Messfehler - **absoluter Gesamtkoordinatenfehler** nach 2.28 und **absoluter zufälliger Koordinatenfehler** nach 2.29 - für jede Linie ermittelt.

$$\begin{aligned}\sigma_{abs,XY}^{Linie} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m d_{abs,XY,i}^2}{m}} & \sigma_{abs,Z}^{Linie} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m d_{abs,Z,i}^2}{m}} \\ \sigma_{abs,R}^{Linie} &= \sqrt{\left(\sigma_{abs,XY}^{Linie}\right)^2 + \left(\sigma_{abs,Z}^{Linie}\right)^2}\end{aligned}\quad (2.28)$$

$m$ ... Anzahl aller Gesamtabweichungen aus der Messreihe, die nach der Ausreißerelimination übriggeblieben sind

$d_{abs,XY}$ ,  $d_{abs,Z}$ ... Die absoluten Gesamtabweichungen nach Formeln 2.13 und 2.12, die nach der Ausreißerelimination übriggeblieben sind

$$\begin{aligned}\sigma_{abs,XY}^{Linie,zuf} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left(d_{abs,XY,i}^{zuf}\right)^2}{m}} & \sigma_{abs,Z}^{Linie,zuf} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left(d_{abs,Z,i}^{zuf}\right)^2}{m}} \\ \sigma_{abs,R}^{Linie,zuf} &= \sqrt{\left(\sigma_{abs,XY}^{Linie,zuf}\right)^2 + \left(\sigma_{abs,Z}^{Linie,zuf}\right)^2}\end{aligned}\quad (2.29)$$

$m$ ... Anzahl aller zufälligen Abweichungen aus der Messreihe

$d_{abs,XY}^{zuf}$ ,  $d_{abs,Z}^{zuf}$ ... die absoluten zufälligen Gesamtabweichungen nach Formeln 2.27

Die entsprechenden **repräsentativen absoluten Fehler** für natürliche Linien werden auch berechnet:

$$\begin{aligned}\sigma_{abs,XY}^{nL} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l \left(\sigma_{abs,XY,i}^{Linie}\right)^2}{l}} & \sigma_{abs,Z}^{nL} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l \left(\sigma_{abs,Z,i}^{Linie}\right)^2}{l}} \\ \sigma_{abs,R}^{nL} &= \sqrt{\left(\sigma_{abs,XY}^{nL}\right)^2 + \left(\sigma_{abs,Z}^{nL}\right)^2}\end{aligned}\quad (2.30)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{abs,XY}^{nL,zuf} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l \left(\sigma_{abs,XY,i}^{Linie,zuf}\right)^2}{l}} & \sigma_{abs,Z}^{nL,zuf} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l \left(\sigma_{abs,Z,i}^{Linie,zuf}\right)^2}{l}}\end{aligned}\quad (2.31)$$

Für die systematischen Anteile des Gesamtkoordinatenfehlers in der Lage und der Höhe nach 2.26 werden auch repräsentative Werte berechnet:

$$\begin{aligned}s_{abs,XY}^{nL,sys} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l \left(s_{abs,XY,i}^{Linie,sys}\right)^2}{l}} & s_{abs,Z}^{nL,sys} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l \left(s_{abs,Z,i}^{Linie,sys}\right)^2}{l}}\end{aligned}\quad (2.32)$$

Überall in den Formeln 2.30 bis 2.32 wird mit "l" im Nenner die Anzahl der untersuchten Linie bezeichnet.

## 2.6 Übergangsformeln zwischen objektbezogenen und bildbezogenen Genauigkeitsmaßen

In der Photogrammetrie<sup>14</sup> wird für den Normalfall die Berechnung der Objektkoordinaten  $X, Y, Z$  aus den messbaren Bildkoordinaten  $\xi$  und  $\eta$  bzw.  $p_\xi$  mit den Formeln 2.33 angegeben:

$$\begin{aligned} -Z &= \frac{cB}{\xi_1 - \xi_2} = \frac{cB}{p_\xi} \\ Y &= -Z \frac{\eta_1}{c} = -Z \frac{\eta_2}{c} \\ X &= -Z \frac{\xi_1}{c} \end{aligned} \quad (2.33)$$

$(\xi_1, \eta_1)(\xi_2, \eta_2) \dots$  Bildkoordinatenpaare des Punktes im linken und rechten Bild

Die Genauigkeit dieser indirekt gewonnenen Koordinaten bekommt man mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz, angewandt auf die Gleichungen 2.33:

$$\begin{aligned} \sigma_Z &= \frac{cB}{p_\xi^2} \sigma_{p_\xi} = \frac{Z}{c} \frac{Z}{B} \sigma_{p_\xi} = m_B \frac{Z}{B} \sigma_{p_\xi} \\ \sigma_Y &= \sqrt{\left(\frac{\eta_1}{c} \sigma_Z\right)^2 + \left(\frac{Z}{c} \sigma_\eta\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\eta_1}{c} m_B \frac{Z}{B} \sigma_{p_\xi}\right)^2 + (m_B \sigma_\eta)^2} \\ \sigma_X &= \sqrt{\left(\frac{\xi_1}{c} \sigma_Z\right)^2 + \left(\frac{Z}{c} \sigma_\xi\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\xi_1}{c} m_B \frac{Z}{B} \sigma_{p_\xi}\right)^2 + (m_B \sigma_\xi)^2} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Die ersten Terme in den Formeln 2.34 für  $\sigma_X$  und  $\sigma_Y$  sind schwierig zu berechnen. Für grobe Genauigkeitsberechnungen reicht es aus, wenn diese vernachlässigt werden, und wenn die bildbezogenen Genauigkeiten  $\sigma_\xi$ ,  $\sigma_\eta$  und  $\sigma_{p_\xi}$  durch eine einzige Bildmessgenauigkeit  $\sigma_B$  ersetzt werden. Damit lauten die Formeln:

$$\begin{aligned} \sigma_Z &= m_B \frac{Z}{B} \sigma_B \\ \sigma_X &= \sigma_Y = m_B \sigma_B \end{aligned} \quad (2.35)$$

Die Bildmessgenauigkeit wird dabei für die Lage und für die Höhe gleich angenommen.

Mit den Formeln aus Abschnitten 2.2 und 2.4, 2.5 und 3.6 werden objektbezogene Genauigkeitsangaben ermittelt. Da die **Bildmessgenauigkeit** auch von Interesse in dieser Arbeit ist, wird sie für natürliche Punkte und Linien (wird in der Formel mit *nat* verkürzt wiedergegeben) wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} \sigma_{B,XY}^{nat} &= \sigma_{XY}^{nat} \frac{1}{m_B} \\ \sigma_{B,Z}^{nat} &= \sigma_Z^{nat} \frac{B}{Z} \frac{1}{m_B} \\ \sigma_{B,R}^{nat} &= \sqrt{\frac{(\sigma_{B,XY}^{nat})^2 + (\sigma_{B,Z}^{nat})^2}{2}} \end{aligned} \quad (2.36)$$

Es wird unterstellt, dass die Bildmessgenauigkeit unterschiedlich in der Lage und in der Höhe ist.

<sup>14</sup>Kraus, K., 2004: Photogrammetrie - Band 1, 7. Auflage, S. 29-32

### 2.6.1 Einige ergänzende Begriffe zur Genauigkeit

An dieser Stelle ist eine Abgrenzung der verwendeten Genauigkeitsbegriffe notwendig. Das wird mit folgender Tabelle versucht.

Genauigkeitsangaben	Maß	Oberbegriff
objektbezogenen	Standardabweichung <i>oder</i> mittlerer Messfehler, Koordinaten-fehler,-genauigkeit	Objektgenauigkeit
bildbezogenen	Messgenauigkeiten in der Lage <i>und</i> Messgenauigkeiten in der Höhe	Bildmessgenauigkeiten

*Tabelle 2.1: Verwendete Begriffe*

In diesem Abschnitt wurde der Begriff Bildmessgenauigkeit zum ersten Mal eingeführt. Er wird in Bildmessgenauigkeit (oder kurz Messgenauigkeit) in der Lage und Bildmessgenauigkeit (Messgenauigkeit) in der Höhe geteilt. Die Bildmessgenauigkeit in  $[\mu\text{m}]$  ist ein Maß für bildbezogenen Genauigkeitsangaben. Da die Einheiten auf das Bild bezogen sind, werden sie bildbezogen genannt. Wenn die Messgenauigkeit in Objekteinheiten  $[m]$  dargestellt ist, werden sie als objektbezogen bezeichnet. In den vorigen Kapiteln haben wir die objektbezogenen Genauigkeitsangaben (relative und absolute Genauigkeit der manuellen Auswertungen) kennengelernt, die noch mit dem Oberbegriff Objektgenauigkeit charakterisiert werden. Sie werden durch die Standardabweichungen (oder auch mittlere Fehler) in  $[m]$  angegeben. Im Weiteren wird noch der Begriff pixelbezogene Messgenauigkeit vorkommen. Dies ist der Fall, wenn die ermittelten Bildmessgenauigkeiten in Anteilen der Pixelgröße ausgedrückt werden, indem sie durch die entsprechende Pixelgröße dividiert werden. Die Einheiten sind dann  $[\Delta]$  - Anteile der Pixelgröße.

## Kapitel 3

# Halbautomatische Linienauswertung durch Snakes

Die auf dem Markt befindlichen photogrammetrischen Auswertesysteme bieten noch keine automatische oder halbautomatische Linienauswertung an. Wir wollen aber das Genauigkeitspotenzial der Auswertetechnik mit Snakes, eine bekanntlich halbautomatisches Verfahren, demonstrieren.

In diesem Kapitel werden zuerst einige Fachausdrücke geklärt. Die mathematischen Grundlagen des Modells der Snakes (auch bekannt als *active contour model*) zur halbautomatischen Linienextraktion werden vorgestellt. Einige Stellen, die für diese Arbeit wichtig sind, werden ausführlicher erklärt.

Anschließend wird ein Konzept, basierend auf den allgemeineren Konzepten aus Kapitel 2, zur Ermittlung der relativen und absoluten Genauigkeit der mit der Snake-Methode zu extrahierenden Linien ausgearbeitet.

Am Anfang greifen wir auf die Dissertation von [Kerschner, 2003]<sup>1</sup> zurück. Er hat erfolgreich Snakes zur Linienextraktion eingesetzt.

### 3.1 Kurze Einführung in die Theorie der Snakes

Die Snakes wurden zum ersten Mal von Michael Kass, Andrew Witkin und Demetri Terzopoulos<sup>2</sup> im Jahr 1987 als Verfahren zur Extraktion von *linienhaften Elementen* in digitalen Bildern präsentiert.

Durch Näherungswerte wird die Position und der Verlauf einer Zielkurve im Bild grob vorgegeben. Wenn diese Ausgangspositionen ausgewählt sind, wird ein automatischer Optimierungsprozess der Minimierung einer Energiefunktion gestartet. Die Optimierung der Energiefunktion verschiebt die durch die Ausgangspunkte vorgegebene Kurve in Richtung der Zielkurve. Die Energiewerte (siehe mehr dazu im Abschnitt 3.3) sind aus dem Bild ableitbar. Die

---

<sup>1</sup>Kerschner, M., 2003: Snakes für Aufgaben der digitalen Photogrammetrie und Topographie - Dissertation

<sup>2</sup>Kass, M., Witkin, A., Terzopoulos, D., 1987: Snakes: active contours models - Proceedings of the First International Conference on Computer Vision (ICCV), S. 259-268

Kurve bewegt sich während dieses Optimierungsprozesses. Sie verändert ihre Form und Lage bis sie die Zielkurve erreicht hat. Davon kommt auch der Name "active contour model".

Die *linienhaften Elemente* können sowohl Bildkanten als auch Linien sein. Bildkanten sind eine Folge aus Bildpunkten (Pixel), die eine abrupte Änderung der Grauwerte in der Bildmatrix darstellen. In Bildern sind Kanten oft die auffälligsten Merkmale. Eine Linie im Sinne der Bildverarbeitung wird durch zwei benachbarte Grauwertkanten beschrieben, m.a.W. sie ist ein schmales Band (2-3 Pixel breit). Möchte man eine Linie - z. B. einen Draht mit einer gewissen Dicke - detektieren, so erhält man zwei Kanten. Diese müssen in der Regel durch geeignete Verfahren im Detektionsprozess auf eine Mittellinie gebracht werden. In dieser Arbeit sind wir vor allem an den einzelnen Kanten im Bild interessiert. Die Definition für eine Linie wird so weit verändert, dass eine Linie am Objekt eine Kante darstellt. Deshalb werden beide Wörter gleichwertig verwendet. Wenn es um eine Linie im Sinne der Bildverarbeitung geht, bezeichnet man sie als schmales Band.

Die *Snake* ist eine ebene Kurve in 2D, die in einem digitalen Bild definiert ist. Mit der Laufvariablen  $s$  (z. B. die Bogenlänge oder die Sehnenlänge eines approximierenden Polygonzugs) wird ihre Gleichung wie folgt formuliert:

$$v(s) = (x(s), y(s))^T \quad (3.1)$$

Wie schon erwähnt, ist das Ziel der Snake eine bestimmte Form und Position zu finden, bei denen die Energiefunktion  $E_{snake}$  das Minimum erreicht. Die Energiefunktion wird durch Integration über die gesamte Kurve ermittelt:

$$E_{snake} = \int_0^1 E_{snake}^K(v(s)) ds \quad (3.2)$$

wobei  $E_{snake}^K$  der Anteil eines Knotens  $K$  an der Gesamtenergie der Snake ist.

Falls die Snake am Ende der Energieminimierung eine glatte Form bekommen hat, dann ist der optimale Status erreicht. Für diesen Status sind drei Gruppen von Termen in der Energiefunktion verantwortlich: interne Terme, Bildterme (photometrische Terme) und externe Terme:

$$E_{snake} = E_{int} + E_{pho} + E_{ext} \quad (3.3)$$

## 3.2 Interne Terme

Die glatte Form der Snake wird durch die internen Terme beschrieben.

Ausgehend von den Splines<sup>3</sup> haben Kass<sup>4</sup> et al. die internen Terme aus einer Kombination von Termen erster und zweiter Ordnung formuliert:

$$E_{int} = \frac{1}{2} \left( \alpha(s) |v_s(s)|^2 + \beta(s) |v_{ss}(s)|^2 \right) \quad (3.4)$$

<sup>3</sup>Splines sind zusammengesetzte Polynome vom Grad  $m$ , die eine kontinuierliche Kurve in eine Serie von  $N$  Knoten interpolieren [Kraus, K., 2000: Photogrammetrie - Band 3, S. 99].

<sup>4</sup>Kass, M., Witkin, A., Terzopoulos, D., 1988: Snakes: active contours models - International Conference on Computer Vision, S. 321-331

Die Terme  $v_s$  der ersten Ableitung der Kurve bestimmen die Änderung der Bogenlänge und sollen das Drehen der Kurve verhindern. Die Terme  $v_{ss}$  zweiter Ordnung bestimmen die Krümmung. In der Snake-Terminologie werden diese Terme noch "continuity" Term  $E_{cont}$  und "curvature" Term  $E_{curv}$  genannt:

$$E_{int} = \frac{1}{2} \left( \alpha(s) |v_s(s)|^2 + \beta(s) |v_{ss}(s)|^2 \right) = (\alpha(s)E_{cont} + \beta(s)E_{curv}) \quad (3.5)$$

$\alpha$  und  $\beta$  sind positive Gewichtungsfaktoren, mit deren Hilfe der Einfluss der beiden Komponenten gesteuert wird.

Der *continuity* Term führt zum Schrumpfen<sup>5</sup> der Snakes, deshalb wird er oft weggelassen.

### 3.3 Photometrische Terme

Die photometrischen Terme (Bildterme) beschreiben die Position der Snake im Bild. Sie ziehen die Snake zur Zielkurve. Die photometrische Energie ist von der Bildfunktion  $I(x, y)$  für das ganze Bild im voraus zu berechnen. Das so entstandene Bild wird als *Energiebild* bezeichnet.

Die Berechnung der photometrischen Energie kann abhängig von der Aufgabe auf unterschiedliche Weise passieren. Die einfachste photometrische Energie ist das Bild selbst:

$$E_{pho} = I(x, y) \quad (3.6)$$

Dieses Energiebild ist aber oft nicht ausreichend. Je nach Typ der zu extrahierenden Objekte werden deshalb unterschiedliche Verfahren aus der Bildverarbeitung<sup>6</sup> verwendet, die für die Verfolgung und für die Größe des Anziehungsbereiches der Kanten im Bild sorgen.

Der Gradient (die erste Ableitung des Bildes) wird für die Verfolgung der Kanten im Bild sehr oft empfohlen. Die gesuchte Information liegt dort, wo der Gradient am stärksten ist. Das Problem dabei ist, dass sich die Snake von der Zielkurve nicht angezogen fühlt, wenn der Anziehungsbereich nicht stark genug ist, m.a.W. wenn die Startwerte zu weit entfernt sind. In solchen Fällen fühlt sich die Snake von anderen kleinen lokalen Minima angezogen. Eine mögliche Lösung wäre, wenn sich zumindest ein Teil der Snake mit der Zielkurve überdeckt. Das macht aber die Resultate von den Startpositionen sehr abhängig, was gegen die Grundidee der Snakes spricht. Die Linienextraktion durch Snakes ist nämlich als robustes Verfahren gedacht, das relativ unabhängig vom Rauschen und von den Startwerten sein sollte. Es wird vielmehr daran gearbeitet, den Anziehungsbereich als ein breites kontinuierliches Gebirge von Energie zu gestalten.

Im Folgenden wird eine Strategie für die Energiebilderzeugung vorgestellt, die versucht, die kleinen lokalen Minima zu verringern und gleichzeitig den Konvergenzbereich zu verstärken.

<sup>5</sup>Das Schrumpfen ist eines der Hauptprobleme von Snakes. Einige Lösungen zur Verhinderung des Problems sind in [Kerschner, M., 2003: S. 45- 54] beschrieben.

<sup>6</sup>Kerschner, M., 2003: S. 54-63

Die Strategie beruht auf der Publikation von [Lee, J., 1983]<sup>7</sup> und auf der Doktorarbeit von [Förstner, W., 1991]<sup>8</sup>, der sich mit der Schätzung des Rauschanteils in digitalen Bildern befasst hat.

### 3.3.1 Der Sigma Filter

Eine Bildvorverarbeitung ist (eine Filterung abhängig von der Bildqualität bzw. vom Rauschen) zweckmäßig, um kleine Grauwertschwankungen zu beseitigen ohne dabei signifikante Grauwertspünge (die gesuchte Information über die Position der Linie im Bild) zu eliminieren. Das störende Signal ist als Rauschen bekannt, das als statistische Unsicherheit angesehen wird. Den wahren Grauwerten sind zufällige Fehler überlagert.

Es gibt eine Reihe von kantenerhaltenden Glättungsfiltern, die das Rauschen möglichst gut unterdrücken und versuchen, die Grauwertkanten in ihrer ursprünglichen Schärfe zu erhalten. In [Abramson & Schowengerdt, 1993]<sup>9</sup> wurden sechs solche Filter getestet. Die Ergebnisse wurden nach statistischen Methoden untersucht und bewertet. Die besten Resultate wurden mit dem Sigma-Filter<sup>10</sup> erzielt.

Der Sigma-Filter betrachtet das Rauschen im Bild als normalverteilt und mit einem zufälligen Charakter. Bei der Filterung wird eine Umgebung (3x3, 5x5, oder 7x7) um jedes Zentralpixel eines homogenen Bereiches betrachtet. Da der wahre Wert dieses Bereiches unbekannt ist, wird er durch den Grauwert des Zentralpixels  $g$  ersetzt. Der neue Wert des Zentralpixels ergibt sich aus einer Mittelwertbildung jener Pixel  $g_{ij}$  in der Umgebung, die unterhalb der Schranke  $N\sigma_n$  liegen ( $\sigma_n$  ist eine Schätzung für den Rauschanteil):

$$|g_{ij} - g| \leq N\sigma_n \quad (3.7)$$

Normalerweise wird für  $N$  zwei genommen. Die Bedingung 3.7 sollte mit  $2\sigma_n$  breit genug sein, um "homogene" Grauwerte mit einer Wahrscheinlichkeit von 95.5% auszuwählen und dennoch eng genug sein, um gut ausgeprägte Kanten und markante Details im Bild auszuschließen. Somit bleiben lineare Objekte wie Wege (1 oder 2 Pixel breit) erhalten. Liegen nur wenige Pixel ( $\leq 3$  bei einer 5x5 Umgebung) in der definierten Grauwertzone, ist vermutlich das Zentralpixel selbst ein Ausreißer. In diesem Fall wird der Mittelwert mit den Pixeln aus der nächsten Umgebung (3x3 Umgebung) des Zentralpixels gebildet.

Es wird empfohlen den Filter iterativ anzuwenden.

Der Nachteil des Sigma-Filters ist, dass gute Kenntnisse der Grauwertverteilung erforderlich sind, um gute Ergebnisse zu bekommen. Das Problem bereitet die Bestimmung der Breite der Schranke  $N\sigma_n$ . Sie soll kleiner sein als der kleinste Kontrast einer Kante oder Struktur, die erkannt werden soll. Diese Schranke ist außerdem nicht überall im Bild gleich. Mit den Details dieser Abschätzung hat sich [Förstner, W., 1991] beschäftigt.

<sup>7</sup>Lee, J., 1983: Digital Image Smoothing and the Sigma Filter - Computer Vision, Graphics, And Image Processing 24, S. 255-269

<sup>8</sup>Förstner, W., 1991: Statistische Verfahren für die automatische Bildanalyse und ihre Bewertung bei der Objekterkennung und -vermessung - DGK, Reihe C, Heft Nr. 370

<sup>9</sup>Abramson, S.B., Schowengerdt, R.A., 1993: Evaluation of Edgepreserving Smoothing Filters for Digital Image Mapping. - ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 48, No 2

<sup>10</sup>Lee, J., 1983: Digital Image Smoothing and the Sigma Filter - Computer Vision, Graphics, And Image Processing 24, S. 255-269

### 3.3.2 Bestimmung der Schranke aus dem Roberts Gradient

Das Rauschen  $\sigma_n$  kann in homogenen Bereichen des Bildes bestimmt werden. Die homogenen Bereiche werden im Prinzip durch eine automatische Segmentierung (Abgrenzung) gefunden. Die erste Ableitung (die Differenz zwischen den benachbarten Pixeln)  $g'$  der Grauwertfunktion in homogenen Bereichen ist gleich null. Dort wo  $g'$  nicht gleich null ist, wird die erste Ableitung vom Rauschen dominiert.

Eine erste Näherung für die Schranke 3.7, die hier als Rauschvarianz bezeichnet wird, bekommt man aus der Beziehung 3.8<sup>11</sup>:

$$\sigma_n^2 = \frac{E(g')}{2} \quad (3.8)$$

wobei  $E(g')$  den Mittelwert der ersten Ableitung aus dem homogenen Gebiet darstellt.

Für die Ermittlung der ersten Ableitung bietet sich der Roberts Gradient<sup>12</sup> an, da er leicht zu berechnen ist und eine hohe Rauschempfindlichkeit hat. In einer 4x4 Umgebung lässt er sich wie folgt formulieren:

$$\begin{aligned} g'_{[Diagonal1,jk]} &= g_{[j,k]} - g_{[j+1,k+1]} \\ g'_{[Diagonal2,jk]} &= g_{[j,k+1]} - g_{[j+1,k]} \\ r_{ik} &= \sqrt{g'^2_{[1,jk]} + g'^2_{[2,jk]}} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Die Schreibweise der Formel 3.8 ändert sich also auf:

$$\sigma_n^2 = \frac{E(r)}{2} \quad (3.10)$$

Mit der so ermittelten Rauschschranke nach 3.10 geht man in den Sigma-Filter (Abschnitt 3.3.1) und bestimmt die Stärke der durchzuführenden Glättung.

### 3.3.3 Anpassung an die Snakes-Problemstellung

Für die Zwecke der Snakes sind wir nicht so sehr an den markanten Details im Bild interessiert, sondern an möglichst vielen Kanten, die Linien (unterschiedliche Begrenzungslinien, Straßenränder, Gehsteige, Hausumrisse, Dachfirste) im Bild repräsentieren. Deshalb ist sogar eine übertrieben starke Glättung im Bild wünschenswert, die die Flächen im Endeffekt sogar homogenisiert (viele lokale Minima werden abgeschafft) ohne dabei die Bildkanten zu schwächen. Dadurch tritt sogar eine Kantenverstärkung ein. Deswegen wurden die oben vorgestellten zwei Methoden (Abschnitte 3.3.1 und 3.3.2) etwas angepasst:

Die Rauschvarianz wurde verstärkt, indem anstatt die Hälfte vom Mittelwert der ersten Ableitung der Mittelwert selbst genommen wurde, wie in der Formel 3.11 gezeigt ist:

<sup>11</sup>Förstner, W., 1991: Statistische Verfahren für die automatische Bildanalyse und ihre Bewertung bei der Objekterkennung und -vermessung - DGK, Reihe C, Heft Nr. 370, S. 33

<sup>12</sup> Roberts, L. G., 1965: Machine perception of three-dimensional solids - Massachusetts Institued of Technology, Lincoln Laboratory

$$\sigma_{n_i}^2 = E(r) \quad (3.11)$$

Der mittlere repräsentative Wert für ein homogenes Gebiet wird aus drei unterschiedlichen Stichproben (vom Operateur händisch ausgewählt) ermittelt. Dabei werden alle Pixel, die einen konstanten Wert (der "wahre" Wert in homogenen Gebieten ist in der ersten Ableitung konstant und nicht null, weil die Grauwertdifferenzen "r"(3.9) dem Dynamikbereich des Bildverarbeitungssystems angepasst werden) in der jeweiligen Zone haben, bei der Summe nicht berücksichtigt, damit nur die mit Rauschen behafteten Pixel übrig bleiben. M.a.W. als Rauschpixel werden alle über diesen konstanten Wert liegenden Pixel akzeptiert. Es wird ein Mittelwert und eine Rauschvarianz (nach 3.11) für jede Stichprobe ermittelt, und daraus wird die Rauschstandardabweichung für das ganze Bild wie folgt abgeschätzt:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sigma_{n1}^2 + \sigma_{n2}^2 + \sigma_{n3}^2}{3}} \quad (3.12)$$

Die Schranke  $2\sigma_n$  im Sigma-Filter erwies sich als zu eng für die gestellte Aufgabe, deshalb wurde sie auf  $3\sigma_n$  verbreitert.

Die Zusatzbedingung, dass der Mittelwert für das Zentralpixel aus der 3x3 Umgebung gebildet wird, wenn nur drei oder weniger als drei Pixel in der 5x5 Umgebung gefunden werden, ist entfallen. Die Annahme dafür war, dass es sich in diesem Fall beim Zentralpixel um einen Ausreißer handelt. Damit sollten etwaige "spikes" eliminiert werden. Es kommen aber auch viele andere Situationen vor, vor allem an breiteren Kanten, die keine unerwünschten Pixel sind. Da die 5x5 Umgebung eine relativ kleine Umgebung ist, würde eine Glättung an Kanten vorgenommen, was gegen den Wunsch, die Kanten möglichst unverändert zu erhalten, spricht. Welche Pixel von dieser Bedingung ( $\leq 3$ ) dabei betroffen wären, sieht man am Beispiel der Abbildung 3.1. Die Betroffenen Pixel sind in Schwarz gezeigt.

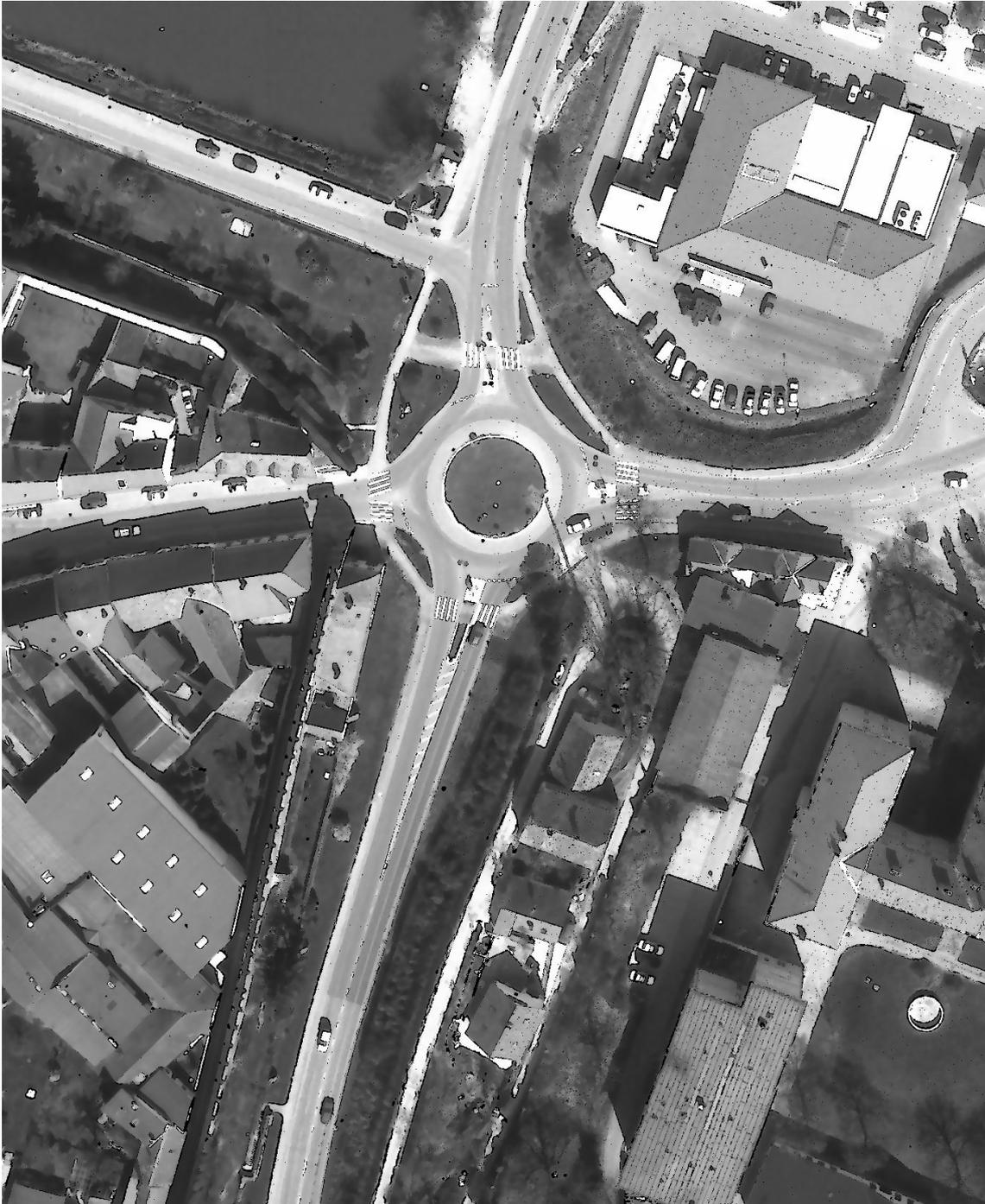
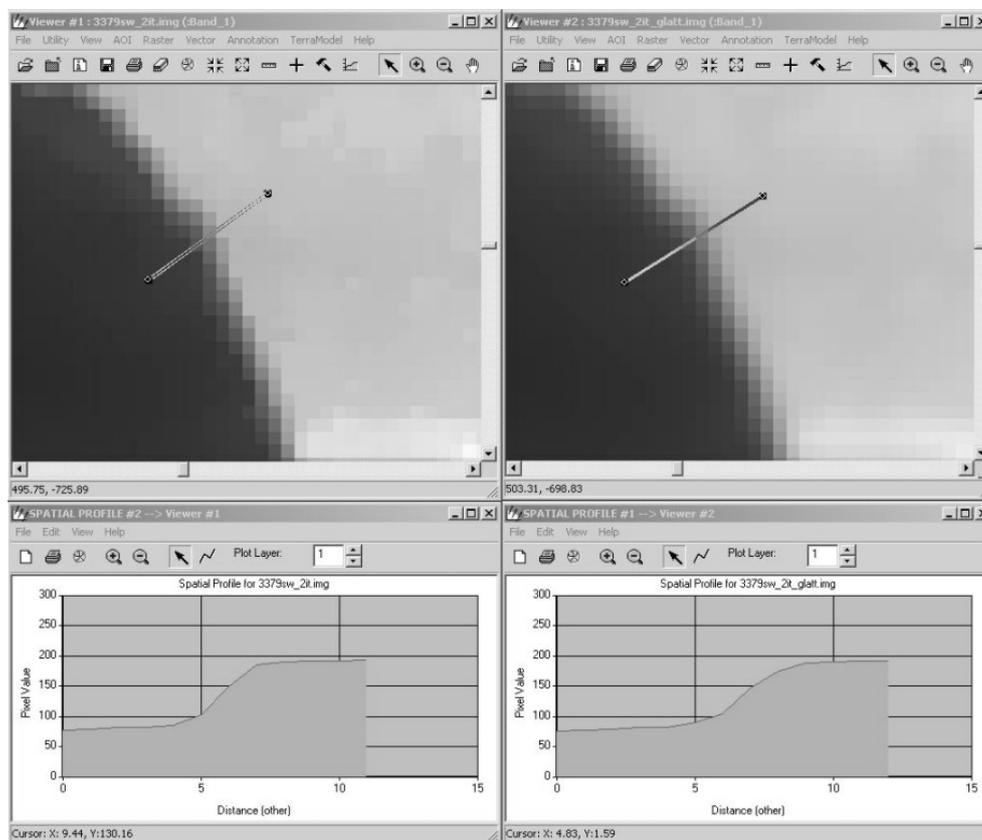


Abbildung 3.1: Betroffene Pixel mit der Bedingung  $\leq 3$

Der Sigma-Filter wird vor der Erzeugung des Energiebildes zweimal angewendet und die Rauschvarianz wird zweimal neu immer mit den selben 3 Stichproben bestimmt.

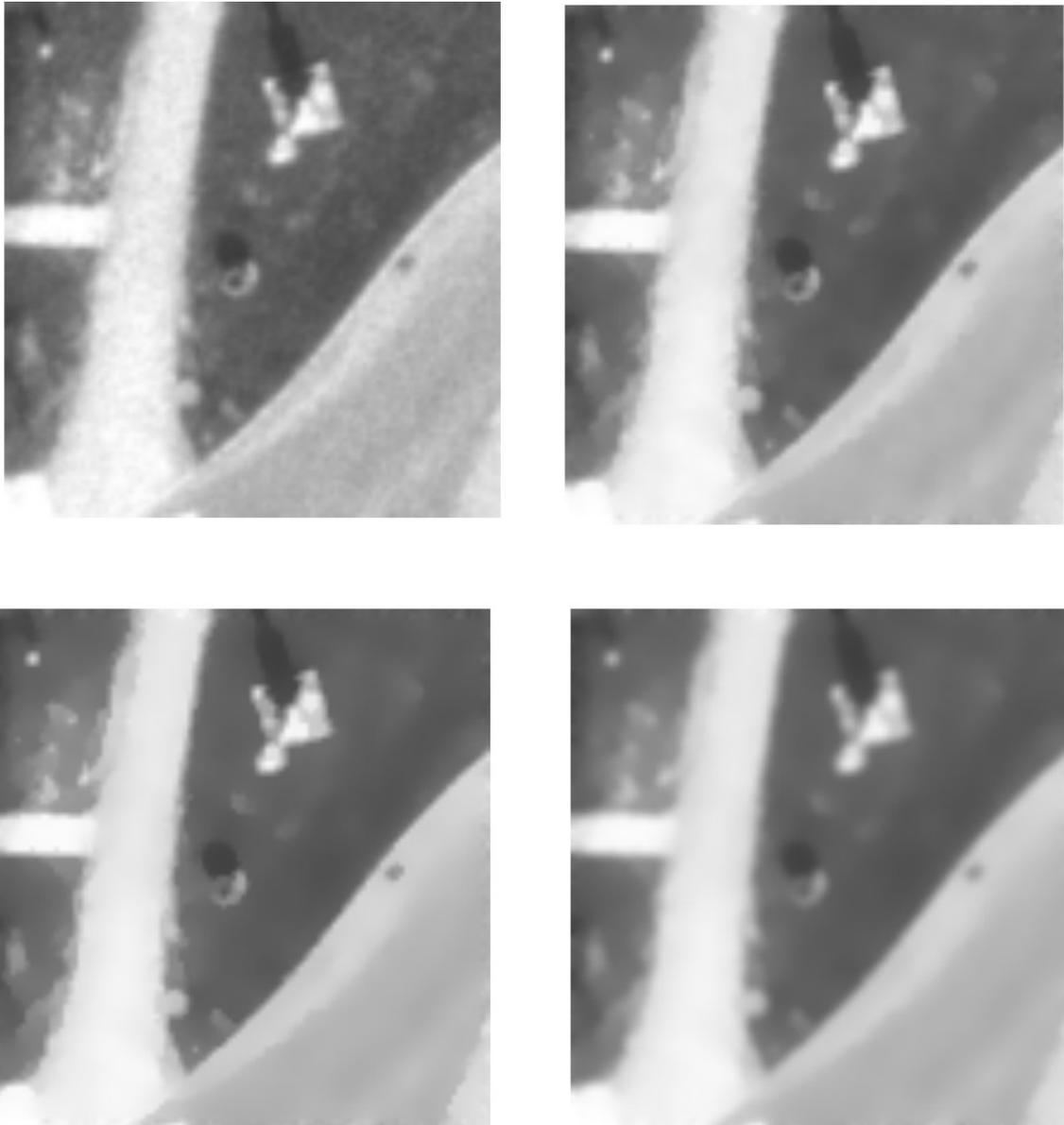
Nach der "Homogenisierung" bekommen die Kanten im Bild eine eher eckige Form (sie haben noch das Rauschen in sich). Damit sie stufige und breite Flanken ohne lokale Störungen bekommen, wird das homogenisierte Bild mit der einfachen 3x3 Gauss-Matrix zusätzlich gefiltert. Dadurch werden die Kanten erstmals abgeschwächt, sie bekommen aber einen kontinuierlichen Anziehungsbereich im Energiebild, was sehr empfohlen wird. Der Zustand einer Kante vor und nach der Gauss-Filterung ist in Abbildung 3.2 gezeigt.



**Abbildung 3.2:** Zustand der Kanten vor (linkes Beispiel) und nach (rechtes Beispiel) der Gauss-Filterung

Beispiele für die einzelnen Etappen (2 Iterationen mit dem Sigma-Filter und 1 Gauss-Filterung) sind in der Abbildung 3.3 zu finden.

Um das gewünschte Energiebild zu bekommen, wird der Roberts Gradient nach der Gauss-Filterung auf das ganze Bild angewandt. Diese Energiebilder, mit und ohne Gauss-Filterung, sind in Abbildung 3.4 zu sehen. Das rechte Energiebild wird für die Snake-Prozessierung verwendet.



*Abbildung 3.3: Sigma/Gauss-Prozessierung*

*ol - Originalbild, or - 1. Iteration mit dem Sigma-Filter  
ul - 2. Iteration mit dem Sigma Filter, ur - Gauss Filterung*

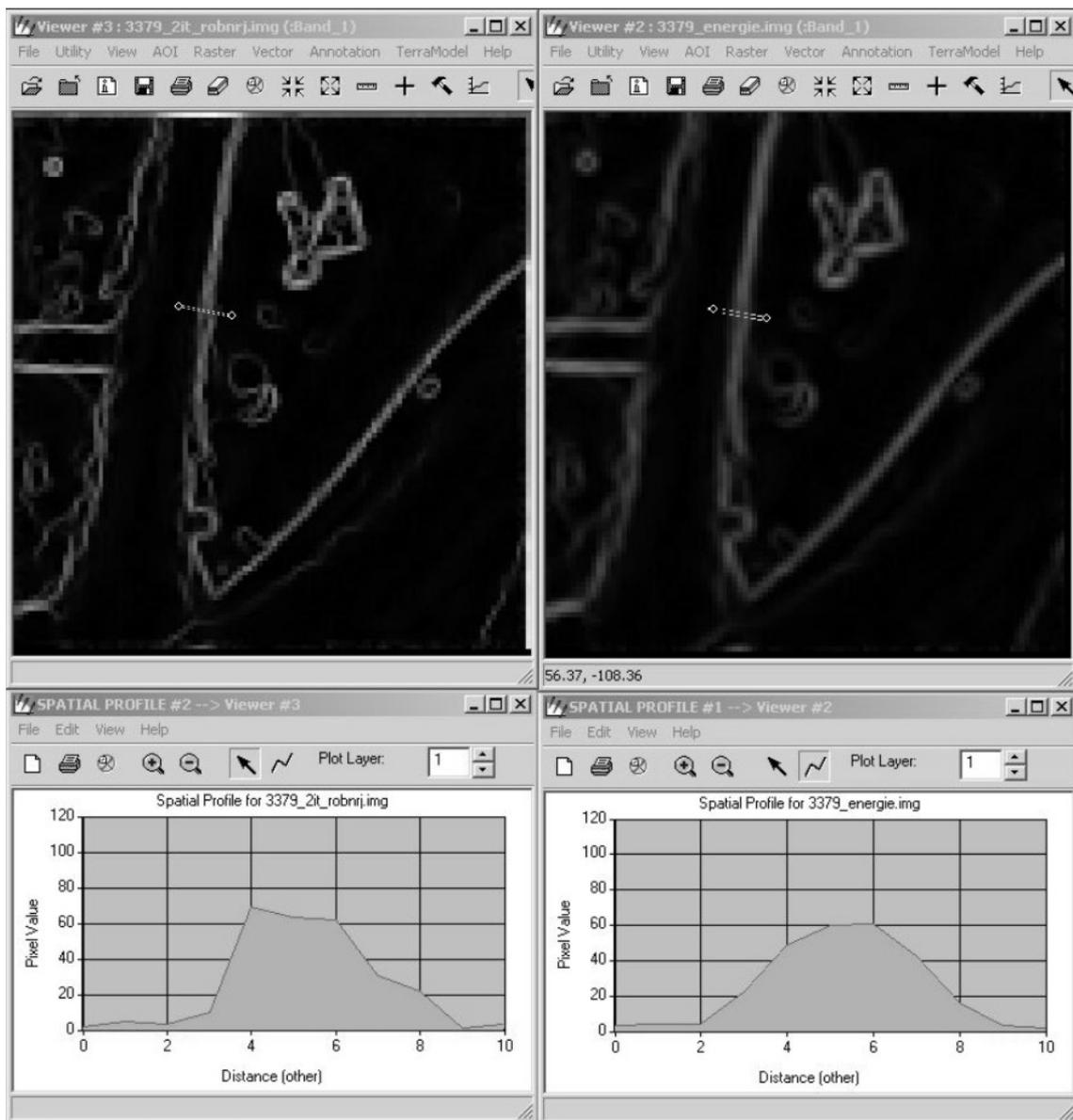


Abbildung 3.4: Das Energiebild und räumliche Profile mit dem Roberts Gradient vor und nach der Gauss-Filterung.

### 3.4 Externe Terme

Die externen Terme müssen nicht unbedingt vorhanden sein. Mit denen kann der Operateur die Entwicklung der Snake steuern. Durch globale Kräfte und Zwänge werden die Snakes dazu gebracht, dass sie sich von bestimmten Punkten angezogen fühlen und von anderen ferngehalten werden. In der Anwendung kann man sich folgendes Szenario vorstellen: Wenn bei der manuellen Digitalisierung der Ausgangspositionen für die Snake einige Punkte sehr genau gemessen werden können und diese Punkte in der Snakes-Optimierung nicht verändert werden sollen, sind mit diesen manuell gemessenen (genauen) Koordinaten externe Terme zu formulieren.

### 3.5 Stereosnakes

In der Photogrammetrie sind wir immer an Stereobildern und an 3D-Koordinaten aus den 2D-Pixelkoordinaten interessiert. Wünschenswert wären Stereo-Snakes, das heißt die internen Terme sollten im dreidimensionalen Raum definiert werden und die photometrischen Terme sollten in den beiden beteiligten Bildern gleichzeitig wirksam sein. Da die Snake-Software<sup>13</sup> - sowohl am I.P.F. als auch an anderen Forschungsstätten - zur Zeit nicht in diesem Zustand ist, wurde eine Kompromisslösung gefunden, um auf die 3D-Koordinaten aus den 2D-Bildkoordinaten von Linien (die mit der Snake-Technik behandelt wurden) kommen zu können. Diese Lösung besteht aus den 4 Schritten:

1. Die Pixelkoordinaten der "Stereo"-Snakes werden in das Programm ORPHEUS<sup>14</sup> als eine Gestalt-Ebene mit der Höhe von - z.B - 250 m importiert.
2. Die Bilder und die Gestalt werden zusammen orientiert.
3. Die Korrespondenzen der "Stereo"-Punkte werden durch räumliche Vorwärtsschnitte bestimmt.
4. Die so gefundenen Folge von Schnittpunkten ist die gesuchte 3D-Snake.

#### 3.5.1 Korrespondenzen aus den beiden 2D-Snakes

Es ist sehr wichtig die Korrespondenz zwischen den "Stereo"-Snakes aufzufinden. Dies wird anhand folgender photogrammetrischer Aufgabe erklärt.

##### *Aufgabenstellung:*

Zwei Strahlenbündel, bestimmt durch ihre Ursprünge ( $O_1$  und  $O_2$ ) und zwei Punktfolgen (Snake 1 und Snake 2) in einer Ebene, sind bekannt. Wenn wir im ersten Strahlenbündel bei einem beliebigen Punkt  $Q_j$  sind, soll das entsprechende ebene Segment im zweiten Strahlenbündel gefunden werden, mit dem sich die durch die Punkte  $O_1$  und  $Q_j$  verlaufende Gerade schneiden könnte.

<sup>13</sup>Die Snake-Software wurde von Dr. M. Kerschner zur Verfügung gestellt

<sup>14</sup>[http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/orient/html\\_hjk/orpheus\\_d.html](http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/orient/html_hjk/orpheus_d.html)

**Aufgabenlösung:**

Diese Aufgabe könnte man mit Kernstrahlen lösen. Die Korrespondenzen zwischen den beiden 2D-Punktfolgen sind in der Gestalt-Ebene parallele Geraden. Es wird - wegen den Möglichkeiten der vorhandenen Software - eine andere Lösung, die in Abbildung 3.5 skizziert ist, gewählt:

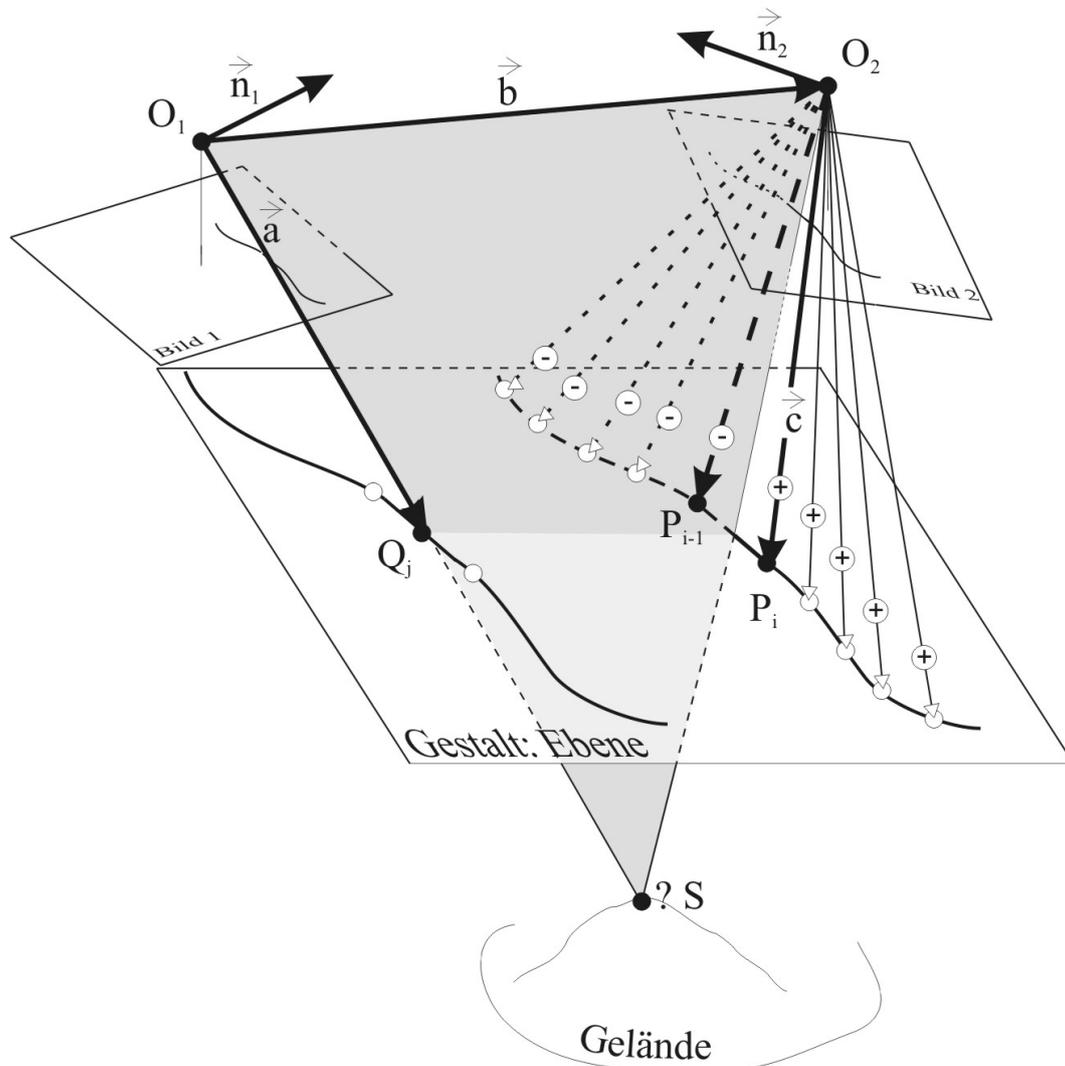


Abbildung 3.5: Suche nach dem zu einem Punkt  $Q_j$  zugehörige Segment  $P_i P_{i-1}$

$O_1, O_2 \dots$  die Ursprünge (Projektionszentren) der Strahlenbündel

$Q_j \dots$  beliebiger Punkt aus der ersten Punktfolge

$P_i, P_{i-1} \dots$  gesuchte Punkte aus der zweiten Punktfolge

$\overrightarrow{O_1 Q_j} = \vec{a} \dots$  Gerade aus dem ersten Strahlenbündel durch den beliebigen Punkt  $Q_j$

$\overrightarrow{O_1 O_2} = \vec{b} \dots$  die Basis der zwei Stereobilder

$\overrightarrow{O_2 P_i} = \vec{c} \dots$  gesuchte Gerade aus dem zweiten Strahlenbündel

Wir suchen das ebene Segment  $O_2 P_i P_{i-1}$  mit dem sich die Gerade durch die Punkte  $O_1$  und  $Q_j$

schneidet. Wir suchen also die Strahlen  $O_2P_i$  und  $O_2P_{i-1}$ .

Die Aufgabe wird mit dem Spatprodukt  $\vec{n}_1 \cdot \vec{c} = (\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c}$  gelöst. Das Spatprodukt verschwindet, wenn die drei Vektoren  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  komplanar sind. Diese Forderung kann nicht direkt genutzt werden. Wir suchen daher nach dem Vektor (bzw. Strahl)  $\vec{c}$ , wo das Spatprodukt einen Vorzeichenwechsel zeigt. Der Schnittvektor (bzw. Schnittstrahl), der uns eigentlich interessiert, liegt dann zwischen den Vektoren  $\vec{O_2P_i}$  und  $\vec{O_2P_{i-1}}$ , die mit dem Kreuzprodukt  $(\vec{a} \times \vec{b})$  ein negatives und ein positives Spatprodukt aufweisen.

Den Normalvektor  $\vec{n}_1$  erhält man:

$$\vec{n}_1 = \vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_2b_3 - a_3b_2 \\ a_3b_1 - a_1b_3 \\ a_1b_2 - b_1a_2 \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

Dann ist das Spatprodukt  $\vec{n}_1 \cdot \vec{c}$ :

$$\vec{n}_1 \cdot \vec{c} = (\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c} = c_1(a_2b_3 - a_3b_2) + c_2(a_3b_1 - a_1b_3) + c_3(a_1b_2 - b_1a_2) \quad (3.14)$$

Das Spatprodukt wird mit  $n_1$  für jeden Strahl aus dem zweiten Bündel bestimmt. Dort wo das Spatprodukt einen Vorzeichenwechsel zeigt, liegt der gesuchte Punkt  $P_i$ . Somit ist das ebene Segment  $O_2P_{i-1}P_i$  bekannt.

### 3.5.2 Schnitt einer Geraden mit einer Ebene

Nachdem alle korrespondierenden Elementen (Strahl aus dem ersten Strahlenbündel und ebene Segment aus dem zweiten Strahlenbündel) gefunden sind, werden mit den dazugehörigen Bildkoordinaten (der zwei Snakes) räumliche Vorwärtsschnitte berechnet. Das Ergebnis ist eine Punktfolge entlang von dreidimensionalen Objektlinien. Diese dreidimensionalen Linien bezeichnen wir als Snake-Linien.

Dies wird mit folgender Aufgabe erläutert.

#### **Aufgabenstellung:**

Gegeben ist die Gerade  $g$  mit dem Punkt  $O_1(X_{O_1}, Y_{O_1}, Z_{O_1})$  und mit dem Richtungsvektor  $\vec{a} = \vec{O_1Q_j}$  und die Ebene  $E$  durch die Punkte  $O_2(X_{O_2}, Y_{O_2}, Z_{O_2}), P_{i-1}(X_{P_{i-1}}, Y_{P_{i-1}}, Z_{P_{i-1}}), P_i(X_{P_i}, Y_{P_i}, Z_{P_i})$ . Gesucht ist der Schnittpunkt  $S$  zwischen der Gerade  $g$  und der Ebene  $E$ .

#### **Aufgabenlösung:**

Die gestellte Aufgabe ist in der Abbildung 3.6 skizziert.

Die mathematischen Formeln 3.15 bis 3.18 findet man in [Bosch, 1998]<sup>15</sup>.

Für  $\vec{O_2P_i} = \vec{c}$  und  $\vec{O_2P_{i-1}} = \vec{d}$  gilt für den Normalvektor der Ebene  $E$ :  $\vec{n}_2 = (\vec{c} \times \vec{d}) = \begin{pmatrix} n_{21} \\ n_{22} \\ n_{23} \end{pmatrix}$ .

Unter der Voraussetzung, dass die Gerade  $g(\vec{O_1S})$  nicht parallel zu der Ebene  $E$  ist, ist der Vorgang wie folgt darzustellen (O ist der Ursprung des Objektkoordinatensystems):

<sup>15</sup>Bosch, K., 1998: Mathematik-Taschenbuch - 5. Auflage, S. 281-282

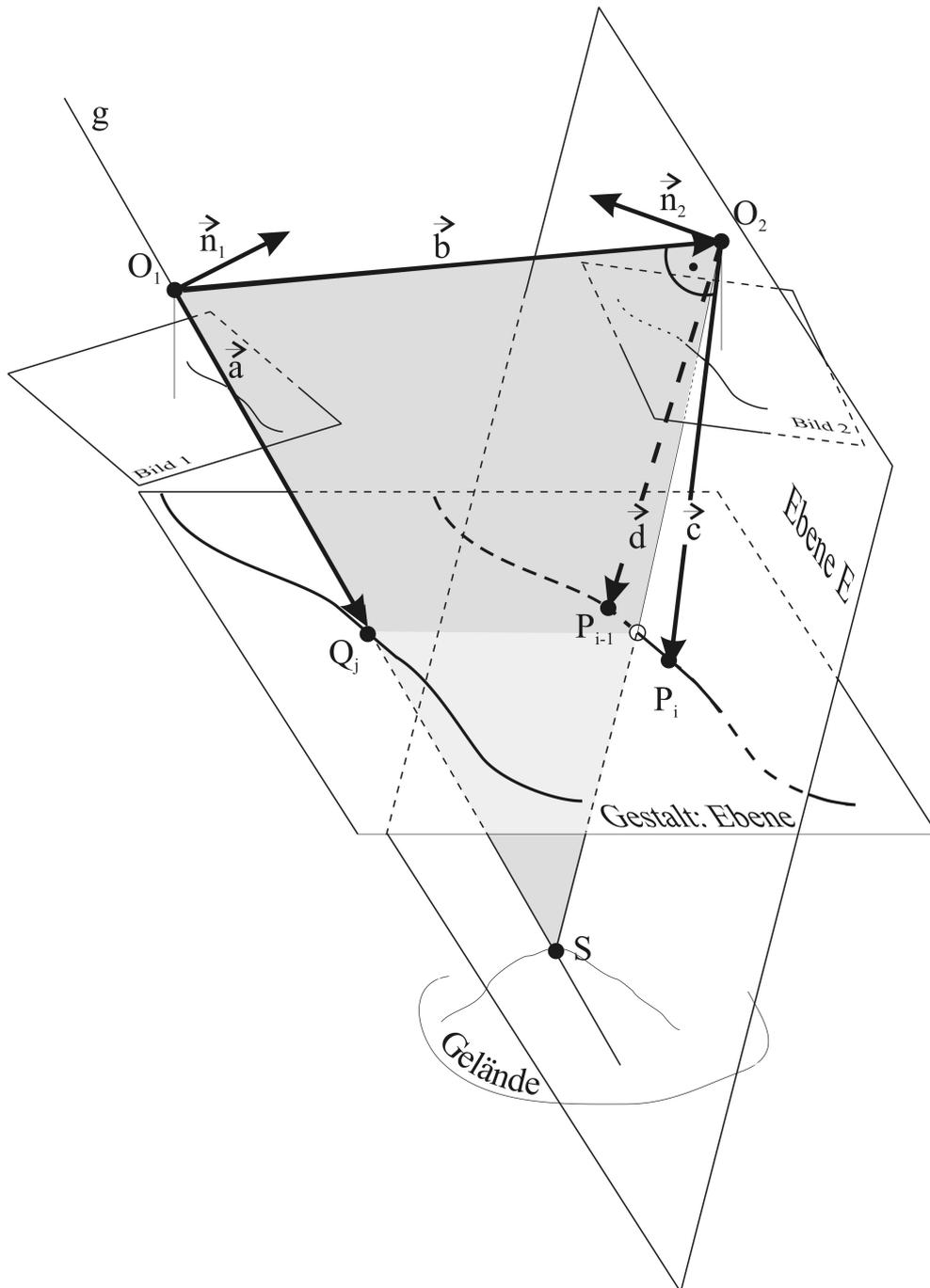


Abbildung 3.6: Bestimmung des Schnittpunktes  $S$  zwischen einer Geraden  $g$  und einer Ebene  $E$

$$\begin{aligned}
\overrightarrow{OS} &= \overrightarrow{OO_1} + \lambda_0 \vec{a} \\
\overrightarrow{SO_2} &= \overrightarrow{OO_2} - \overrightarrow{OS} = \overrightarrow{OO_2} - \overrightarrow{OO_1} - \lambda_0 \vec{a} = \overrightarrow{O_1O_2} - \lambda_0 \vec{a} \\
\vec{n}_2 \perp \overrightarrow{SO_2} &\Rightarrow \vec{n}_2 \cdot (\overrightarrow{O_1O_2} - \lambda_0 \vec{a}) = 0 \\
\vec{n}_2 \cdot \overrightarrow{O_1O_2} - \lambda_0 \vec{n}_2 \cdot \vec{a} &= 0
\end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\lambda_0 = \frac{\vec{n}_2 \cdot \overrightarrow{O_1O_2}}{\vec{n}_2 \cdot \vec{a}} = \frac{n_{21}b_1 + n_{22}b_2 + n_{23}b_3}{n_{21}a_1 + n_{22}a_2 + n_{23}a_3} \tag{3.16}$$

Damit ist der **Schnittpunkt S** bestimmt

$$\overrightarrow{OS} = \overrightarrow{OO_1} + \lambda_0 \vec{a} \tag{3.17}$$

Die Koordinaten des Schnittpunktes sind:

$$\begin{aligned}
X_S &= X_{O_1} + \lambda_0 a_1 \\
Y_S &= Y_{O_1} + \lambda_0 a_2 \\
Z_S &= Z_{O_1} + \lambda_0 a_3
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Dieser Vorgang wird für jedes Paar von Snakes durchgeführt.

### 3.6 Genauigkeit der halbautomatischen Linienmessung

Die Snakes sollen ein robustes Verfahren zur Linienextraktion sein. Sie liefern aber sehr oft unterschiedliche Resultate oder m.a.W. Linien, die sich mit der Zielkurve nicht vollständig überdecken und an unterschiedlichen Stellen (bei Wiederholungsmessungen) Abweichungen von der Zielkurve aufweisen. Die Größe und die Häufigkeit dieser Abweichungen ist von den Messbedingungen (die Definition der Linie im Bild, die Qualität des Bildes selbst, die Strategie der Energiebilderzeugung, das mathematische Model der Energiefunktion) und von den Messwerten (Näherungspositionen der Zielkurve) abhängig.

Wie sich diese Abweichungen auf die Objektkoordinaten auswirken, sehen wir an der relativen und absoluten Genauigkeit der Snakes. Der relativen Genauigkeit werden die zufälligen Abweichungen der Snake-Linien von einer Referenz, die mit anderen photogrammetrischen Verfahren entstanden ist, und der absoluten Genauigkeit die zufälligen Abweichungen der Snake-Linien von einer Referenz, die mit nicht-photogrammetrischen Methoden entstanden ist, ermittelt.

Bei möglichst konstanten Messbedingungen ist man bestrebt auch die Wiederholungsmöglichkeit der Snakes-Linien abhängig von den unterschiedlichen Startwerten zu untersuchen.

Wenn genug Zahlenmaterial mit dieser halbautomatischen Methode gewonnen ist, können wir die Strategie zur Analyse auch auf die Theorie aus den Abschnitten 2.3, 2.4 und 2.5 aufbauen. Die dort vorgestellten Konzepte, die für manuellen linienweisen Messungen gedacht sind, müssen allerdings etwas ergänzt werden.

Die Wiederholungsgenauigkeit, die hier noch Reproduzierbarkeit der Snakes genannt wird, lässt sich am besten in der Bildebene untersuchen. Dafür wird das Konzept für die relative Genauigkeit der manuellen Linien an den Problemstellungen der Snakes angepasst. Die erste Änderung ist, dass die Formeln 2.10 bis 2.24 nur auf die Bildkoordinaten  $(\xi, \eta)$  bezogen werden, sie werden also auf der 2D-Ebene ausgelegt.

Wenn man eine Reproduzierbarkeit untersucht, hat man mit einer Reihe von Messungen zu tun, die zum größten Teil übereinstimmen. Das heißt, dass man bei der Grobfehlersuche in der Distanzenmatrix mit sehr vielen Nullen als "Distanzen" zwischen Punkt und zugehörigem Segment rechnen muss, wenn der untersuchte Punkt aus dem ersten Strahlenbündel mit einem der beiden Punkte aus dem Ebenen-Segment vom zweiten Strahlenbündel übereinstimmt (man denke an Abbildung 3.6). Diese Situationen treten ein, wenn in der Bedingung  $0 \leq \lambda_0 \leq 1$  (Seite 14)  $\lambda_0$  gleich 0 oder 1 ist. Das Problem, das bei der Grobfehlersuche vorkommt, ist die Bestimmung der Schranke  $3\sigma^{\text{Linie}}$  aus 2.24. Wenn die Nullen in der Distanzenmatrix (Verbesserungsmatrix) über 20 %<sup>16</sup> sind, dann bekommt man einen zu optimistischen Wert für diese Schranke. Manchmal ergibt sich sogar eine Standardabweichung der Messungen von Null.

Die notwendige Änderung ist, dass man die Nullen bei der Bestimmung von  $3\sigma^{\text{Linie}}$  nicht heranzieht, und die Grobfehlersuche nur mit den von Null verschiedenen Verbesserungen durchführt. Diese Schranke lässt normalerweise eine Variation zwischen 2 und  $3\sigma^{\text{Linie}}$  zu. Da die Nullen nicht berücksichtigt werden, wurde sie auf 2.5 gesetzt.

Für die Bestimmung der Reproduzierbarkeit einer Snake-Linie nach 2.21 und 2.22 wurden alle nach der Ausreißerelimination übriggebliebenen Verbesserungen samt Nullen herangezogen. Die Einheiten der Resultate sind *Teile der Pixelgröße*, da wir mit Pixelkoordinaten arbeiten. Weiters wird ein repräsentativer Wert für alle ausgewerteten Linien nach 2.23 bestimmt.

Um die relative und absolute Genauigkeit der Snake-Linien zu ermitteln, wurde die Strategie für die absolute Genauigkeit der manuellen linienweisen Auswertungen aus dem Abschnitt 2.5 verwendet, weil in beiden Fällen Bezugslinien ("fehlerfreie" Referenzen) vorliegen sollen. Eventuelle einseitige systematische Effekte werden bei der Berechnung der Genauigkeiten eliminiert. Die Einheiten der Resultate sind in  $[m]$  am Objekt.

Die Vergleichsmessungen für die relative Genauigkeit der Snake-Linien am Objekt können manuelle digitale Messungen (siehe 4.2) sein. Für jede Linie, die sowohl manuell als auch mit Snakes ausgewertet ist, soll eine Mittellinie durch Splines (mit dem Programm ORIENT<sup>17</sup> aus den manuellen Wiederholungsmessungen (mit digitaler Auswertestation gewonnen) generiert werden. Jede Mittellinie wird also als Referenzinformation für die Ermittlung der relativen Genauigkeit der Snake-Linien verwendet.

Die Referenzinformationen für die absolute Genauigkeit können z.B. terrestrisch gewonnenen Daten sein.

---

<sup>16</sup>Die Prozente ergeben sich aus der Normalverteilung. In einer sehr kleinen Umgebung von  $0\sigma$  liegen 20 % der Werte.

<sup>17</sup>ORIENT ([http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/orient/html\\_hjk/orient.html](http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/orient/html_hjk/orient.html)) ist mit dem Programm ORPHEUS verknüpft.

## Kapitel 4

# Vorbereitung des Zahlenmaterials

Für die statistischen Schätzungen entsprechend den vorigen zwei Kapiteln ist ein umfangreiches Zahlenmaterial zu beschaffen. Es wurden Wiederholungsmessungen mit *manuellen* (3D-Koordinaten direkt aus der digitalen Auswertestation) und *halbautomatischen* (3D-Koordinaten über Linienextraktion durch Snakes) *Auswertemethoden* unternommen.

Um die vorgeschlagenen Analysekonzepte in den Abschnitten 2.2, 2.4, 2.5 und 3.6 auf die ermittelten 3D-Koordinaten anwenden zu können, wurde eine "Analyse"-Software speziell - in IDL-Umgebung<sup>1</sup> - angefertigt.

Die Resultate werden im Kapitel 5 gezeigt und kommentiert und im Kapitel 6 analysiert. Es werden Antworten auf wichtige Fragen gegeben.

In diesem Kapitel werden wir uns auf die Vorbereitung des Zahlenmaterials konzentrieren.

Es wurden zwei *Messkategorien* vorgesehen - Punkte und Linien - und zwei *Messungsarten* - manuell und halbautomatisch. Um auf das Messverhalten der digitalen Photogrammetrie schließen zu können, wurde versucht, Auswertungen aus unterschiedlichen *Punkt-* und *Linienarten* vorzunehmen.

Mit der *manuellen Methode* wurden 3 unterschiedliche *Punktarten* untersucht:

- Markierungen auf Straßen und Sportplätzen
- Hausecken
- Dachfirste

und die 3 *Linienarten*:

- im ebenen Gelände
- Gehsteigkanten
- Dachfirste

Mit der *halbautomatischen Snake-Methode* wurden nur die 2 Linienarten - *ebenes Gelände* und *Gehsteigkanten* - untersucht. Von der Art "ebenes Gelände" wurden viele Linien generiert.

---

<sup>1</sup><http://www.rsinc.com/idl/>, IDL Online Help

## 4.1 Bildmaterial

Die Durchführung von digitalen photogrammetrischen Auswertungen beginnt mit der Auswahl und der Vorbereitung des (digitalen) Bildmaterials. Da wir die Genauigkeit der digitalen Photogrammetrie in Abhängigkeit von unterschiedlichen Faktoren (Flughöhe, Bildmaßstab, Pixelgröße, Filmtyp, etc.) erforschen wollen, brauchen wir eine Gegend in der im Laufe der Jahre mehrere Befliegungen unternommen wurden, sodass es eine Auswahl an Luftbildmaterial gibt. Als solche bietet sich die Gemeinde Eggenburg an, da das I.P.F. dort die jährlichen Feldübungen mit Studierenden veranstaltet.

Fünf Blöcke aus unterschiedlichen Jahren (Tabelle 4.1) in diesem Gebiet wurden ausgesucht. Die Luftbildverbände wurden mit digitalen Methoden zu bearbeiten. Der erste Block besteht aus einem Streifen mit zwei Farbbildern im Maßstab 1:15000, die mit einem Digitalisierungsintervall von  $20\ \mu\text{m}$  gescannt wurden. Der zweite Block besteht auch aus einem Streifen, aber mit vier Schwarzweißbildern im Maßstab 1:6000 und einer Pixelgröße von  $15\ \mu\text{m}$ . Der dritte Block besteht aus drei Streifen, insgesamt gab es 23 Farbbilder im Bildmaßstab 1:4000 und  $30\ \mu\text{m}$  Pixelgröße. Für den vierten Block wurden Schwarzweißbilder aus den Farbbildern des dritten Blockes nach der Formel 4.1 abgeleitet:

$$SW = 0.3R + 0.6G + 0.1B \quad (4.1)$$

Mit der SW-Umwandlung soll bezweckt werden, etwaige Unterschiede beim Stereomessen (manuelle Auswertung) in Farbe und Schwarzweiß festzustellen.

Vier Farbbilder aus dem dritten Block wurden mit einem anderen Digitalisierungsintervall ( $15\ \mu\text{m}$ ) gescannt und als fünfter Block verwendet.

Die unterschiedlichen Digitalisierungsintervalle ( $20, 15, 30\ \mu\text{m}$ ) sollen den Bezug der Messgenauigkeit in digitalen Bildern zur Pixelgröße herstellen und eventuelle sinnvolle Grenzen für die Pixelgröße festlegen.

Mit den drei unterschiedlichen Bildmaßstäben (15000, 6000, 4000) soll der Einfluss der Flughöhe auf die Objekterkennung und die Objektgenauigkeit in digitalen Bildern bestimmt werden.

Die Details zu den Blöcken - auch die mittlere Basis  $b$  im Bild - sind in der Tabelle 4.1 zusammengestellt.

	Jahr	Bildformat, [cm <sup>2</sup> ]	Kamera	Kamera-konstante	Bildmaßstab	Höhe (ÜG)	Basis	Basis im Bild	Pixelgröße	Filmtyp	Ausw.
Block 1	2001	23x23	RC20	21 cm	1:15000	3150	1236	8.2 cm	$20\ \mu\text{m}$	RGB	10
Block 2	1994	23x23	LMK	21 cm	1:6000	1260	532	8.9 cm	$15\ \mu\text{m}$	SW	12
Block 3	1999	23x23	LMK	15 cm	1:4000	600	322	8.1 cm	$30\ \mu\text{m}$	RGB	12
Block 4	1999	23x23	LMK	15 cm	1:4000	600	322	8.1 cm	$30\ \mu\text{m}$	SW	10
Block 5	1999	23x23	LMK	15 cm	1:4000	600	322	8.1 cm	$15\ \mu\text{m}$	RGB	10

*Tabelle 4.1: Parameter der untersuchten Blöcke*

Die Basis im Bild variiert zwischen 8.1 und 8.9 cm, was etwa einer Längsüberdeckung von 60 % entspricht. Bei konstantem Basis/Höhenverhältnis sind die mittleren Fehler in der analytischen Photogrammetrie direkt proportional zur Bildmaßstabszahl.

Die Querüberdeckung (sehr wichtig für die automatische Linienextraktion) ist etwa 30 %.

Bewegungskompensation während des Fluges wurde nur im Block 1 (Maßstab 1:15000) vorgenommen. Sie ist besonders bei den tieferen Höhen sehr wichtig.

## 4.2 Die manuellen Auswertungen

Alle vorgestellten Bilderverbände wurden für die Zwecke der manuellen digitalen Auswertung durch Bündelblockausgleichung mit dem Programm MATCH-AT orientiert.

Das von den Testblöcken überdeckte Gebiet wurde mehrmals manuell ausgewertet. Die Anzahl dieser Auswertungen ist in der letzten Spalte der Tabelle 4.1 festgehalten.

Die Auswertungen selbst wurden mit der digitalen Auswertestation SummitEvolution<sup>2</sup> zusammen mit AutoCAD ausgeführt.

Bei der Durchführung der Auswertungen wurde darauf geachtet, dass:

- die Linien im Bild gut definiert sind (wir wollen die möglichst beste Genauigkeit wissen)
- die Linien etwa normal zur Flugrichtung liegen, da sie in der Flugrichtung sehr schlecht einstellbar sind.
- eine Linie immer ein Objekt beschreibt, damit es keine Schwierigkeiten mit der Identifikation der Linien gibt
- keine Doppelpunkte in den Linien existieren
- die jeweilige Linie immer denselben Anfangspunkt hat, falls sie geschlossen ist, weil sonst Schwierigkeiten im Überlappungsbereich der Linien auftauchen
- identische Linien jedes Mal möglichst gleich ausgewertet werden, da es sich nicht um die Variation der Interpretierbarkeit der Linien handelt, sondern um die Genauigkeit des Einstellungsvermögens in der digitalen Photogrammetrie
- die Punkte bei den Punktauswertungen als End- und Eckpunkte an gut definierten Linien ausgewählt werden.

Nachdem alle Auswertungen vorliegen, werden die einzelnen Linien (Objekte) manuell identifiziert. Identifizieren heißt, dass an jede Linie ein Attribut, bestehend aus einer/ihrer Nummer aus einer Objektliste angehängt wird. Die Nummern sollen später eine Zugehörigkeit der Koordinaten zum jeweiligen Objekt erlauben. Die so erhaltenen erweiterten \*.dwg Files werden als \*.dxf abgespeichert. Linien, die in allen Modellen gut ausgeprägt waren und ausgewertet wurden, sind mit derselben Nummerierung in allen XYZ-Dateien gekennzeichnet.

Anschließend - in IDL-Umgebung- folgt eine Konvertierung der \*.dxf Files samt Attributen in ASCII XYZ-Dateien. Geschlossene Linien werden aufgebrochen und der Anfangs-/ Endpunkt wird nur einmal verwendet. Die neuen Dateien haben folgende Struktur:

---

<sup>2</sup><http://www.datem.com/products/evolution.html>

Nummer der Linie	X	Y	Z
09	-37792.734	5389794.602	307.704
09	-37791.938	5389795.019	307.724
10	-37796.801	5389633.507	317.091
10	-37797.523	5389636.137	317.092
10	-37794.750	5389637.018	317.092
10	-37794.043	5389634.261	317.092
11	-37642.363	5389563.421	324.674
11	-37633.539	5389560.151	324.674
11	-37631.910	5389564.691	324.674

*Tabelle 4.2: Auszug aus einer Koordinatendatei*

Bei  $n$  Auswertungen<sup>3</sup> der ausgewählten Situation, stehen  $n$  Files mit der in Tabelle 4.2 gezeigten Struktur zur Verfügung. Diese Files sollen die maßgebenden Messreihen für die eigentliche Untersuchung der Genauigkeit der manuellen Auswertung in der digitalen Photogrammetrie liefern. Sie sind der Input für die "Analyse"-Software.

### 4.3 Die halbautomatische Linien-Extraktion

Da sich Block 3 und Block 4 (Tabelle 4.1) nur im Filmtyp (Farbe/SW) unterscheiden und da die SW-Umwandlung mit der Formel 4.1 aus dem RGB-Bild ein Teil der Energiebilderzeugung ist, wird Modell 4 ausgelassen. Mit den Methoden der Snakes wurden also alle RGB-Verbände bearbeitet. Der Arbeitsablauf bestand aus folgenden Schritten:

1. SW-Umwandlung der RGB-Bilder nach Formel 4.1. Die Schwarzweißbilder sind die Grundlage für die Energiebilderzeugung.
2. Energiebilderzeugung mit der vorgestellten Strategie (Abschnitt 3.3.3).
  - a) Bestimmung der Rauschvarianz mit dem Roberts Gradient aus den SW-Bildern
  - b) 1. Iteration mit dem Sigma-Filter
  - c) 2. Iteration mit dem Sigma-Filter
  - d) Gauss-Filterung
  - e) Energiebild aus dem Roberts Gradient
3. Linienextraktion mit der Snake-Software in jedem Bild der Bildpaare aus den 4 Blöcken. Jede Linie in jedem Block wurde 10-mal extrahiert. Es wurden immer gut definierte Kanten (Linien) im Bild gesucht, bei denen über 90% Übereinstimmung mit der Zielkurve erreicht wird.
4. Berechnung der 3D-Koordinaten der Snake-Linien aus Vorwärtsschnitte (siehe Abschnitt 3.5 vorgestellt).
5. Vorbereitung (in IDL-Umgebung) aller benötigten Koordinatenfiles<sup>4</sup> mit der "Analyse"-Software. Diese 10 Files bilden die Messreihe für die Untersuchung der Genauigkeit der halbautomatischen Methode.

<sup>3</sup>Diese Anzahl ist in der letzten Spalte der Tabelle 4.1 zu sehen.

<sup>4</sup>Die Filestruktur ist wie in der Tabelle 4.2 gezeigt.

Zum Punkt 3 (Linienextraktion) müssen noch einige Steuerparameter der Software, die eingestellt werden können, erwähnt werden:

Die Energiefunktion bei der Linienextraktion mit der Snake-Software wurde wie folgt formuliert:

$$E_{snake} = E_{int} + E_{pho} = \frac{1}{2} (\beta(s)E_{curv}) + E_{pho} \quad (4.2)$$

,wobei  $\beta(s) = 1$  ist.

In der internen Energie wurde der "continuity" Term weggelassen, da er für das Schrumpfen der Snake verantwortlich ist, und da er zur Glattheit der Snake nichts beiträgt.

Wegen des Schrumpfens wurden die Anfangs- und Endpunkte fixiert. (Diese Lösung stellt etwas höhere Anforderungen an die Ausgangsposition der Snake.)

Es wurden keine externen Kräfte und Zwänge ausgeübt.

Der "a-priori" Abstand zwischen den Knoten der Snake wurde auf 9 Pixel gesetzt. Mit 9 Pixel Abstand bekommt die Punktkette eine verhältnismäßig glatte Form, weil die Spannung zwischen den einzelnen Knoten etwas nachlässt. Dasselbe sollte im Prinzip auch mit Verringerung des Gewichtes der internen Kräfte funktionieren.

#### 4.4 Terrestrische Messungen als Referenzinformationen

Um auch absolute Genauigkeiten für die manuellen/halbautomatischen Auswertungen zu bekommen, wurden im Gelände einige von den digital behandelten Objekten terrestrisch gemessen. Es wurden hauptsächlich nur Linien terrestrisch bestimmt, da die verwendeten Punkte nicht mehr zu identifizieren waren. Es wurde versucht, möglichst viele Linien zu messen. Leider wurde auch hier festgestellt, dass sich viele Situationen mit der Zeit verändert haben. Es konnten nur acht Linien (vor allem an Gehsteigkanten) erkannt werden. Es wurden keine Einzelpunkte gemessen.

Unsere Linien mussten also im Landeskoordinatensystem bestimmt werden. Dazu wurden von sechs Punkten GPS-Messungen durchgeführt. Es wurde jeweils 30 Minuten gemessen. Um die mit GPS im WGS84 bestimmten Punkte ins Landeskoordinatensystem transformieren zu können, mussten einige Referenzpunkte aus dem Österreichischen Landesvermessungsnetz ausgewählt werden. Mit diesen Referenzpunkten und noch einem weiteren (ein Referenzpunkt mit einem permanent registrierendem GPS-Empfänger) wurden mit weiteren GPS-Messungen Basislinien bestimmt, aus denen die Parameter der Transformation berechnet werden können. Für die gemessenen GPS-Punkte erhielt man auch Basislinien. Anschließend erfolgte die Transformation der GPS-Punkte. Die eigentliche Vermessung der Linien geschah mit dem Tachymeter Leica TC 1600. Es wurde ein weiteres Vermessungsnetz aus Tachymeter-Standpunkten ausgewählt, um die Linien-Messungen durchzuführen. Die Messungen wurden zu den GPS-Punkten orientiert und somit im Landeskoordinatensystem berechnet.

Demnach wurden Vergleichsmessungen nur für die linienweisen Auswertungen beschafft. Die Punktmessungen konnten nur relativ bewertet werden, da keine terrestrische Punktmessung vorgenommen wurden.

## Kapitel 5

# Empirische Genauigkeiten

Im Kapitel 2 wurden Strategien für die Schätzung der relativen und absoluten Genauigkeit von manuellen digitalen Auswertungen ausgearbeitet und im Kapitel 3 wurden sie auf die halbautomatische Methode der Snakes erweitert. Im Kapitel 4 wurde die Vorbereitung für das gewünschte Zahlenmaterial präsentiert. Die Konzepte wurden anhand dieses umfangreichen Zahlenmaterials erprobt und die Resultate davon (relative und absolute Genauigkeit manueller punktwiser und linienwiser und halbautomatischer linienwiser Auswertungen) sind in diesem Kapitel zusammengestellt. Einige Fakten werden genannt und kommentiert.

Wir beginnen zuerst mit den Ergebnissen aus der Punktanalyse.

### 5.1 Relative Punktgenauigkeit im Objektkoordinatensystem

Die mittleren relativen Koordinatenfehler  $\sigma_{rel}^{nP}$  der Punktmessungen nach Formel 2.5 sind in den letzten Zeilen der Tabellen (1 Tabelle = 1 Punktart) im Anhang B.1 zu sehen. Sie sind in der Tabelle 5.1 zeilenweise zusammengefasst.

Im Anhang B.1 sind die Abweichungen der einzelnen Punkte, sowohl die Anzahl der nach der Ausreißerelimination übrig gebliebenen Beobachtungen, als auch die Anzahl der Unbekannten im Datensatz zu finden.

Tabelle 5.2 zeigt noch die zeitliche Entwicklung der Arbeiten und erklärt einige unerwartete Zahlen, die von der Unerfahrenheit des Operateurs herrühren.

	Block 1 1:15000,RGB, 20µm, 21cm B/Z=1/2.55			Block 2 1:6000,SW, 15µm, 21cm B/Z=1/2.37			Block 3 1:4000,RGB, 30µm, 15cm B/Z=1/1.86			Block 4 1:4000,SW, 30µm, 15cm B/Z=1/1.86			Block 5 1:4000,RGB, 15µm, 15cm B/Z=1/1.86		
	$\sigma_{rel,X}^{nP}$ [m]	$\sigma_{rel,Y}^{nP}$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^{nP}$ [m]	$\sigma_{rel,X}^{nP}$ [m]	$\sigma_{rel,Y}^{nP}$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^{nP}$ [m]	$\sigma_{rel,X}^{nP}$ [m]	$\sigma_{rel,Y}^{nP}$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^{nP}$ [m]	$\sigma_{rel,X}^{nP}$ [m]	$\sigma_{rel,Y}^{nP}$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^{nP}$ [m]	$\sigma_{rel,X}^{nP}$ [m]	$\sigma_{rel,Y}^{nP}$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^{nP}$ [m]
M				0.046	0.046	0.134	0.032	0.036	0.121	0.022	0.023	0.072	0.018	0.021	0.064
H	0.086	0.128	0.346	0.044	0.048	0.132	0.040	0.049	0.096	0.024	0.034	0.064	0.030	0.043	0.092
F	0.083	0.131	0.371	0.031	0.030	0.157	0.060	0.060	0.137	0.048	0.060	0.139	0.024	0.027	0.095
$\sigma_{rel}^{nP}$	0.085	0.130	0.359	0.041	0.042	0.141	0.046	0.049	0.119	0.033	0.042	0.098	0.024	0.032	0.085
	0.109	0.359		0.041	0.141		0.047	0.119		0.038	0.098		0.028	0.085	

**Tabelle 5.1:** Relative Objektgenauigkeit  $\sigma_{rel}^{nP}$  natürlicher Punkte in [m] am Objekt

Nov., Dez. 03'	Dez., Jan. 03'/04'	Jan., Feb. 04'	Feb., März. 04'	Jul., Aug. 04'	Sep. 04'	Okt. 04'
----------------	--------------------	----------------	-----------------	----------------	----------	----------

**Tabelle 5.2:** Farbskala der Arbeitszeiten

Kommentare:

- a) Die Erfahrung der Operateurin kann eine Genauigkeitssteigerung von 34 % in der Lagegenauigkeit und 38 % in der Höhengenaugigkeit ergeben. (Die Prozentsätze ergeben sich aus dem Vergleich von Block 3 und Block 4 für die Markierungen und Hausecken. Diese Blöcke wurden am Anfang und relativ am Ende ausgewertet. Beide Bilder haben dieselbe Bildqualität.)
- b) Die Y-Koordinaten sind in der Tabelle 5.1 generell schlechter als die X-Koordinaten. Da sich die Lagefehler mehr oder weniger radial von der Modellmitte vergrößern und da die Y-Ausdehnung größer ist als die X-Ausdehnung, sind auch die Y-Koordinaten ungenauer<sup>1</sup>.
- c) Die Höhengenaugigkeit in den Blöcken 1 und 2 ist um das 3.4-fache schlechter als die Lagegenauigkeit, in den Blöcken 3, 4 und 5 um das 2.7-fache. Nach Formeln 2.36 sollte dieser Unterschied dem Basis/Höhenverhältnis entsprechen. In der Tendenz spiegelt sich das unterschiedliche Basis/Höhenverhältnis wider, aber insgesamt ist der Genauigkeitsunterschied deutlich größer als das Basis/Höhenverhältnis. Das verdanken wir in hohem Maß der Unerfahrenheit der Operateurin beim Stereomessen
- d) Farbbilder haben überraschenderweise gegenüber Schwarzweißbildern eine um 10 % schlechtere Lagegenauigkeit und nur eine um 1 % bessere Höhengenaugigkeit. (Diese Prozentsätze ergeben sich aus dem Vergleich der Blöcke 3 und 4 für Firstpunkte.) Im Prinzip sollte Block 4 schlechter bzw. gleich Block 3 sein. Dagegen wirkt die mangelnde Erfahrung des Operateurs am Anfang in diesen Blöcken aus.
- e) Hausecken haben gegenüber Punkten an Markierungen eine schlechtere Lagegenauigkeit (33 %) und eine nahezu gleiche Höhengenaugigkeit (1 %). (Diese Prozentsätze ergeben sich aus dem Vergleich der Blöcke 2, 3, 4 und 5.)

<sup>1</sup>Kraus, K., 1996: Photogrammetrie - Band 2, 3. Auflage, S. 137

- f) Firstpunkte haben gegenüber den Markierungen eine schlechtere Lagegenauigkeit (13 %) und eine schlechtere Höhengenaugigkeit (27 %). (Leider wurden in keinem Block diese beiden Typen zur gleichen Zeit ausgewertet. Die Prozentsätze wurden trotzdem aus dem Vergleich der Blöcke 2, 3, 4 und 5 ermittelt.)
- g) Hausecken haben gegenüber Punkten auf Dachfirsten eine geringfügig bessere Lagegenauigkeit (2 %) und eine bessere Höhengenaugigkeit (22 %). (Diese Prozentsätze ergeben sich aus dem Vergleich der Blöcke 1, 2, 3, 4 und 5.)
- h) Aus dem Anhang B.1: Bei der durchgeführten Fehlersuche wurde nur eine einzige Koordinate als Ausreißer festgestellt, es ist die Y-Koordinate eines Punktes im Block 3. Das besagt, dass die Punktmessungen sehr gut der Normalverteilung folgen.

## 5.2 Relative Liniengenauigkeit im Objektkoordinatensystem

Die mittleren relativen Koordinatenfehler der Linienmessungen nach Formel 2.23 sind in der Tabelle 5.3 angegeben. Die Werte in dieser Tabelle entsprechen den Werten aus den letzten Zeilen der Tabellen im Anhang C.1. Die Tabellen im Anhang zeigen die einzelnen Blöcke nach Linienarten. Die sich dort befindlichen letzten Zeilen sind in der nächsten Tabelle nach Linienarten (zeilenweise) und nach Blöcken (spaltenweise) zusammengefasst.

Im Anhang C.1 sind noch die Abweichungen der einzelnen Linien und die Anzahl der nach der Ausreißerelimination übrig gebliebenen Abweichungen für jede Linie (sowohl für XY als auch für Z) angegeben. Die Anzahl der Abweichungen, die eliminiert wurden, ist auch angezeigt.

Tabelle 5.4 zeigt noch die zeitliche Entwicklung der Arbeiten.

	Block 1 1:15000,RGB, 20µm, 21cm B/Z=1/2.55			Block 2 1:6000,SW, 15µm, 21cm B/Z=1/2.37			Block 3 1:4000,RGB, 30µm, 15cm B/Z=1/1.86			Block 4 1:4000,SW, 30µm, 15cm B/Z=1/1.86			Block 5 1:4000,RGB, 15µm, 15cm B/Z=1/1.86		
	$\sigma_{rel,R}^{nL}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{nL}$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^{nL}$ [m]	$\sigma_{rel,R}^{nL}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{nL}$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^{nL}$ [m]	$\sigma_{rel,R}^{nL}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{nL}$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^{nL}$ [m]	$\sigma_{rel,R}^{nL}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{nL}$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^{nL}$ [m]	$\sigma_{rel,R}^{nL}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{nL}$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^{nL}$ [m]
E	0.355	0.105	0.340	0.192	0.054	0.185	0.132	0.043	0.125	0.090	0.028	0.086	0.086	0.027	0.081
G	0.347	0.116	0.327	0.195	0.056	0.187	0.129	0.045	0.121	0.109	0.034	0.104	0.092	0.030	0.087
F	0.379	0.089	0.368	0.131	0.022	0.130	0.119	0.048	0.109	0.136	0.049	0.127	0.089	0.021	0.087
$\sigma_{rel}^L$	0.361	0.104	0.345	0.176	0.047	0.169	0.127	0.045	0.118	0.114	0.038	0.107	0.089	0.026	0.085

Tabelle 5.3: Relative Objektgenauigkeit  $\sigma_{rel}^{nL}$  natürlicher Linien in [m] am Objekt

Nov., Dez. 03'	Dez., Jan. 03'/04'	Jan., Feb. 04'	Feb., März. 04'	Jul., Aug. 04'	Sep. 04'	Okt. 04'
----------------	--------------------	----------------	-----------------	----------------	----------	----------

Tabelle 5.4: Farbskala der Arbeitszeiten

### Kommentare:

- a) Die Erfahrung der Operateurin kann eine Genauigkeitssteigerung von 28 % in der Lage- und 22 % in der Höhengenaugigkeit ergeben. (Die Prozentsätze ergeben sich aus dem Vergleich von Block 3 und 4 für Gehsteige und ebene Linien.)

- b) Die Höhengenaugigkeit in den Blöcken 1 und 2 ist um das 3.5-fache schlechter als die Lagegenauigkeit, in den Blöcken 3, 4 und 5 um das 2.9-fache. Nach Formeln 2.36 sollte dieser Unterschied gleich dem Basis/Höhenverhältnis sein. In der Tendenz spiegelt sich das unterschiedliche Basis/Höhenverhältnis wider, aber insgesamt ist der Genauigkeitsunterschied deutlich größer als das Basis/Höhenverhältnis. Das verdanken wir in hohem Maß der Unerfahrenheit der Operateurin beim Stereomessen.
- c) Farbbilder haben gegenüber Schwarzweißbildern einen geringfügigen Unterschied (4 % in der Lage und 0 % in der Höhe). (Die Prozentsätze ergeben sich aus dem Vergleich der Blöcke 3 und 4 für Linien auf Dachfirste.)
- d) Ebene Linien haben gegenüber Gehsteigen eine geringfügig bessere Lagegenauigkeit (8 %) und geringfügig bessere Höhengenaugigkeit (4%). (Die Prozentsätze ergeben sich aus dem Vergleich der Blöcke 1, 2, 3, 4 und 5.) Aus dem Vergleich im Block 1 für ebene Linien und Gehsteige ergibt sich, dass die ebenen Linien eine bessere Lagegenauigkeit (10 %) und eine geringfügig schlechtere Höhengenaugigkeit (4 %) haben. (Im Block 1 wurden alle drei Linientypen zur gleichen Zeit ausgewertet).
- e) Ebene Linien haben gegenüber Linien auf Dachfirste eine geringfügig schlechtere Lagegenauigkeit (9 %) und die gleiche Höhengenaugigkeit (0 %). (Die Prozentsätze ergeben sich aus dem Vergleich der Blöcke 1, 2, 3, 4 und 5.) Aus dem Vergleich im Block 1 für ebene Linien und Linien auf Dachfirste ergibt sich, dass die Dachfirste eine bessere Lagegenauigkeit (15 %) und eine geringfügig schlechtere Höhengenaugigkeit (8 %) haben. (Im Block 1 wurden alle drei Linientypen zur gleichen Zeit ausgewertet.)
- f) Gehsteige haben im Vergleich zu Linien auf Dachfirste eine geringfügig schlechtere Lagegenauigkeit (15 %) und eine geringfügig schlechtere Höhengenaugigkeit (2 %). (Die Prozentsätze ergeben sich aus dem Vergleich der Blöcke 1, 2, 3, 4 und 5.) Aus dem Vergleich im Block 1 für Linien auf Dachfirste und Gehsteige ergibt sich, dass die Dachfirste eine bessere Lagegenauigkeit (24 %) und eine schlechtere Höhengenaugigkeit (11 %) haben. (Im Block 1 wurden alle drei Linientypen zur gleichen Zeit ausgewertet.)
- g) Wenn wir an dieser Stelle einen Blick auf den Anhang C.1 werfen, merken wir, dass bei einigen Linien, ganz unerwartet, viele Abweichungen als grobe Fehler eliminiert wurden. Diese Prozente variieren bei den Linien:
- auf ebenem Gelände zwischen 2.4 % (Block 4) und 3.9 % (Block 3) in der Lage und 0.2 % (Block 4) und 0.5 % (Block 2) in der Höhe.
  - auf Gehsteigen zwischen 1.7 % (Block 4) und 4.6 % (Block 1) in der Lage und 0.2 % (Block 2) und 0.8 % (Block 5) in der Höhe.
  - auf Dachfirsten zwischen 1.1 % (Block 3) und 4.1 % (Block 5) in der Lage und 0.0 % (Block 1) und 3.3 % (Block 2) in der Höhe.

Am meisten wurden Abweichungen bei den Linien auf ebenem Gelände eliminiert. Da die grobfehlerhaften Lagekoordinaten viel mehr waren als die grobfehlerhaften Höhenkoordinaten - obwohl auch hier die Höhengenaugigkeit generell schlechter ist als die Lagegenauigkeit - weist das besonders bei diesem Linientyp auf eine schlechtere Definitionsunsicherheit der Linien (besonders bei den Linien 32 und 33) hin. Im Block 1 bei der Linie 32 wurden z.B. 14.3 % in der Lage und 0.0 % in der Höhe und bei der Linie 33 wurden 5.7 % in der Lage und 0.0 % in der Höhe eliminiert. Von der schlechten Definitionsunsicherheit einiger Linien kann man sich auch durch die Abbildungen dieser Linien im Anhang E überzeugen.

### 5.3 Absolute Liniengenauigkeit im Objektkoordinatensystem

Die absoluten Gesamtkoordinatenfehler sowohl für jede Linie als auch der repräsentative Wert nach Formeln 2.28 und 2.30 (=letzte Zeile in der Tabelle 5.5) sind in Tabelle 5.5 gezeigt. In Tabelle 5.6 sind die systematischen (nach Formeln 2.26 und 2.32) und zufälligen (nach Formeln 2.29 und 2.31) Anteile des Gesamtkoordinatenfehlers für die drei untersuchten Blöcke zusammengestellt.

	Block 3 1:4000,RGB,30µm,15cm B/Z=1/1.86			Block 4 1:4000,SW,30µm,15cm B/Z=1/1.86			Block 5 1:4000,RGB,15µm,15cm B/Z=1/1.86		
	$\sigma_{abs,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{abs,XY}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{abs,Z}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{abs,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{abs,XY}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{abs,Z}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{abs,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{abs,XY}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{abs,Z}^{Linie}$ [m]
18	0.201	0.113	0.166	0.175	0.120	0.127	0.159	0.125	0.099
32	0.126	0.035	0.121	0.117	0.036	0.111	0.143	0.021	0.141
33	0.153	0.049	0.145	0.136	0.047	0.128	0.162	0.079	0.141
35	0.159	0.095	0.128	0.122	0.067	0.102	0.127	0.031	0.123
40	0.183	0.131	0.128	0.148	0.114	0.094	0.164	0.094	0.134
43	0.100	0.060	0.080	0.103	0.061	0.083	0.139	0.097	0.099
46	0.156	0.106	0.115	0.131	0.093	0.092	0.131	0.035	0.126
51	0.187	0.044	0.182	0.119	0.048	0.109	0.141	0.104	0.100
$\sigma_{abs}^{nL}$	0.167	0.086	0.136	0.133	0.079	0.107	0.147	0.082	0.122

Tabelle 5.5: Absoluter Gesamtkoordinatenfehler  $\sigma_{abs}^{Linie}$  ( $\sigma_{abs}^{nL}$ ) natürlicher Linien in [m]

	Block 3 1:4000,RGB,30µm,15cm B/Z=1/1.86				Block 4 1:4000,SW,30µm,15cm B/Z=1/1.86				Block 5 1:4000,RGB,15µm,15cm B/Z=1/1.86			
	$s_{abs,XY}^{L,sys}$ [m]	$s_{abs,Z}^{L,sys}$ [m]	$\sigma_{abs,XY}^{L,zuf}$ [m]	$\sigma_{abs,Z}^{L,zuf}$ [m]	$s_{abs,XY}^{L,sys}$ [m]	$s_{abs,Z}^{L,sys}$ [m]	$\sigma_{abs,XY}^{L,zuf}$ [m]	$\sigma_{abs,Z}^{L,zuf}$ [m]	$s_{abs,XY}^{L,sys}$ [m]	$s_{abs,Z}^{L,sys}$ [m]	$\sigma_{abs,XY}^{L,zuf}$ [m]	$\sigma_{abs,Z}^{L,zuf}$ [m]
18	0.100	-0.020	0.054	0.165	0.105	-0.018	0.058	0.126	0.107	0.025	0.064	0.095
32	0.030	0.065	0.018	0.103	0.031	0.076	0.020	0.081	0.018	0.124	0.011	0.068
33	0.038	0.078	0.031	0.122	0.037	0.097	0.030	0.083	0.069	0.124	0.038	0.068
35	0.084	0.001	0.045	0.128	0.059	0.051	0.031	0.089	0.025	0.095	0.018	0.078
40	0.111	-0.003	0.070	0.128	0.101	-0.037	0.054	0.086	0.085	-0.022	0.041	0.133
43	0.049	0.022	0.035	0.077	0.050	0.030	0.035	0.078	0.084	0.041	0.048	0.091
46	0.096	0.043	0.043	0.107	0.084	0.037	0.039	0.084	0.029	0.109	0.020	0.064
51	0.036	-0.131	0.026	0.027	0.039	-0.050	0.028	0.097	0.096	-0.055	0.041	0.083
	0.075	0.061	0.043	0.122	0.069	0.055	0.039	0.092	0.072	0.085	0.039	0.088

Tabelle 5.6: Systematische und zufällige Anteile des Gesamtkoordinatenfehlers  $\sigma_{abs}^{Linie}$  für natürliche Linien in [m]

In den Bezeichnungen aus der Tabelle 5.6 -  $s_{abs,XY}^{L,sys}$ ,  $s_{abs,Z}^{L,sys}$ ,  $\sigma_{abs,XY}^{L,zuf}$ ,  $\sigma_{abs,Z}^{L,zuf}$  - sollte im Index oben "Linien" stehen, wegen Platzmangel steht "L".

Kommentare:

- a) Die größten Veränderungen nach der Elimination des systematischen Fehlers passieren in der Lage: 51 %. Die Höhe reduziert sich um 19 %.
- b) Die systematischen Anteile für die jeweiligen Linien bleiben in den drei Blöcken (gleicher Bildmaßstab, gleiches Flugdatum) relativ konstant, das heißt es liegen konstante Messbedingungen vor. Sie variieren aber zwischen den einzelnen Linien, das heißt es gibt eigenständige Veränderungen der Messbedingungen (z.B. unterschiedliche Definition der einzelnen Linien im photogrammetrischen Stereomodell und im Gelände).
- c) Der systematische Fehler in der Lage ist gerichtet positiv.
- d) Die systematischen Anteile in der Höhe haben unterschiedliche Vorzeichen, liegen aber in einem engen Streubereich.

## 5.4 Genauigkeit der halbautomatisch gewonnenen Linien im Objektkoordinatensystem

### 5.4.1 Das Rauschen im Bild und die Reproduzierbarkeit der Snakes

Die Genauigkeiten im Bild aus dem gegenseitigen Vergleich der Snake-Linien, auch Reproduzierbarkeit genannt, sind in der Tabelle 5.7 gezeigt. Tabelle 5.8 stellt das Rauschen, repräsentiert durch die Sigma der Sigma-Filter, dar.

	Block 1 1:15000,RGB, 20µm, 21cm		Block 2 1:6000,SW, 15µm, 21cm		Block 3 1:4000,RGB, 30µm, 15cm		Block 5 1:4000,RGB, 15µm, 15cm	
	Linkes Bild	Rechtes Bild	Linkes Bild	Rechtes Bild	Linkes Bild	Rechtes Bild	Linkes Bild	Rechtes Bild
$\sigma_{\xi,\eta}^S [pxl]$	0.127	0.126	0.241	0.253	0.111	0.126	0.162	0.173
$\sigma_{repr}^S [pxl]$	0.127		0.247		0.118		0.167	

*Tabelle 5.7: Reproduzierbarkeit  $\sigma_{repr}^S$  der Snake-Linien im Bild in [Pixel]*

$\sigma_{noise}$ nach	Block 1 1:15000,RGB, 20µm, 21cm		Block 2 1:6000,SW, 15µm, 21cm		Block 3 1:4000,RGB, 30µm, 15cm		Block 5 1:4000,RGB, 15µm, 15cm	
	Linkes Bild	Rechtes Bild	Linkes Bild	Rechtes Bild	Linkes Bild	Rechtes Bild	Linkes Bild	Rechtes Bild
1 it	2.638	3.553	3.753	3.881	4.017	3.324	2.873	2.479
2 it	1.721	2.746	2.708	2.925	3.158	2.288	2.170	1.886
$\overline{\sigma_n}$	2.291		2.818		2.757		2.033	

*Tabelle 5.8: Abschätzung des Rauschens für die Bilder aus den Blöcken in [Betrag des Grauwertes]*

Kommentare:

- a) Aus Tabelle 5.7: Die Linienextraktion innerhalb jedes Bildpaares zeigt Stabilität bezüglich der Reproduzierbarkeit. Aus dem Anhang D.1 ist Folgendes zu bemerken: Die Linien innerhalb jedes Bildpaares haben die gleiche Qualität. Die Qualität der einzelnen Linien untereinander variiert, aber nicht stark.
- b) Aus Tabelle 5.8: Die verrauschtesten Bilder sind im Block 2. Die beste Qualität haben die Bilder im Block 5. Block 2 hat die schlechteste Reproduzierbarkeit.
- c) Aus Anhang D.1: Bei einigen Linien werden ganz unerwartet viele Abweichungen als grobe Fehler eliminiert. Diese Prozente variieren zwischen 0% und 11.4% im Block 5 (im linken Bild). Die meisten Punkte, sowohl im linken als auch im rechten Bild, wurden im Block 3 und 5 bei den Linien 37 und 42 eliminiert. Im Block 2 teilen sich diesen Platz die Linien 26 und 39. Im Block 1 wurden generell am wenigsten Punkte eliminiert, auch bei Linie 37. Das weist auf eine schlechtere Definition der angesprochenen Linien im Bild hin. Im Anhang E sind einige Linien zu sehen.

**5.4.2 Relative Genauigkeiten mit den manuellen Splines als Referenz**

In Tabelle 5.9 ist der relative Gesamtkoordinatenfehler nach Abschnitt 3.6 aus dem Vergleich der Snake-Linien mit den manuellen Splines gezeigt. Die systematischen und zufälligen Anteile des Gesamtkoordinatenfehlers sind in den nächsten zwei Tabellen 5.10 und 5.11 dargestellt. Im Gegensatz zur Definition für die relative Genauigkeit aus Abschnitt 2.1, vergleichen wir hier mit einer Referenz (bestehend aus manuellen Splines), deshalb haben wir systematische Einflüsse zu berücksichtigen. Als relative Genauigkeit der Snakes bezeichnen wir die ermittelten unregelmäßigen Anteile nach der Elimination der systematischen Fehlers und nicht die Gesamtfehler, da auch die manuellen Messungen sehr große systematische Effekte hatten (siehe Abschnitt 5.3).

	Block 1 1:15000,RGB, 20µm, 21cm B/Z=1/2.55			Block 2 1:6000,SW, 15µm, 21cm B/Z=1/2.37			Block 3 1:4000,RGB, 30µm, 15cm B/Z=1/1.86			Block 5 1:4000,RGB, 15µm, 15cm B/Z=1/1.86		
	$\sigma_{rel,R}^S$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^S$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^S$ [m]	$\sigma_{rel,R}^S$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^S$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^S$ [m]	$\sigma_{rel,R}^S$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^S$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^S$ [m]	$\sigma_{rel,R}^S$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^S$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^S$ [m]
E	1.200	0.870	0.827	0.248	0.089	0.232	0.225	0.094	0.205	0.178	0.084	0.157
G							0.262	0.050	0.258	0.249	0.040	0.246
$\sigma_{rel}^S$	1.200	0.870	0.827	0.248	0.089	0.232	0.245	0.076	0.233	0.217	0.066	0.206

*Tabelle 5.9: Relativer Gesamtkoordinatenfehler  $\sigma_{rel}^S$  der Snake-Linien in [m] am Objekt*

Die Linie 29 in allen Blöcken und die Linien 28 und 32 im Block 2, wurden aus der Untersuchung der relativen Genauigkeit weggenommen, da sie die Resultate sehr verschlechtert hätten. Diese Linien liegen etwas weniger als 45° zur Flugrichtung gedreht: Eine wichtige Forderung in der Photogrammetrie ist, dass die Linien nicht parallel zur Basis liegen. Wie wir sehen, ist die Bedingung bei halbautomatischen Snake-Extraktionen noch strenger geworden; man sollte 60% Querüberdeckung nehmen.

	Block 1 1:15000,RGB, 20µm, 21cm B/Z=1/2.55		Block 2 1:6000,SW, 15µm, 21cm B/Z=1/2.37		Block 3 1:4000,RGB, 30µm, 15cm B/Z=1/1.86		Block 5 1:4000,RGB, 15µm, 15cm B/Z=1/1.86	
	$s_{rel,XY}^{S,sys}$ [m]	$s_{rel,Z}^{S,sys}$ [m]	$s_{rel,XY}^{S,sys}$ [m]	$s_{rel,Z}^{S,sys}$ [m]	$s_{XY,rel}^{S,sys}$ [m]	$s_{rel,Z}^{S,sys}$ [m]	$s_{rel,XY}^{S,sys}$ [m]	$s_{rel,Z}^{S,sys}$ [m]
E	0.850	0.755	0.073	0.089	0.070	0.168	0.077	0.104
G					0.047	0.224	0.036	0.215
$s_{rel}^{S,sys}$	0.850	0.755	0.073	0.089	0.059	0.198	0.060	0.169

**Tabelle 5.10:** Systematische Anteile des Gesamtkoordinatenfehlers  $s_{rel}^{S,sys}$  der Snake-Linien in [m] am Objekt

	Block 1 1:15000,RGB, 20µm, 21cm B/Z=1/2.55			Block 2 1:6000,SW, 15µm, 21cm B/Z=1/2.37			Block 3 1:4000,RGB, 30µm, 15cm B/Z=1/1.86			Block 5 1:4000,RGB, 15µm, 15cm B/Z=1/1.86		
	$\sigma_{rel,R}^{S,zuf}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{S,zuf}$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^{S,zuf}$ [m]	$\sigma_{rel,R}^{S,zuf}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{S,zuf}$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^{S,zuf}$ [m]	$\sigma_{rel,R}^{S,zuf}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{S,zuf}$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^{S,zuf}$ [m]	$\sigma_{rel,R}^{S,zuf}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{S,zuf}$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^{S,zuf}$ [m]
E	0.384	0.183	0.338	0.220	0.050	0.214	0.117	0.049	0.106	0.123	0.034	0.118
G							0.130	0.020	0.128	0.121	0.018	0.120
$\sigma_{rel}^{S,zuf}$	0.384	0.183	0.338	0.220	0.050	0.214	0.123	0.037	0.118	0.122	0.027	0.119

**Tabelle 5.11:** Zufällige Anteile des Gesamtkoordinatenfehlers  $\sigma_{rel}^S$  der Snake-Linien in [m] am Objekt.

Relative Genauigkeit der Snake-Linien

Kommentare:

- a) Aus Tabelle 5.10: Es gibt große systematische Effekte: im Mittel 59 % in der Lage und 40 % in der Höhe. Mögliche Gründe dafür - außer die Systematik der Referenz selbst - sind eventuell die Unzulänglichkeiten der Snake-Prozessierung und eine große Definitionsunsicherheit der Linien im Bild.
- b) Aus Tabelle 5.10: Im Block 1 sind die systematischen Anteile sowohl in der Lage, als auch in der Höhe besonders groß.
- c) Aus Anhang D.2.2: Die systematischen Anteile in der Lage variieren für die jeweiligen Linien in den Blöcken 3 und 5 (gleicher Bildmaßstab, gleiches Flugdatum, etc.) leicht. Trotz der variierenden Startwerte der Snake-Methode stellen wir konstante Messbedingungen fest. Die systematischen Anteile variieren auch zwischen den einzelnen Linien, das heißt es gibt eigenständige Veränderungen der Messbedingungen für die einzelnen Linien (z.B. unterschiedliche Definition der einzelnen Linien im photogrammetrischen Modell und im Gelände).
- d) Aus Anhang D.2.2: Der systematische Fehler in der Lage ist positiv gerichtet.
- e) Aus Anhang D.2.2: Die systematischen Anteile in der Höhe variieren in allen Modellen. Sie haben unterschiedliche Vorzeichen, bleiben aber in einem engen Streubereich (außer im Block 1, dort ist der Streubereich groß).

- f) Aus Tabelle 5.11: Die Höhengenaugigkeit ist im Block 2 und 5 um das 4.4-fache schlechter als die Lagegenauigkeit. Im Block 1 ist die Höhengenaugigkeit um das 1.8-fache und im Block 3 um das 3.2-fache schlechter als die Lagegenauigkeit. Da die Referenzdaten hier aus manuellen digitalen Auswertungen stammen, spiegelt sich in der Tendenz auch der Einfluss des Basis/Höhenverhältnisses wider. Dieser Unterschied sollte dem Basis/Höhenverhältnis entsprechen. Der Genauigkeitsunterschied ist deutlich größer als das Basis/Höhenverhältnis.
- g) Aus Tabelle 5.11: Die relative Genauigkeit der Snake-Linien ist der relativen Genauigkeit der manuell gemessenen natürlichen Linien aus Tabelle 5.3 sehr ähnlich (bemerkenswert!).
- h) Aus Tabelle 5.11: Die Linienart "Gehsteige" hat eine um 80 % schlechtere Höhendefinition, was aber sehr verständlich ist, weil die Snakes zwischen Gehsteig-oben und /-unten nicht unterscheiden können.
- i) Aus Anhang D.2.1: Bei der Grobfehlersuche wurden im Prinzip sehr wenig Punkte als grobfehlerhaft geschätzt. Unerwartet werden an einigen Linien viele Punkte eliminiert, was für eine schlechtere Lage-/Höhendefinition spricht. Im Block 1 wurden keine Punkte eliminiert. Im Block 2 wurden maximal 3 % in der Lage bei der Linie 26 und 3.9 % in der Höhe bei der Linie 34 eliminiert. Im Block 3 wurden 0.5 % nur aus den Lagepunkten bei der Linie 42 eliminiert. Im Block 5 wurden 0.2 % der Lagepunkte bei der Linie 37 und 1.4 % der Höhenpunkte auch bei der Linie 52 eliminiert.

### 5.4.3 Absolute Genauigkeiten mit terrestrischen Vergleichsmessungen als Referenz

Die Resultate aus dem Vergleich der Snake-Linien mit den terrestrisch gemessenen Linien sind in Tabelle 5.12 gezeigt.

	Block 3 1:4000,RGB, 30µm, 15cm B/Z=1/1.86			Block 5 1:4000,RGB, 15µm, 15cm B/Z=1/1.86		
	$\sigma_{abs,R}^S$ [m]	$\sigma_{abs,XY}^S$ [m]	$\sigma_{abs,Z}^S$ [m]	$\sigma_{abs,R}^S$ [m]	$\sigma_{abs,XY}^S$ [m]	$\sigma_{abs,Z}^S$ [m]
32	0.152	0.110	0.105	0.200	0.107	0.169
33	0.184	0.103	0.153	0.293	0.045	0.290
35	0.102	0.027	0.098	0.238	0.024	0.237
$\sigma_{abs}^S$	0.150	0.088	0.121	0.247	0.068	0.237

**Tabelle 5.12:** Absoluter Gesamtkoordinatenfehler  $\sigma_{abs}^S$  der Snake-Linien in [m] am Objekt. Tabelle 5.13 zeigt die Aufspaltung in systematische und zufällige Anteile.

	Block 3 1:4000,RGB,30 $\mu$ m, 15cm B/Z=1/1.86				Block 5 1:4000,RGB,15 $\mu$ m, 15cm B/Z=1/1.86			
	$s_{abs,XY}^{S,sys}$ [m]	$s_{abs,Z}^{S,sys}$ [m]	$\sigma_{abs,XY}^{S,zuf}$ [m]	$\sigma_{abs,Z}^{S,zuf}$ [m]	$s_{abs,XY}^{S,sys}$ [m]	$s_{abs,Z}^{S,sys}$ [m]	$\sigma_{abs,XY}^{S,zuf}$ [m]	$\sigma_{abs,Z}^{S,zuf}$ [m]
32	0.109	0.079	0.011	0.069	0.105	0.166	0.018	0.036
33	0.097	-0.013	0.035	0.153	0.037	0.283	0.025	0.066
35	0.022	-0.014	0.016	0.097	0.020	0.216	0.013	0.098
	0.085	0.047	0.023	0.112	0.065	0.227	0.019	0.071

**Table 5.13:** Systematische und zufällige Anteile der Gesamtkoordinatenfehler  $\sigma_{abs}^{snake}$  für Snake-Linien in [m]

Kommentare:

- Die größten Veränderungen nach der Elimination des systematischen Fehlers passieren in der Lage: im Mittel 73 %. Die Höhe reduziert sich im Block 3 um nur 8 % aber im Block 5 um 70 %.
- Die systematischen Anteile in der Lage für die jeweiligen Linien bleiben in den zwei Blöcken (gleicher Bildmaßstab, gleiches Flugdatum) relativ konstant, das heißt es liegen konstante Messbedingungen vor. Sie variieren aber zwischen den einzelnen Linien, das heißt es gibt eigenständige Veränderungen der Messbedingungen für die einzelnen Linien (z.B. unterschiedliche Definition der einzelnen Linien im photogrammetrischen Modell und im Gelände).
- Der systematische Fehler in der Lage ist gerichtet positiv.
- Die systematischen Anteile in der Höhe sind unterschiedlich in beiden Modellen. Sie haben unterschiedliche Vorzeichen, bleiben aber in einem engen Streubereich. Sie sind im Modell 5 sehr groß und beeinflussen stark die Resultate.

## Kapitel 6

# Genauigkeitsanalyse

In diesem Kapitel wird versucht die erreichten Genauigkeiten zusammenzufassen. Anschließend werden sie in Abhängigkeit von den Faktoren - Pixelgröße, Flughöhe über Grund, Bildmaßstab gebracht. Dabei sind einige wichtige Aspekte hervorzuheben.

### 6.1 Relative Genauigkeit der manuellen Punktauswertung

Mit den Übergangsformeln 2.36 aus Abschnitt 2.6 werden die Bildmessgenauigkeiten für die Lage und für die Höhe aus den objektbezogenen Genauigkeiten aus der Tabelle 5.1 ermittelt und sind in der Tabelle 6.1 gezeigt.

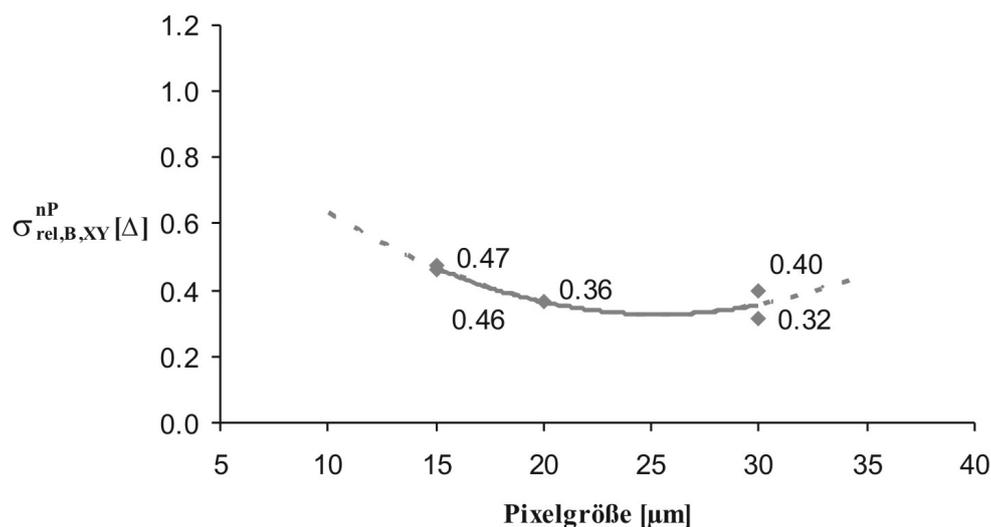
	Block 1 1:15000,RGB,20µm,21cm B/Z=1/2.55			Block 2 1:6000,SW,15µm,21cm B/Z=1/2.37			Block 3 1:4000,RGB,30µm,15cm B/Z=1/1.86			Block 4 1:4000,SW,30µm,15cm B/Z=1/1.86			Block 5 1:4000,RGB,15µm,15cm B/Z=1/1.86		
	$\sigma_{rel,B,X}^{nP}$ [µm]	$\sigma_{rel,B,Y}^{nP}$ [µm]	$\sigma_{rel,B,Z}^{nP}$ [µm]	$\sigma_{rel,B,X}^{nP}$ [µm]	$\sigma_{rel,B,Y}^{nP}$ [µm]	$\sigma_{rel,B,Z}^{nP}$ [µm]	$\sigma_{rel,B,X}^{nP}$ [µm]	$\sigma_{rel,B,Y}^{nP}$ [µm]	$\sigma_{rel,B,Z}^{nP}$ [µm]	$\sigma_{rel,B,X}^{nP}$ [µm]	$\sigma_{rel,B,Y}^{nP}$ [µm]	$\sigma_{rel,B,Z}^{nP}$ [µm]	$\sigma_{rel,B,X}^{nP}$ [µm]	$\sigma_{rel,B,Y}^{nP}$ [µm]	$\sigma_{rel,B,Z}^{nP}$ [µm]
M				7.7	7.7	9.4	8.0	9.0	16.2	5.5	5.8	9.7	4.5	5.3	8.6
H	5.7	8.5	9.1	7.3	8.0	9.3	10.0	12.3	12.9	6.0	8.5	8.6	7.5	10.8	12.3
F	5.5	8.7	9.7	5.2	5.0	11.0	15.0	15.0	18.4	12.0	15.0	18.6	6.0	6.8	12.7
$\sigma_{rel,B}^{nP}$	5.6	8.6	9.4	6.8	7.0	10.0	11.4	12.3	16.0	8.4	10.5	13.1	6.1	7.9	11.4
$\sigma_{rel,B,R}^{nP}$	7.3		9.4	6.9		10.0	11.9	16.0	16.0	9.5		13.1	7.1		11.4
		8.4		8.6			14.1			11.4			9.5		

**Tabelle 6.1:** Relative Genauigkeit  $\sigma_{rel,B}^{nP}$  natürlicher Punkte in [µm] im Bild

Nov., Dez. 03'	Dez., Jan. 03' / 04'	Jan., Feb. 04'	Feb., März. 04'	Jul., Aug. 04'	Sep. 04'	Okt. 04'
----------------	----------------------	----------------	-----------------	----------------	----------	----------

**Tabelle 6.2:** Farbskala der Arbeitszeiten

- a) Eine Unterscheidung in die verschiedenen Punktarten wurde nicht vorgenommen. Das Zahlenmaterial erwies sich als unzureichend um generelle Schlüsse über die Punktarten ziehen zu können.
- b) Die Punktauswertungen zeigen eine gute Normalverteilung.
- c) Aus den Werten für Firstpunkte aus Block 3 und Block 5 ist ersichtlich, dass eine Pixelgröße von  $15 \mu\text{m}$  gegenüber einer Pixelgröße von  $30 \mu\text{m}$  eine Genauigkeitssteigerung von 57 % in der Lage und von 31 % in der Höhe bewirken kann. Die Messgenauigkeiten aus der Tabelle 6.1 werden in Abbildungen 6.1 bis 6.3 als eine Funktion der Pixelgröße gezeigt. Durch eine Interpolation/Extrapolation ist eine Trendkurve zwischen den Werten berechnet, die den Verlauf der Genauigkeit in Abhängigkeit von der Pixelgröße zeigen soll. Die Werte in den Abbildungen zeigen das Verhältnis zwischen der erreichten Bildmessgenauigkeit und der entsprechenden Pixelgröße. Sie werden als Multiplikationsfaktoren mit der entsprechenden Pixelgrößen verwendet, um auf die Messgenauigkeit - ausgedrückt in  $\mu\text{m}$  - im Bild zu kommen.



**Abbildung 6.1:** Einfluß der Pixelgröße auf der Lagebildmessgenauigkeit  $\sigma_{rel,B,XY}^{nP} [\Delta]$  natürlicher Punkte

Wir sehen aus den Abbildungen, dass die Messgenauigkeit - ausgedrückt als Anteil der Pixelgröße - mit Verkleinerung der Pixelgröße nicht konstant bleibt sondern schlechter wird. Da das Verhältnis der Höhenmessgenauigkeit zur Lagegenauigkeit nicht genau dem Basis/Höhenverhältnis in dieser Untersuchung entspricht (siehe Abschnitt 5.1c) ist auch die pixelbezogene Höhenmessgenauigkeit (Abbildung 6.2) im Bild schlechter als die pixelbezogene Lagegenauigkeit (Abbildung 6.1). Die Vergrößerung der Multiplikationsfaktoren mit Verkleinerung der Pixelgröße ist mit der Verschlechterung der radiometrischen Auflösung (das Rauschen im Bild) bei einer Verbesserung der geometrischen Auflösung (die Pixelgröße)<sup>1</sup> erklärbar. Man kann daher die mit einer Verkleinerung der Pixelgröße - aus geometrischer Sicht - zu erwartende Genauigkeitssteigerung nicht voll ausnutzen. Die Verschlechterung

<sup>1</sup>Kraus, K. & Schneider, W., 1988: Fernerkundung - Band 1, S. 156-160

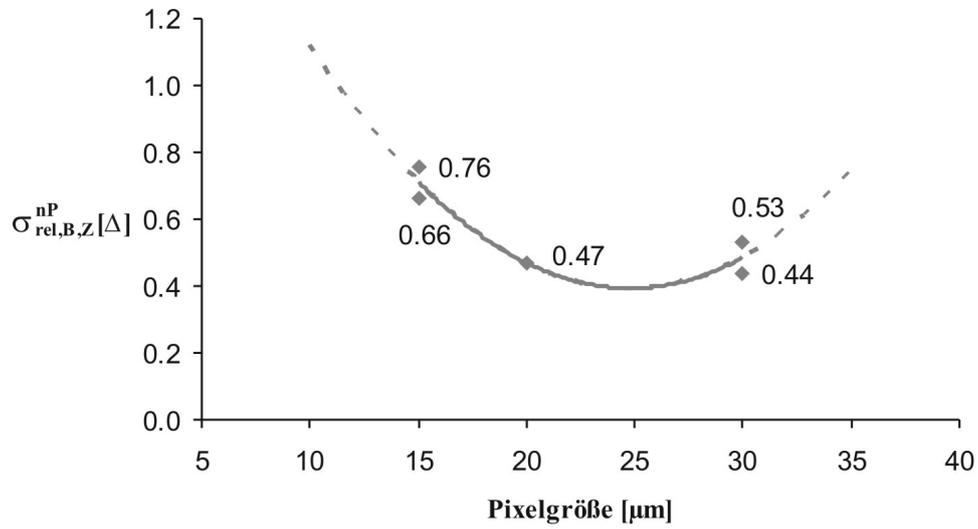


Abbildung 6.2: Einfluß der Pixelgröße auf der Höhenbildmessgenauigkeit  $\sigma_{rel,B,Z}^{nP} [\Delta]$  natürlicher Punkte

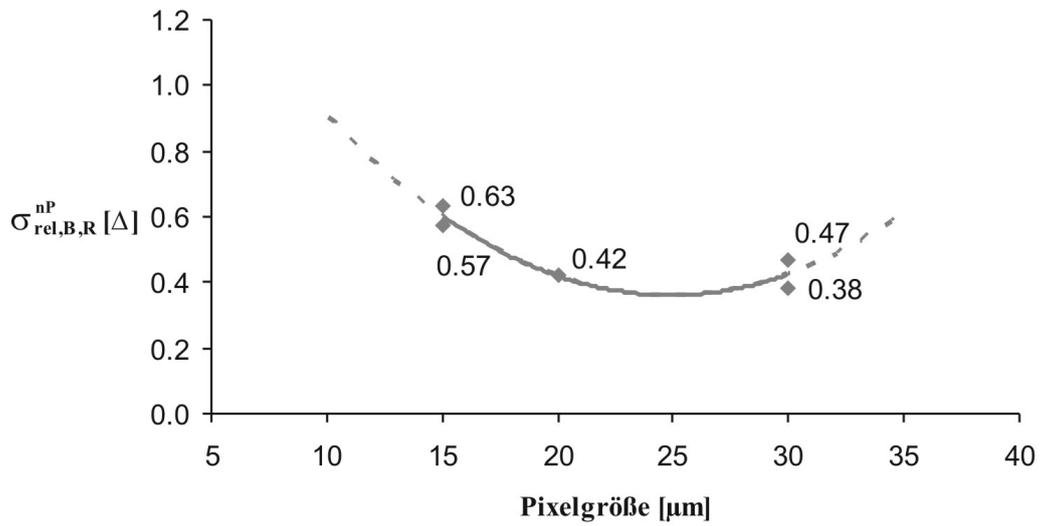


Abbildung 6.3: Einfluß der Pixelgröße auf der räumlichen Bildmessgenauigkeit  $\sigma_{rel,B,R}^{nP} [\Delta]$  natürlicher Punkte

räumliche Bildmessgenauigkeit=Punktmessgenauigkeit im Bild

in der pixelbezogenen Bildmessgenauigkeit mit Verkleinerung der Pixelgröße beträgt im Fall der manuellen Punktmessung 29 %. (Der Prozentsatz ergibt aus Abbildung 6.3 über die räumliche Bildmessgenauigkeit der Punkte.)

- d) Die Testdaten zeigen die besten Resultate etwa mit 20  $\mu\text{m}$ -Pixelgröße. Deshalb werden die Bildmessgenauigkeiten aus der Tabelle 6.1 für 20  $\mu\text{m}$  umgerechnet und in der nächsten Abbildung 6.4 in Abhängigkeit von der Flughöhe über Grund zusammengestellt.

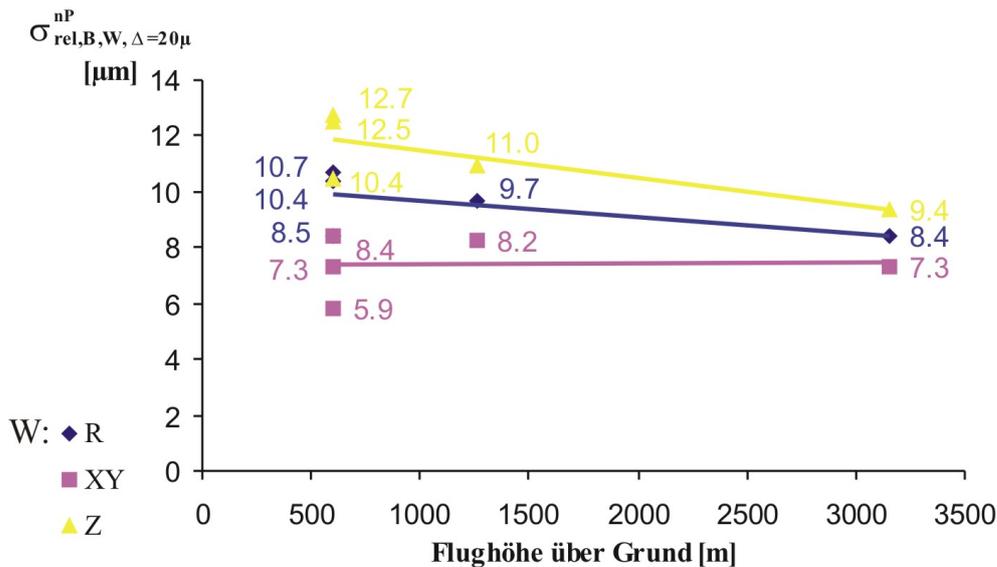


Abbildung 6.4: Einfluß der Flughöhe über Grund auf der Bildmessgenauigkeit  $\sigma_{rel,B,Z}^{nP}$  [  $\mu\text{m}$  ] natürlicher Punkte in Bildern mit 20  $\mu\text{m}$ -Pixel

In dieser Abbildung sehen wir eine Verschlechterung bei den tieferen Höhen um 15%. Als Folge der Fortbewegung des Flugzeugs während der Belichtungszeit treten Unschärfen auf, die insbesondere bei niedrigen Flughöhen sehr stark sind. Die gleichförmige Bewegungsunschärfe ist der wesentliche<sup>2</sup> Anteil davon und wird während des Fluges bei den neuesten Luftbildmesskameras kompensiert. Leider wurde gerade bei den niedrigen Flughöhen in dieser Untersuchung keine Bewegungskompensation durchgeführt (siehe Seite 42 oben).

- e) Da die meisten Messungen im Bildmaterial gemacht wurden, das eine Pixelgröße von 15  $\mu\text{m}$  hat, werden die Genauigkeiten der Punktmessung im Objektraum aus der Tabelle 5.1 mit der unter c) angegebenen Abhängigkeit von der Pixelgröße auf 15  $\mu\text{m}$  umgerechnet und in Abhängigkeit vom Maßstab und der Flughöhe über Grund in den nächsten Graphiken 6.5 und 6.6 gebracht. In jeder Abbildung wird durch Interpolation zwischen den Werten eine Trendlinie ermittelt.

<sup>2</sup>Außer der gleichförmigen Bewegungsunschärfe treten aber noch andere Einflüsse (Geländehöhenunterschiede, Rotation des Flugzeuges) auf (siehe Kapitel 6.3.2).

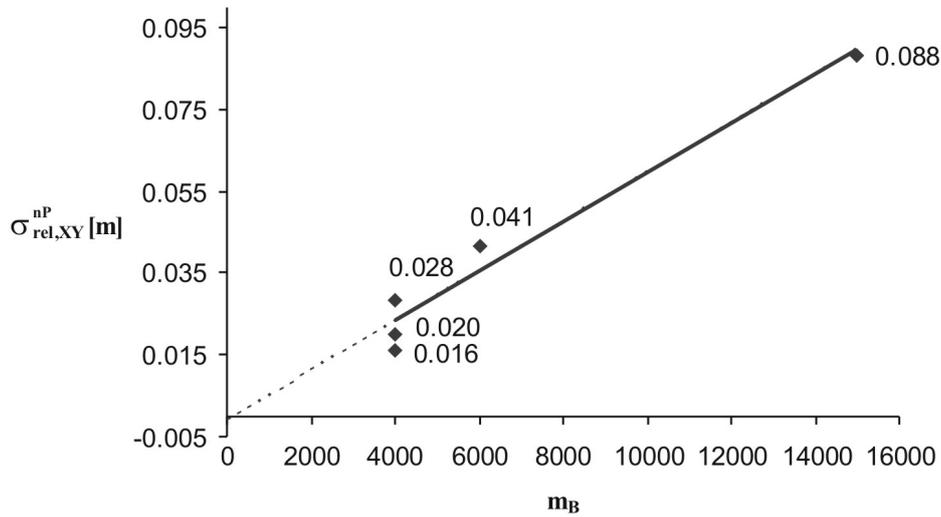


Abbildung 6.5: Die Lagegenauigkeit  $\sigma_{XY}^{nP}$  für natürliche Punkte am Objekt in Abhängigkeit von der Bildmaßstabszahl

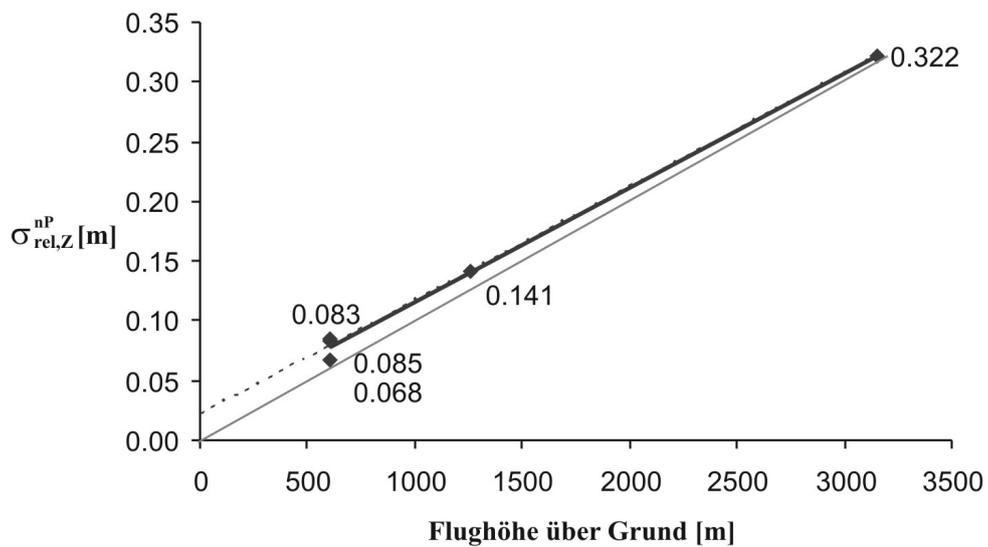


Abbildung 6.6: Die Höhengengenauigkeit  $\sigma_Z^{nP}$  für natürliche Punkte am Objekt in Abhängigkeit von der Flughöhe über Grund

Beide Trendlinien zeigen eine generelle Verschlechterung der Objektgenauigkeit mit entsprechender Vergrößerung der Bildmaßstabszahl oder der Flughöhe über Grund. Die Verlängerung der Trendlinie der Lagegenauigkeit bis zur Ordinatenachse zeigt eine Versetzung vom Ursprung, die vernachlässigbar klein ist. Die Verlängerung der Höhengenaugkeitslinie zeigt eine Versetzung von 2 cm vom Ursprung. Unter Beachtung der Versetzung bei der Höhe ergeben sich folgende Objektgenauigkeiten in Abhängigkeit von der Maßstabszahl/Flughöhe:

$$\begin{aligned} \text{Lage: } \sigma_{XY}^{nP} &= \quad \quad \quad + 5.9 \mu\text{m } m_B \\ \text{Höhe: } \sigma_Z^{nP} &= \pm 0.02 \text{ m} + 0.096 \text{ ‰ Flughöhe} \end{aligned} \quad (6.1)$$

Für etwas grobe Genauigkeitsabschätzungen reichen auch die Gleichungen 6.2 der Ursprungsgeraden (hellgraue ausgezogene Linie in der Abbildung 6.6) aus.

$$\begin{aligned} \text{Lage: } \sigma_{XY}^{nP} &= \pm 5.9 \mu\text{m } m_B \\ \text{Höhe: } \sigma_Z^{nP} &= \pm 0.102 \text{ ‰ Flughöhe} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Die Richtwerte für die analytischen Photogrammetrie<sup>3</sup> für signalisierter bzw. entsprechend genau definierte Punkte sehen ähnlich aus:

$$\begin{aligned} \text{Lage: } \sigma_{XY}^{sP} &= \pm 6 \mu\text{m } m_B \\ \text{Höhe: } \sigma_Z^{sP} &= \pm 0.06 \text{ ‰ Flughöhe} \end{aligned} \quad (6.3)$$

Die Ursache für die Differenz in den Höhengleichungen ist, dass die Höhenmessgenauigkeit etwas schlechter ist als das Basis/Höhenverhältnis erwarten lässt.

In Formeln 2.34 wurden die ersten Terme vernachlässigt und die bildbezogenen Genauigkeiten  $\sigma_\xi$ ,  $\sigma_\eta$  und  $\sigma_{p_\xi}$  wurden durch eine einzige Bildmessgenauigkeit ersetzt. Wir können uns aus den in  $15 \mu\text{m}$  umgerechneten Bildmessgenauigkeiten eine allgemeine Bildmessgenauigkeit mit einem Wert von  $8 \mu\text{m}$  für die Punktauswertung ausrechnen. Dabei beträgt die Bildmessgenauigkeit aus den Lagefehlern  $6 \mu\text{m}$  und aus den Höhenfehlern  $10 \mu\text{m}$ .

## 6.2 Relative Genauigkeit der manuellen Linienauswertung

Mit den Übergangsformeln 2.36 aus Abschnitt 2.6 werden die Lage- und die Höhenmessgenauigkeit im Bild aus den objektbezogenen Genauigkeiten aus der Tabelle 5.3 ermittelt und in der Tabelle 6.3 gezeigt:

- Eine Unterscheidung in die verschiedenen Linientypen wurde nicht vorgenommen. Die Daten erwiesen sich auch hier für solche Aussagen unzureichend.
- Die Pixelgröße von  $15 \mu\text{m}$  gegenüber einer Pixelgröße von  $30 \mu\text{m}$  kann eine Genauigkeitssteigerung von 56 % in der Lage und 21 % in der Höhengenaugkeit bewirken. (Die Prozentsätze ergeben sich aus dem Vergleich von Block 3 und Block 5 für Firstpunkte, weil sie zur gleichen Zeit ausgewertet wurden.) Die Messgenauigkeiten aus der Tabelle 6.3 werden auch

<sup>3</sup>Kraus, K., 2004: Photogrammetrie - Band 1, 7. Auflage, S. 268

	Block 1 1:15000,RGB, 20 $\mu$ m, 21cm B/Z=1/2.55		Block 2 1:6000,SW, 15 $\mu$ m, 21cm B/Z=1/2.37		Block 3 1:4000,RGB, 30 $\mu$ m, 15cm B/Z=1/1.86		Block 4 1:4000,SW, 30 $\mu$ m, 15cm B/Z=1/1.86		Block 5 1:4000,RGB, 15 $\mu$ m, 15cm B/Z=1/1.86	
	$\sigma_{rel,B,XY}^{nL}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,Z}^{nL}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,XY}^{nL}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,Z}^{nL}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,XY}^{nL}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,Z}^{nL}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,XY}^{nL}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,Z}^{nL}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,XY}^{nL}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,Z}^{nL}$ [ $\mu$ m]
E	7.0	8.9	9.0	13.0	10.7	16.7	7.1	11.5	6.8	10.9
G	7.7	8.6	9.3	13.2	11.1	16.2	8.6	13.9	7.4	11.7
F	5.9	9.6	3.6	9.1	11.9	14.6	12.3	17.1	5.3	11.6
$\sigma_{rel,B}^{nL}$	6.9	9.0	7.8	11.9	11.3	15.9	9.6	14.3	6.5	11.4
$\sigma_{rel,B,R}^{nL}$	8.0		10.1		13.8		12.2		9.3	

Tabelle 6.3: Relative Bildmessgenauigkeit  $\sigma_{rel,B}^{nL}$  natürlicher Linien in [ $\mu$ m] im Bild

Nov., Dez. 03'	Dez., Jan. 03'/04'	Jan., Feb. 04'	Feb., März. 04'	Jul., Aug. 04'	Sep. 04'	Okt. 04'
----------------	--------------------	----------------	-----------------	----------------	----------	----------

Tabelle 6.4: Farbskala der Arbeitszeiten

hier als eine Funktion der Pixelgröße in den Abbildungen 6.7 bis 6.9 ausgedrückt. Durch eine Interpolation/Extrapolation wird die Trendkurve zwischen den Werten berechnet, die den Verlauf der Messgenauigkeit der Linien in Abhängigkeit von der Pixelgröße zeigt. Die Ordinaten in den Abbildungen zeigen das Verhältnis zwischen der erreichten Bildmessgenauigkeit und der entsprechenden Pixelgröße. Sie werden als Multiplikationsfaktoren für die entsprechenden Pixelgrößen verwendet, um auf die Messgenauigkeit - ausgedrückt in  $\mu$ m - im Bild zu kommen.

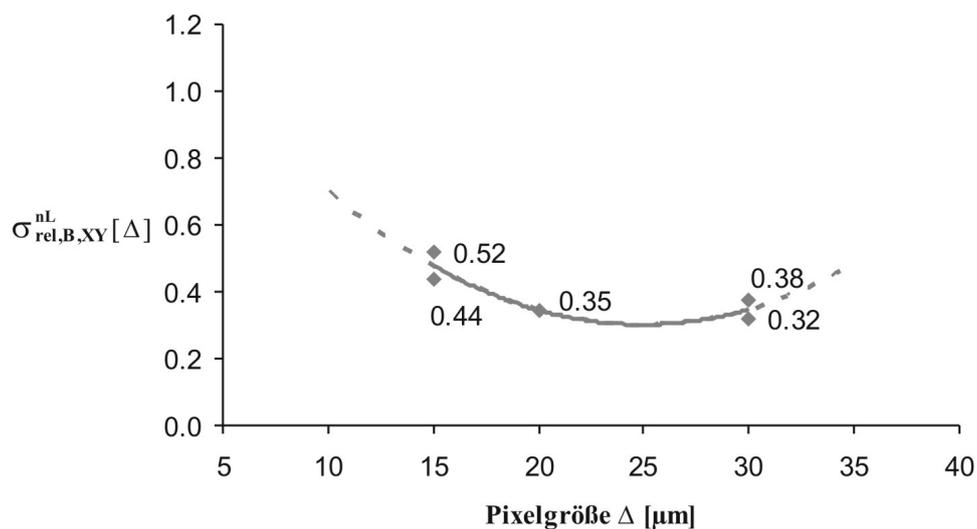


Abbildung 6.7: Einfluß der Pixelgröße auf der Lagebildmessgenauigkeit  $\sigma_{rel,B,XY}^{nL} [\Delta]$  natürlicher Linien

Die Messgenauigkeit - ausgedrückt als Anteil der Pixelgröße - wird auch bei den Linien mit Verkleinerung der Pixelgröße schlechter. Das Verhältnis der Höhengenaugigkeit zur La-

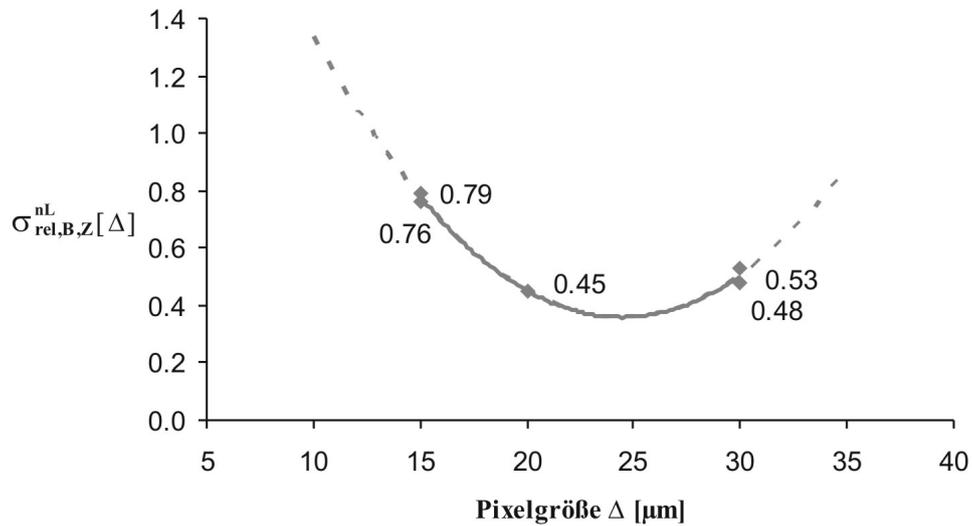


Abbildung 6.8: Einfluß der Pixelgröße auf der Höhenbildmessgenauigkeit  $\sigma_{rel,B,Z}^{NL}[\Delta]$  natürlicher Linien

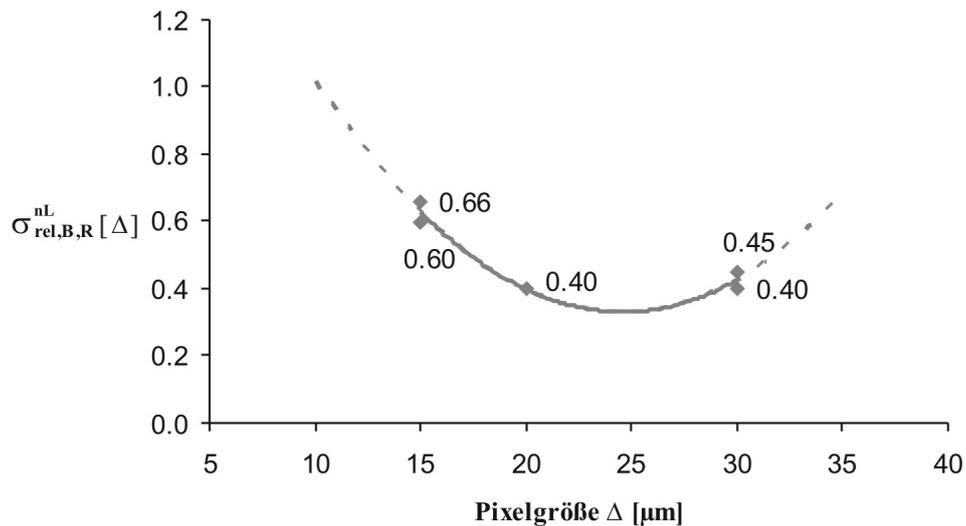


Abbildung 6.9: Einfluß der Pixelgröße auf der räumlichen Bildmessgenauigkeit  $\sigma_{rel,B,R}^{NL}[\Delta]$  natürlicher Linien

räumliche Bildmessgenauigkeit=Linienmessgenauigkeit im Bild

gegenauigkeit entspricht nicht genau dem Basis/Höhenverhältnis in dieser Untersuchung (5.2b). Folglich ist auch die pixelbezogene Höhenmessgenauigkeit im Bild (Abbildung 6.8) etwa um 30 % schlechter als die Lagemessgenauigkeit (Abbildung 6.7). Die etwa 50 %-ige Genauigkeitssteigerung in der Lage und 30 %-ige Steigerung in der Höhe durch Reduzieren der Pixelgröße entspricht einer Verschlechterung um 32 % der pixelbezogenen Messgenauigkeit im Bild, die in den Abbildungen oben durch die Multiplikationskoeffizienten zum Ausdruck kommt. (Der Prozentsatz ergibt sich aus Abbildung 6.9 mit der räumlichen Bildmessgenauigkeit der Linien.)

- c) Die Testdaten aus Tabelle 6.3 werden auf 20 µm-Pixelgröße bezogen und in Abbildung 6.10 in Abhängigkeit von der Flughöhe über Grund zusammengestellt.

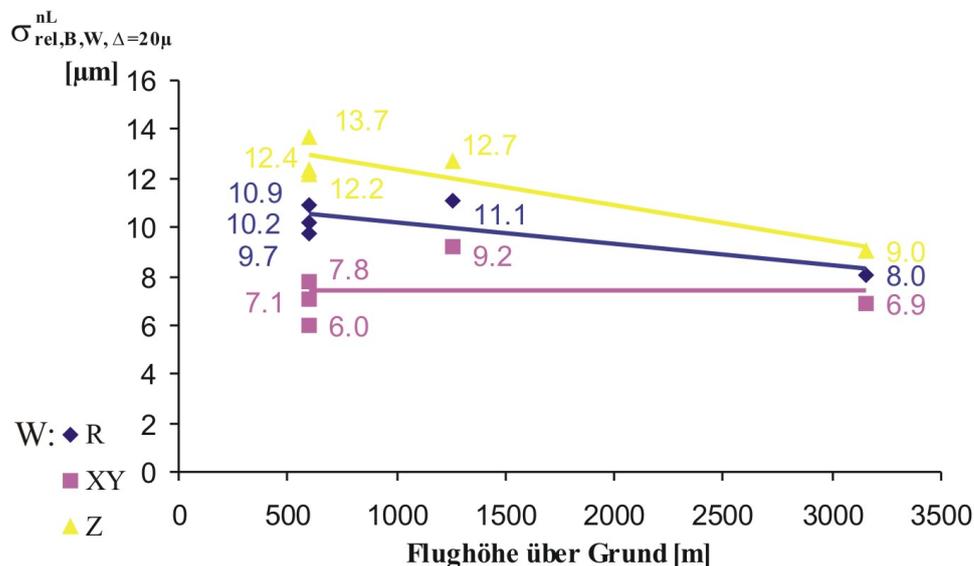


Abbildung 6.10: Einfluß der Flughöhe über Grund auf der Bildmessgenauigkeit  $\sigma_{rel,B,Z}^{nL}$  [µm] natürlicher Linien in Bildern mit 20 µm-Pixel

Auch in dieser Abbildung (Vergleich mit der Abbildung 6.4 ) sehen wir eine Verschlechterung bei den tieferen Höhen um etwa 22 % wegen der Fortbewegung des Flugzeuges .

- d) Da die meisten Messungen im Bildmaterial gemacht wurden, das einer Pixelgröße von 15 µm hat, werden die Genauigkeiten der Linienmessung im Objektraum aus der Tabelle 5.3 mit der unter b) angegebenen Abhängigkeit von der Pixelgröße auf 15 µm umgerechnet und in Abhängigkeit vom Bildmaßstab und von der Flughöhe über Grund in den nächsten Graphiken 6.11 und 6.12 gebracht. In jeder Abbildung wird durch Interpolation zwischen den Werten eine Trendlinie ermittelt.

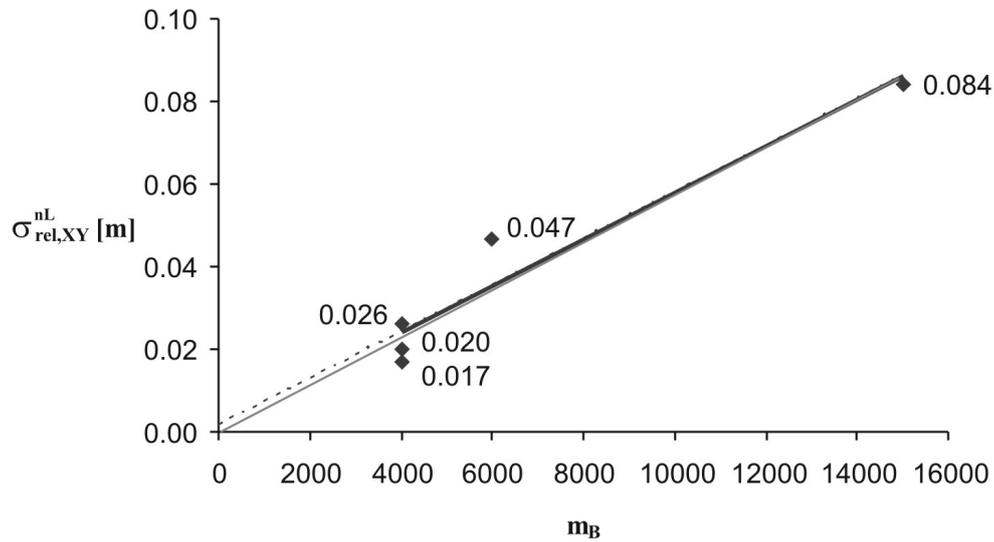


Abbildung 6.11: Die Lagegenauigkeit  $\sigma_{XY}^{nL}$  für natürliche Linien am Objekt in Abhängigkeit von der Bildmaßstabszahl für 15  $\mu m$ -Pixel

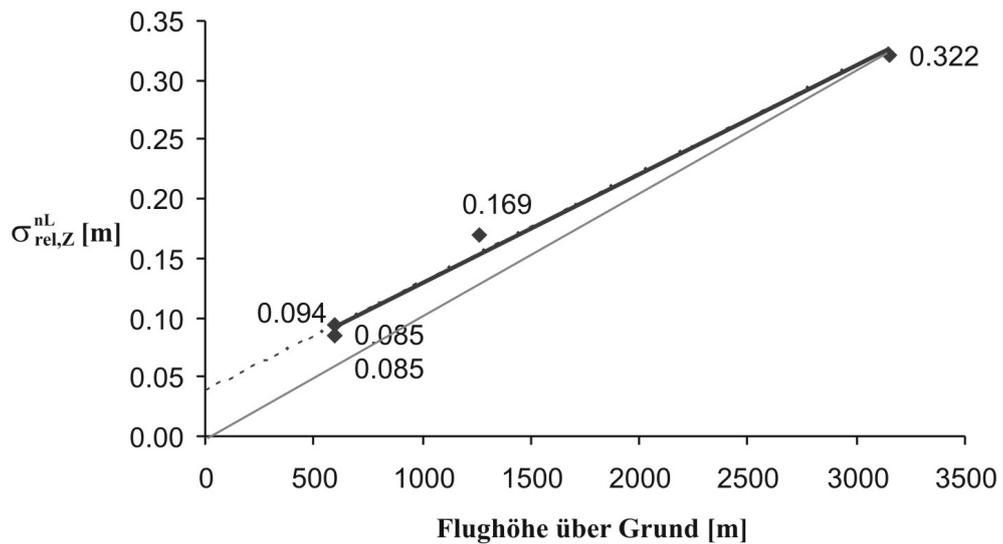


Abbildung 6.12: Die Höhengenaugigkeit  $\sigma_Z^{nL}$  für natürliche Linien am Objekt in Abhängigkeit von der Flughöhe über Grund für 15  $\mu m$ -Pixel

Beide Trendlinien zeigen eine generelle Verschlechterung der Objektgenauigkeit mit entsprechender Vergrößerung der Bildmaßstabszahl oder der Flughöhe über Grund. Die Verlängerung der Trendlinie der Lagegenauigkeit bis zur Ordinatenachse zeigt eine Versetzung um 0,2 cm vom Ursprung. Die Verlängerung der Höhengenaugkeitslinie zeigt eine Versetzung von 4 cm vom Ursprung. Aus den Abbildungen kann die Objektgenauigkeit in einem konstanten und einem von der Maßstabszahl/Flughöhe abhängigen Anteil getrennt werden:

$$\begin{aligned} \text{Lage: } \sigma_{XY}^{nL} &= \pm 0.002 \text{ m} + 5.5 \mu\text{m } m_B \\ \text{Höhe: } \sigma_Z^{nL} &= \pm 0.04 \text{ m} + 0.090 \% \text{ Flughöhe} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Für gröbere Genauigkeitsabschätzungen reichen die Ursprungsgeraden (hellgraue ausgezogene Linie in den Abbildungen 6.11 und 6.12) aus:

$$\begin{aligned} \text{Lage: } \sigma_{XY}^{nL} &= \pm 5.6 \mu\text{m } m_B \\ \text{Höhe: } \sigma_Z^{nL} &= \pm 0.102 \% \text{ Flughöhe} \end{aligned} \quad (6.5)$$

Im Abschnitt 7.2 wird eine weitere Vereinfachung vorgenommen. In Erinnerung an Formeln 2.34 und 2.35 können wir aus den in  $15 \mu\text{m}$  umgerechneten Bildmessgenauigkeiten eine allgemeine Bildmessgenauigkeit von  $8.6 \mu\text{m}$  für die Punktauswertung ausrechnen. Dabei beträgt die Bildmessgenauigkeit aus den Lagefehlern  $6 \mu\text{m}$  und aus den Höhenfehlern  $11 \mu\text{m}$ .

### 6.3 Relative Genauigkeit der manuellen digitalen Auswertung. Optimale Pixelgröße

Aufgrund des sehr geringen Unterschiedes zwischen den Resultaten für Punkte und Linien aus den entsprechenden Tabellen 6.1 und 6.3 werden diese im folgenden Abschnitt zusammengeführt. Die Genauigkeitsanalyse wird auf die übergeordnete Klasse "Manuelle digitale Auswertungen" bezogen.

#### 6.3.1 Die Pixelgröße (Optimale Pixelgröße)

Die Messgenauigkeit - ausgedrückt als Anteil der Pixelgröße - nimmt mit Verkleinerung der Pixelgröße etwas ab. Dieses Verhalten haben wir mit der Verschlechterung der radiometrischen Auflösung begründet (siehe Abschnitte 6.1c und 6.2b). Wir sind daran interessiert, die **besten geometrischen Messbedingungen** (optimale Pixelgröße für eine beste Messsicherheit) und die **besten Genauigkeitsbedingungen** (optimale Pixelgröße für beste erreichbare Messgenauigkeit im Bild) zu finden. Da der Vergleich der Werte (sowohl aus den Tabellen als auch aus den Abbildungen in den genannten Abschnitten) einen sehr geringfügigen Unterschied zeigt, wurden die Werte für die räumliche Bildmessgenauigkeit für Punkte und Linien zusammengeführt und für die gestellten Aufgaben in Abbildung 6.13 weiterverwendet.

In dieser Abbildung wurde versucht, eine optimale Pixelgröße für die beste Messsicherheit im Bild (hellgraue Kurve in der Abbildung) und eine optimale Pixelgröße für die beste Messgenauigkeit (dunkelgraue Kurve in der Abbildung) aus den Daten zu schätzen. Eine untere und

eine obere Grenze des nutzbaren Pixelgrößenbereichs ist aus den Testdaten natürlich nur "willkürlich" bestimmbar.

Durch Polynome zweiten Grades wurden die hell-/dunkelgrauen Trendlinien zwischen den Werten in Abbildung 6.13 berechnet. Durch Extrapolation sind die Genauigkeitsfunktionen "vervollständigt". Beide Kurven besitzen ein sehr flaches Minimum. Durch Differenzieren der Funktionen wurden die gesuchten Minima (optimalen Pixelgrößen) gefunden.

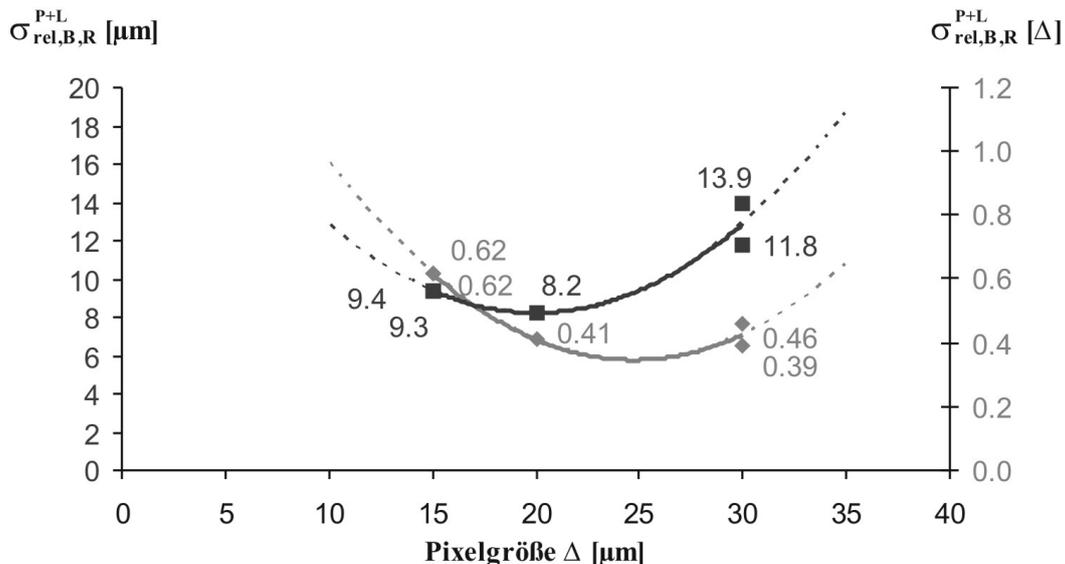


Abbildung 6.13: Genauigkeit  $\sigma_{\text{rel,B,R}}^{\text{P+L}}$  der digitalen Auswertung in Pixelgröße  $\Delta$  und in  $\mu\text{m}$  im Bild.

Optimale Pixelgröße im Bild.

Die hellgraue Kurve zeigt die **beste Messsicherheit** in Teilen des Pixels [ $\Delta$ ] im Bild. Das Minimum der Funktion ist bei **24.3  $\mu\text{m}$  Pixelgröße**. Das entspricht einem Multiplikationsfaktor<sup>4</sup> von 0.37  $\Delta$  und einer Messgenauigkeit von 9.1  $\mu\text{m}$  im Bild. Diese Pixelgröße 24.3  $\mu\text{m}$  wäre von der Ausnutzbarkeit des Informationsgehalts des Bildes her optimal.

In der Photogrammetrie sind wir mehr an der besten Genauigkeit interessiert. Die in der Abbildung 6.13 eingetragenen Bildmessgenauigkeiten in  $\mu\text{m}$  besagen, dass die **beste Messgenauigkeit** bei etwas kleinerer Pixelgröße liegt. Die dunkelgraue Kurve weist ein Minimum bei **20.0  $\mu\text{m}$  Pixelgröße** auf. Das entspricht einer "besten" Messgenauigkeit von 8.2  $\mu\text{m}$  im Bild und einen Multiplikationsfaktor von 0.41  $\Delta$ .

In [Ackerman & Krzystek, 1997]<sup>5</sup>) wird unter anderem festgestellt, dass eine Pixelgröße kleiner als 20  $\mu\text{m}$  nicht erheblich die Genauigkeit der automatischen Messung der Verknüpfungspunkte erhöht.

<sup>4</sup>Wurde in 6.1c und 6.2b ausführlicher erklärt.

<sup>5</sup>Ackerman, F. & Krzystek, P., 1997: Complete automation of digital aerial triangulation, Photogrammetric Record (15)89, S. 645-656

### 6.3.2 Die Flugdynamik

Die Messgenauigkeit in den digitalen Bildern wird auch von äußeren Faktoren wie der Flughöhe und der Flugdynamik beeinflusst. Die auf  $20\ \mu\text{m}$ -Pixelgröße bezogenen Testdaten für Punkte und Linien werden in Abbildung 6.14 in Abhängigkeit von der Flughöhe über Grund zusammengestellt.

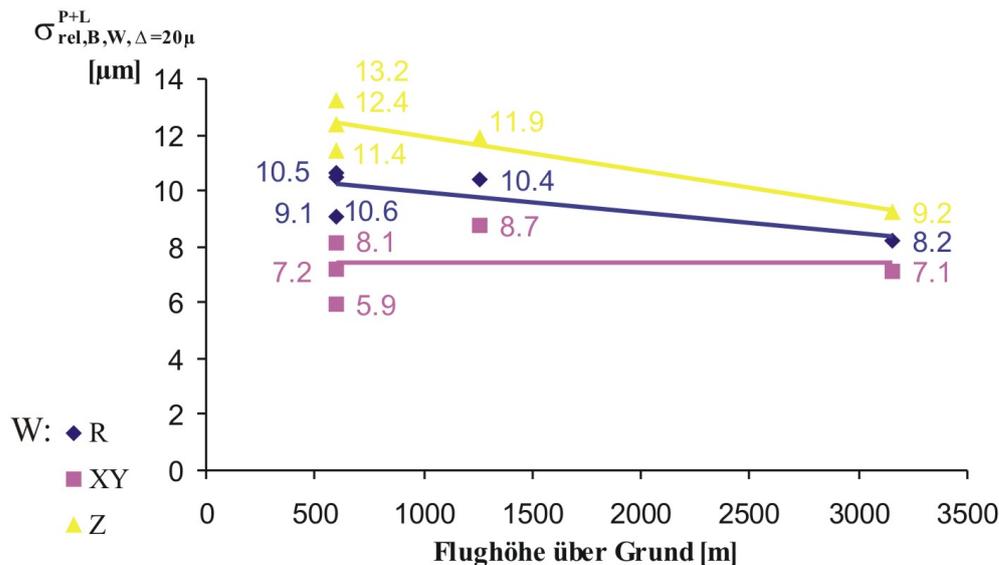


Abbildung 6.14: Einfluss der Flughöhe über Grund auf der Bildmessgenauigkeit  $\sigma_{rel,B,Z}^{P+L}$  [  $\mu\text{m}$  ] digitaler Auswertungen in Bildern mit  $20\ \mu\text{m}$ -Pixel

Wir sehen eine Verschlechterung bei den tieferen Höhen um etwa 22 % wegen der Flugdynamik. Die Bewegungsunschärfe ist der wesentliche Anteil davon und wird zwar während des Fluges bei den neusten Luftbildmesskameras beseitigt. Es verbleiben aber noch die anderen Einflüsse auf die Bewegungsunschärfe (z.B die drei Rotationen des Flugzeuges, die Geländehöhenunterschiede, die Schwankungen in der Fluggeschwindigkeit, etc.). Diese Einflüsse sind insbesondere bei niedrigen Flughöhen sehr stark zu spüren.

### 6.3.3 Der Maßstab und die Flughöhe über Grund

Da die meisten Messungen im Bildmaterial gemacht wurden, das  $15\ \mu\text{m}$  Pixelgröße hatte, werden die Genauigkeiten der Punkt- und Linienmessung im Objektraum aus den Tabellen 5.1 und 5.3 mit der unter 6.1c) und 6.2b) angegebenen Abhängigkeit von der Pixelgröße auf  $15\ \mu\text{m}$  umgerechnet und in Abhängigkeit vom Bildmaßstab und von der Flughöhe über Grund in den nächsten Graphiken 6.15 und 6.16 gebracht. In jeder Abbildung wird durch Interpolation zwischen den Werten eine Trendlinie ermittelt.

Beide Trendlinien zeigen eine **generelle Verschlechterung der Objektgenauigkeit** einer digitalen Auswertung **mit entsprechender Vergrößerung der Bildmaßstabszahl oder der Flughöhe über Grund**. Die Verlängerung der Trendlinie der Lagegenauigkeit bis zur Ordinatenachse

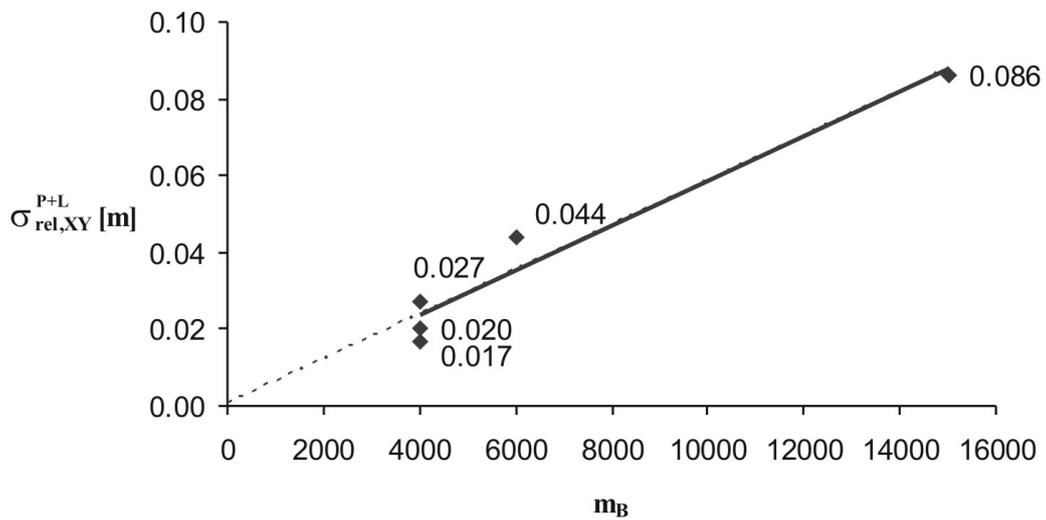


Abbildung 6.15: Die Lagegenauigkeit  $\sigma_{XY}^{P+L} [m]$  digitaler Auswertungen in Abhängigkeit von der Bildmaßstabszahl in Bildern mit  $15 \mu m$ -Pixel

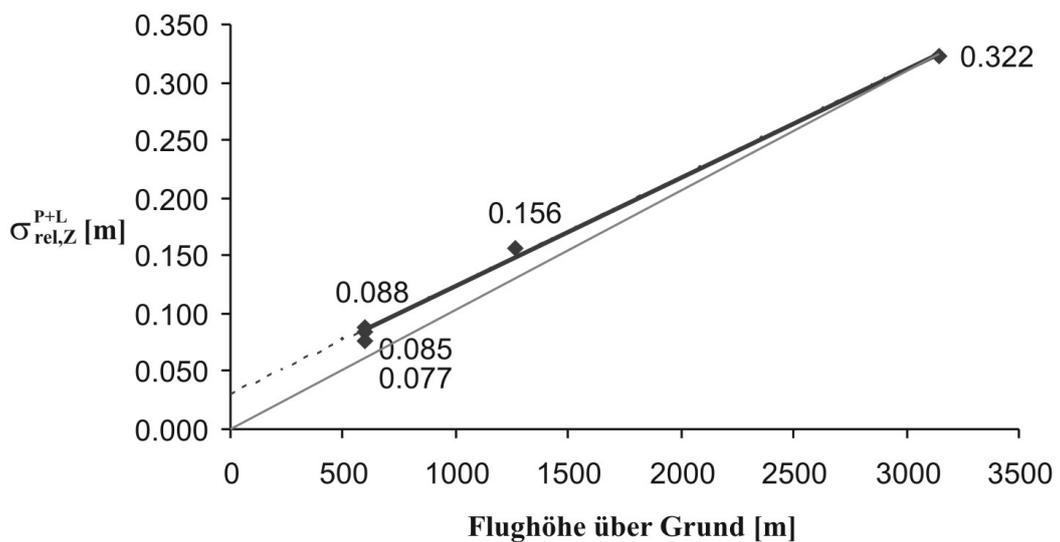


Abbildung 6.16: Die Höhengengenauigkeit  $\sigma_Z^{P+L} [m]$  digitaler Auswertungen in Abhängigkeit von der Flughöhe über Grund in Bildern mit  $15 \mu m$ -Pixel

zeigt eine Versetzung um 0.1 cm vom Ursprung. Die Verlängerung der Höhengenaugkeitslinie zeigt eine Versetzung von 3 cm vom Ursprung. Aus den Abbildungen kann die Objektgenauigkeit in einem konstanten und einem von der Maßstabszahl/Flughöhe abhängigen Anteil getrennt werden:

$$\begin{aligned} \text{Lage: } \sigma_{XY}^{P+L} &= \pm 0.001 \text{ m} + 5.6 \mu\text{m } m_B \\ \text{Höhe: } \sigma_Z^{P+L} &= \pm 0.03 \text{ m} + 0.093 \text{ ‰ Flughöhe} \end{aligned} \quad (6.6)$$

Für etwas gröbere Genauigkeitsabschätzungen reichen auch die Gleichungen mit der Ursprungsgeraden (hellgraue ausgezogene Linie in den Abbildungen 6.15 und 6.16) aus:

$$\begin{aligned} \text{Lage: } \sigma_{XY}^{P+L} &= \pm 5.7 \mu\text{m } m_B \\ \text{Höhe: } \sigma_Z^{P+L} &= \pm 0.102 \text{ ‰ Flughöhe} \end{aligned} \quad (6.7)$$

Bei der getrennten Punkt- und Linienanalyse haben wir zwei Werte für die allgemeine Bildmessgenauigkeit bekommen. An dieser Stelle können wir die Zahlen mitteln und einen charakteristischen Wert für die generelle Bildmessgenauigkeit von  $8.3 \mu\text{m}$  im Bild angeben. Dieser Zahl liegen  $15 \mu\text{m}$ -Pixel zugrunde.

Aus Abbildung 6.13 können wir aber für  $15 \mu\text{m}$  eine Messgenauigkeit von  $9.3 \mu\text{m}$  ablesen. Der Unterschied von  $1 \mu\text{m}$ , kommt daher, dass sich der Wert in dieser Abbildung nur auf zwei Blöcke bezieht. Im Gegensatz dazu sind die  $8.3 \mu\text{m}$  eine repräsentative Zahl für alle unsere Auswertungen mit  $15 \mu\text{m}$  Pixelgröße. Sie ist viel stärker mit dem Datensatz verbunden als die  $9.3 \mu\text{m}$ .

Für gröbere (a-priori) Abschätzungen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Pixelgrößen können wir die Abbildung 6.13 verwenden.

## 6.4 Absolute Genauigkeit der manuellen digitalen Auswertung

Da wir in den vorigen Abschnitten zu der Schlussfolgerung gekommen sind, dass die Punkt- und Linienauswertungen die gleiche relative Genauigkeit haben und zu der Klasse "digitale Auswertung" zusammengehören, werden auch die absoluten Genauigkeiten der Linien auf die übergeordnete Klasse bezogen. In der Tabelle 6.5 sind die absoluten Gesamtkoordinatenfehler aus Tabelle 5.5 mit den Übergangsformeln 2.36 auf das Bild bezogen. In Tabelle 6.6 sind nur die zufälligen Fehler aus Tabelle 5.6 nach der Elimination des systematischen Anteils auf das Bild bezogen.

	Block 3 1:4000,RGB,30 $\mu$ m, 15cm B/Z=1/1.86		Block 4 1:4000,SW,30 $\mu$ m, 15cm B/Z=1/1.86		Block 5 1:4000,RGB,15 $\mu$ m, 15cm B/Z=1/1.86	
	$\sigma_{abs,B,XY}^{nL}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{abs,B,Z}^{nL}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{abs,B,XY}^{nL}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{abs,B,Z}^{nL}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{abs,B,XY}^{nL}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{abs,B,Z}^{nL}$ [ $\mu$ m]
18 <sup>G</sup>	28.3	22.3	30.0	17.0	31.3	13.3
32 <sup>E</sup>	8.8	16.2	11.8	14.9	19.8	18.9
33 <sup>E</sup>	12.3	19.5	9.0	17.2	5.3	18.9
35 <sup>G</sup>	23.8	17.2	16.8	13.7	7.8	16.5
40 <sup>G</sup>	32.8	17.2	28.5	12.6	23.5	18.0
43 <sup>E</sup>	15.0	10.7	15.3	11.1	24.3	13.3
46 <sup>G</sup>	26.5	15.4	23.3	12.3	8.8	16.9
51 <sup>G</sup>	11.0	24.4	12.0	14.6	26.0	13.4
$\sigma_{abs,B}^{nL}$	21.5	18.3	19.8	14.3	20.5	16.3

**Tabelle 6.5:** Absolute Bildmessgenauigkeit  $\sigma_{abs,B}^{nL}$  der digital gemessenen Linien in [ $\mu$ m] im Bild

	Block 3 1:4000,RGB,30 $\mu$ m, 15cm B/Z=1/1.86		Block 4 1:4000,SW,30 $\mu$ m, 15cm B/Z=1/1.86		Block 5 1:4000,RGB,15 $\mu$ m, 15cm B/Z=1/1.86	
	$\sigma_{abs,B,XY}^{nL,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{abs,B,Z}^{nL,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{abs,B,XY}^{nL,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{abs,B,Z}^{nL,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{abs,B,XY}^{nL,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{abs,B,Z}^{nL}$ [ $\mu$ m]
18 <sup>G</sup>	13.5	22.1	14.5	16.9	16.0	12.7
32 <sup>E</sup>	4.5	13.8	5.0	10.9	2.8	9.1
33 <sup>E</sup>	7.8	16.4	7.5	11.1	9.5	9.1
35 <sup>G</sup>	11.3	17.2	7.8	11.9	4.5	10.5
40 <sup>G</sup>	17.5	17.2	13.5	11.5	10.3	17.8
43 <sup>E</sup>	8.8	10.3	8.8	10.5	12.0	12.2
46 <sup>G</sup>	10.8	14.4	9.8	11.3	5.0	8.6
51 <sup>G</sup>	6.5	17.0	7.0	13.0	10.3	11.1
$\sigma_{abs,B}^{nL,zuf}$	10.8	16.4	9.7	12.3	9.7	11.7

**Tabelle 6.6:** Zufällige Fehler  $\sigma_{abs,B}^{nL,zuf}$  der digital gemessenen Linien in [ $\mu$ m] im Bild

Zum Vergleich wird auch die relative Genauigkeit dieser Linien in der Tabelle 6.7 dargestellt.

	Block 3 1:4000,RGB,30 $\mu$ m, 15cm B/Z=1/1.86		Block 4 1:4000,SW,30 $\mu$ m, 15cm B/Z=1/1.86		Block 5 1:4000,RGB,15 $\mu$ m, 15cm B/Z=1/1.86	
	$\sigma_{rel,B,XY}^{nL}$	$\sigma_{rel,B,Z}^{nL}$	$\sigma_{rel,B,XY}^{nL}$	$\sigma_{rel,B,Z}^{nL}$	$\sigma_{rel,B,XY}^{nL}$	$\sigma_{rel,B,Z}^{nL}$
	[ $\mu$ m]	[ $\mu$ m]	[ $\mu$ m]	[ $\mu$ m]	[ $\mu$ m]	[ $\mu$ m]
18 <sup>G</sup>	8.5	18.4	6.8	14.1	6.8	11.0
32 <sup>E</sup>	8.0	18.6	6.3	12.6	4.8	2.5
33 <sup>E</sup>	28.3	12.3	9.5	13.3	7.0	10.6
35 <sup>G</sup>	10.0	15.7	7.8	12.6	5.8	8.6
40 <sup>G</sup>	13.3	15.6	10.8	11.9	10.0	17.2
43 <sup>E</sup>	9.8	9.3	9.3	10.2	8.5	11.1
46 <sup>G</sup>	10.8	15.6	7.5	9.7	5.8	8.3
51 <sup>G</sup>	10.8	16.6	10.3	13.7	9.0	11.9
$\sigma_{rel,B}^{nL}$	13.9	15.5	8.6	12.3	7.4	10.9

**Tabelle 6.7:** Relative Genauigkeit  $\sigma_{rel,B}^{nL}$  der digital gemessenen Linien in [ $\mu$ m] im Bild

- a) Aus dem Vergleich der Tabellen 6.6 und 6.7 stellen wir fest, dass die zufälligen Genauigkeiten (aus den absoluten Genauigkeiten abgespalten) und relativen Genauigkeiten der digitalen Auswertungen im selben Bereich liegen.
- b) Aus Tabellen 6.5 und 6.6 stellen wir einen relativ großen systematischen Fehler und einen kleinen zufälligen Fehler fest. Die Daten haben eine große Schwankung (mit einer Breite bis etwa 12  $\mu$ m); sie sind aber auch um etwa 18  $\mu$ m um den "wahren Wert" versetzt.
- c) Aus dem Vergleich der Tabellen 6.6 und 6.7 stellen wir fest, dass die ebenen Linien (die Liniennummern in den Tabellen sind mit "E" bezeichnet) selbstverständlich eine bessere Höhendefinition haben. Sie haben auch eine bessere absolute Lagegenauigkeit, aber ihre relative Lagegenauigkeit ist viel schlechter, was eigentlich für eine schlechte Lagedefinition im Bild und somit für eine große systematische Versetzung spricht.
- d) Die Mehrzahl der untersuchten Linien sind die Gehsteige, deren Nummern in den Tabellen mit "G" bezeichnet sind. Sie zeigen in den drei Modellen ein konstantes Verhalten bezüglich ihrer Genauigkeit.

## 6.5 Genauigkeit der halbautomatischen Linienextraktion

### 6.5.1 Reproduzierbarkeit

Die Werte aus Tabelle 5.7 sind in der Abbildung 6.17 in Zusammenhang mit der Pixelgröße dargestellt. Durch Interpolation/Extrapolation ist eine Trendkurve berechnet, die die Wiederholungsmöglichkeit der Snakes bei verschiedenen Pixelgrößen zeigt.

Wenn wir uns nur die Werte ansehen, stellen wir bei konstanten Messbedingungen im jeweiligen Block eine große Wiederholungsmöglichkeit (kleine Zahlen in der Graphik = kleine Anteile der Pixelgröße) fest.

Wenn wir annehmen, dass das Rauschen der Bilder durch die Filterung schon berücksichtigt wurde und dass die Resultate davon unabhängig sind, ergibt sich von der Trendkurve, dass

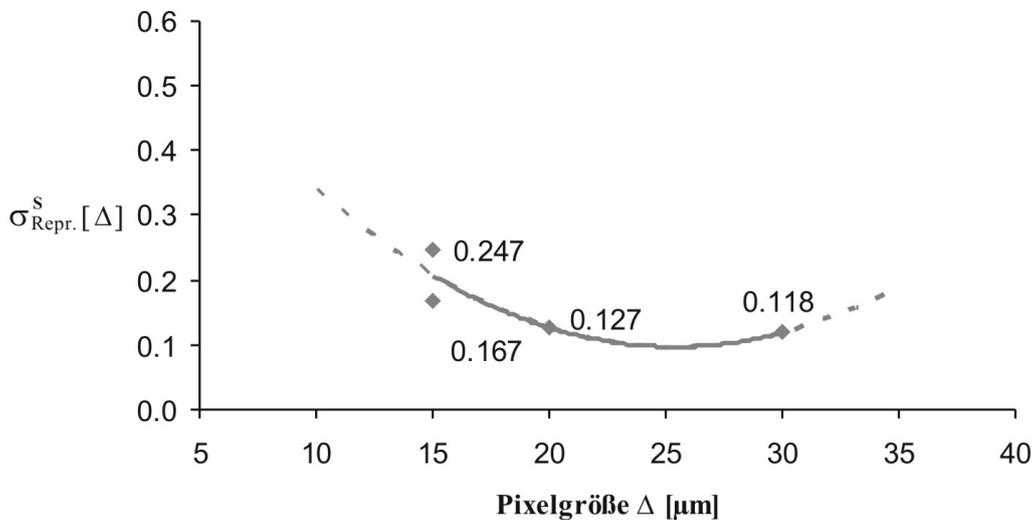


Abbildung 6.17: Die Reproduzierbarkeit der Snakes  $\sigma_{\text{Repr.}}^{\text{snake}}$  in [Teile der Pixelgröße]

die **25.9  $\mu\text{m}$  Pixelgröße** die besten Messbedingungen bieten, m.a.w. die **Messsicherheit am höchsten** war.

Das Rauschen ist ein Teil der Bildqualität. Darunter versteht man noch Schärfe, Helligkeit, Tonalität und Auflösung. Die Messbedingungen, bei denen eine Linie im halbautomatischen Snake-Modus gefunden wird, sind in Wirklichkeit stark mit der gesamten Bildqualität verbunden. Wenn wir von optimaler Pixelgröße sprechen, bei der die beste Wiederholbarkeit erzielt wird, muss klar sein, dass wir es mit einer Gruppe von Faktoren zu tun haben (dazu gehört auch die Pixelgröße), die schwer voneinander getrennt werden können und durch diese die angesprochenen Messbedingungen in jedem Bildverband anders sind. In dieser Untersuchung wurde nur am Rauschen gearbeitet. Die anderen Einflußfaktoren bleiben unverändert. Die Resultate, die hier gezeigt werden, sind also nur mit dem vorhandenen Bildmaterial zu verbinden. Mit anderen Bildern könnte eine andere optimale Pixelgröße herauskommen werden, weil wir andere Messbedingungen haben werden.

## 6.5.2 Relative Genauigkeit mit manuellen Splines als Referenz. Optimale Pixelgröße

Mit den Übergangsformeln aus Abschnitt 2.6 werden die unregelmäßigen Anteile der relativen Genauigkeit aus der Tabelle 5.11 in der Tabelle 6.8 auf das Bild bezogen. Die Daten sind sehr unzureichend, um Schlüsse über die relative Snake-Genauigkeit sowohl am Objekt als auch im Bild zu ziehen. Die Resultate geben uns nur eine grobe Vorstellung in welchem Bereich wir uns mit den Snakes befinden. Durch möglichst genau angepasste Methoden und ausreichende Untersuchungen, könnte man diese Genauigkeitsangaben präzisieren. Aus den dargestellten Tabellen stellen wir folgendes fest:

	Block 1 1:15000,RGB, 20 $\mu$ m, 21cm B/Z=1/2.55		Block 2 1:6000,SW, 15 $\mu$ m, 21cm B/Z=1/2.37		Block 3 1:4000,RGB, 30 $\mu$ m, 15cm B/Z=1/1.86		Block 5 1:4000,RGB, 15 $\mu$ m, 15cm B/Z=1/1.86	
	$\sigma_{rel,B,XY}^{S,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,Z}^{S,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,XY}^{S,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,Z}^{S,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,XY}^{S,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,Z}^{S,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,XY}^{S,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,Z}^{S,zuf}$ [ $\mu$ m]
E	12.2	8.8	8.3	15.1	12.2	14.3	8.6	15.8
G					4.9	17.2	4.4	16.1
$\sigma_{rel,B}^S$	12.2	8.8	8.3	15.1	9.3	15.8	6.8	16.0
$\sigma_{rel,B,R}^S$	8.8		12.2		13.0		12.3	

**Tabelle 6.8:** Relative Bildmessgenauigkeit  $\sigma_{rel,B}^{S,zuf}$  der Snake-Linien in [ $\mu$ m] im Bild

- Die Lagebildmessgenauigkeit im Block 1 ist viel schlechter als die Höhenmessgenauigkeit, was nicht möglich erscheint. Das ist möglicherweise ein Zufallsergebnis wegen geringer Linienanzahl. Davon können wir uns aus dem Anhang D.2.1, Tabelle D.5, überzeugen. Die angesprochene Lagebildmessgenauigkeit ist zwar in der Tabelle 6.8 gezeigt, wird aber im Folgenden nicht weiter verwendet.
- Die Pixelgröße von 15  $\mu$ m gegenüber einer Pixelgröße von 30  $\mu$ m kann eine Genauigkeitssteigerung von 13 % in der Lage und 11 % in der Höhe bewirken. (Die Prozentsätze ergeben sich aus dem Vergleich von Block 3 und Block 5 für beide Linienarten.)
- Die Messgenauigkeiten aus der Tabelle 6.8 werden als eine polynomiale Funktion der Pixelgröße in den Abbildungen 6.18 bis 6.20 ausgedrückt. Da die Lagemessgenauigkeit im Block 1 entfernt wurde, ist diese Bildmessgenauigkeit als eine lineare Funktion der Pixelgröße in Abbildung 6.18 dargestellt. Die Trendkurven zwischen den Werten zeigen den Verlauf der Messgenauigkeit der Linien in Abhängigkeit von der Pixelgröße. Die Ordinaten in den Abbildungen zeigen das Verhältnis zwischen der erreichten Bildmessgenauigkeit und der entsprechenden Pixelgröße. Sie werden als Multiplikationsfaktoren für die entsprechenden Pixelgrößen verwendet, um auf die Messgenauigkeit - ausgedrückt in  $\mu$ m - im Bild zu kommen.

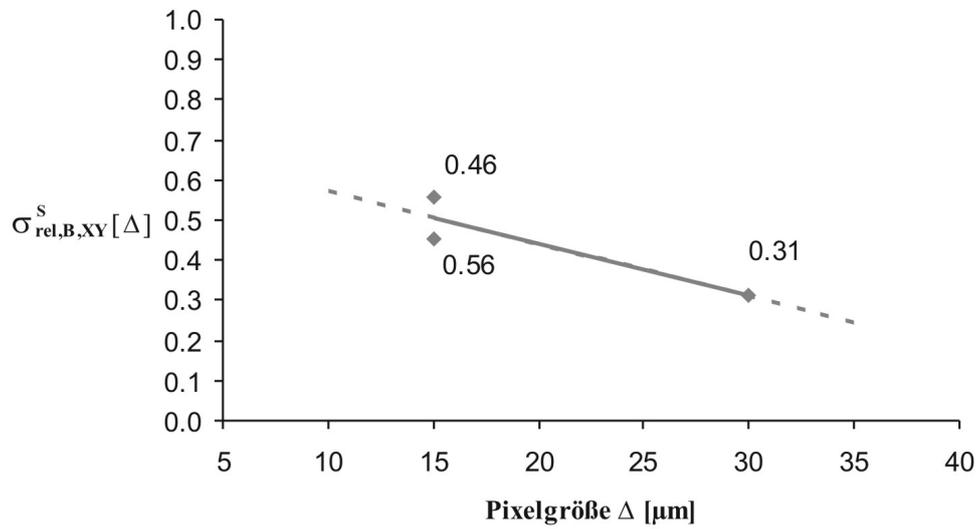


Abbildung 6.18: Einfluß der Pixelgröße auf der Lagebildmessgenauigkeit  $\sigma_{\text{rel,B,XY}}^S [\Delta]$  der Snake-Linien

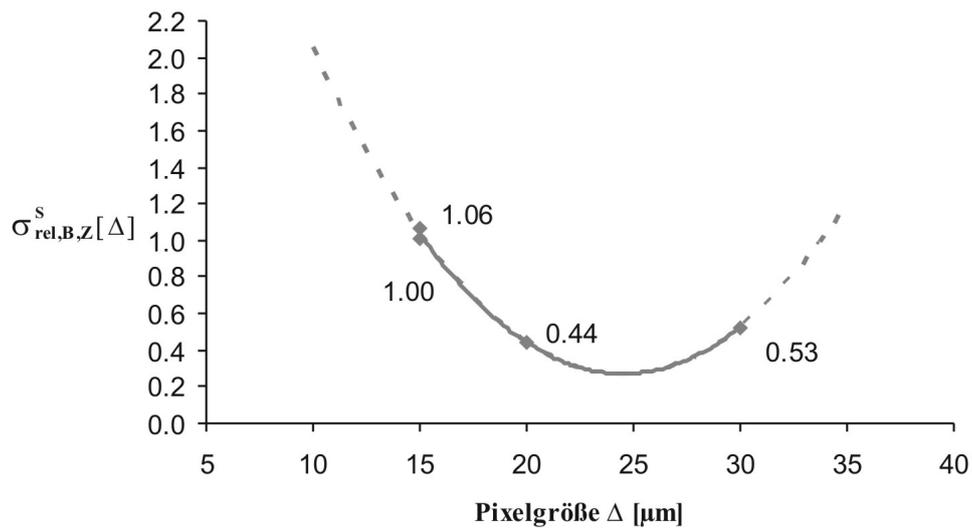
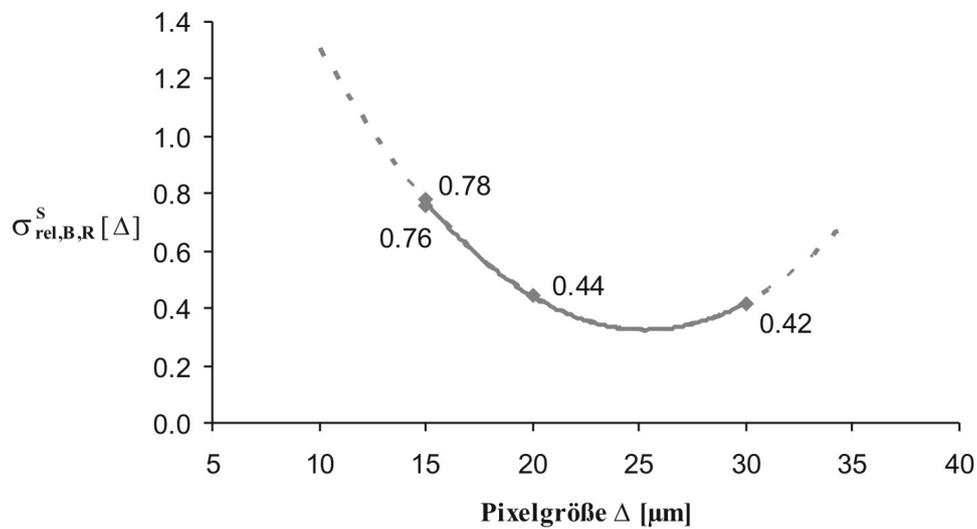


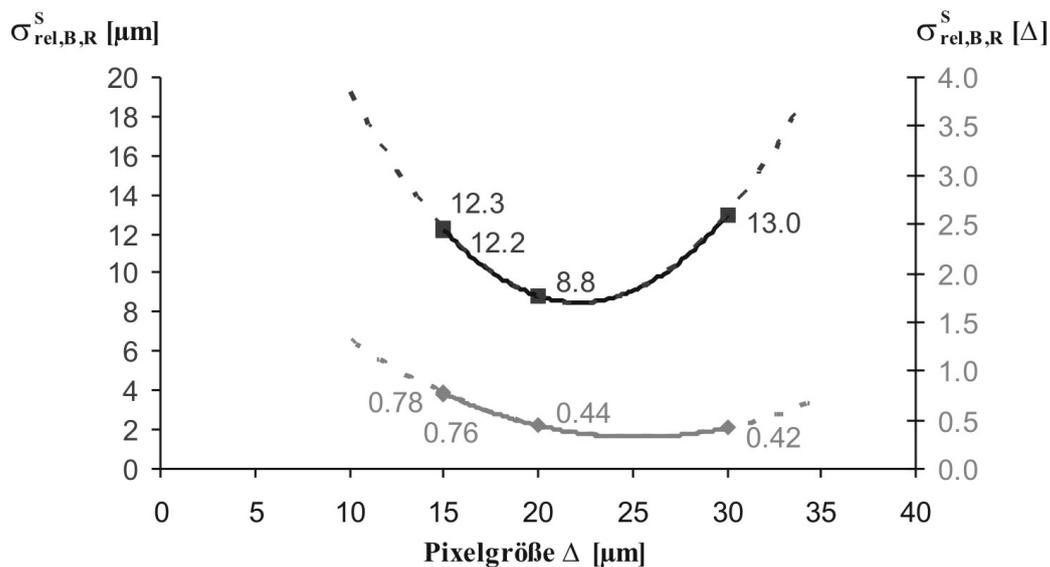
Abbildung 6.19: Einfluß der Pixelgröße auf der Höhenbildmessgenauigkeit  $\sigma_{\text{rel,B,Z}}^S [\Delta]$  der Snake-Linien



*Abbildung 6.20: Einfluß der Pixelgröße auf der räumlichen Bildmessgenauigkeit  $\sigma_{\text{rel,B,R}}^S$  [ $\Delta$ ] der Snake-Linien*  
*räumliche Bildmessgenauigkeit=Linienmessgenauigkeit im Bild*

Die Messgenauigkeit - ausgedrückt als Anteil der Pixelgröße - wird auch bei den Snakes mit Verkleinerung der Pixelgröße schlechter. Die etwa 13 %-ige Genauigkeitssteigerung in der Lage und 11 %-ige Steigerung in der Höhe am Objekt durch Reduzieren der Pixelgröße bewirkt eine Verschlechterung um etwa 39 % in der Lage und um etwa 48 % in der Höhe der pixelbezogenen Bildmessgenauigkeit, die in den Abbildungen oben durch die Multiplikationskoeffizienten zum Ausdruck kommt. Diese Vergrößerung der Multiplikationsfaktoren mit Verkleinerung der Pixelgröße haben wir mit der Vergrößerung des Rauschannteils im Bild bei einer Verbesserung der Pixelgröße erklärt. Die Multiplikationskoeffizienten in Abbildung 6.20 zeigen eine erstaunliche Ähnlichkeit mit den anderen (in [ $\Delta$ ] ausgedrückt) Multiplikationskoeffizienten in Abbildung 6.13 für manuelle digitale Auswertungen.

- d) So, wie im Abschnitt 6.3.1 erklärt, wird auch hier versucht eine optimale Pixelgröße für die beste Messgenauigkeit und die beste Messsicherheit in der folgenden Abbildung 6.21 zu finden.



**Abbildung 6.21:** Genauigkeit  $\sigma_{\text{rel,B,R}}^S$  Snake-Auswertung in Pixelgröße  $\Delta$  und in  $\mu\text{m}$  im Bild. Optimale Pixelgröße im Bild.

Aus der hellgrauen Trendlinie (berechnet aus den Werten der Bildmessgenauigkeit, dargestellt in Anteilen der Pixelgröße  $\Delta$ ) ergibt sich, dass mit der Snake-Methode die höchste Messsicherheit bei  $25.4 \mu\text{m}$  Pixelgröße erreicht wurde. Im vorherigen Abschnitt 6.5.1 wurde aus der Kurve der Reproduzierbarkeit der Snake-Methode festgestellt, dass eine beste Messsicherheit bei  $25.9 \mu\text{m}$  Pixelgröße erreicht wurde. Die beiden Zahlen passen sehr gut zusammen. Deren Mittelung ergibt eine **beste Messsicherheit bei  $25.7 \mu\text{m}$  Pixelgröße**. Das entspricht einem Multiplikationsfaktor von  $0.32 \Delta$  und einer Messgenauigkeit von  $9.3 \mu\text{m}$  im Bild.

Die **beste Messgenauigkeit** wurde bei  $22.2 \mu\text{m}$  Pixelgröße gefunden. Das ist aus der dunkelgrauen Kurve, die von den Werten der Bildmessgenauigkeit in  $\mu\text{m}$  berechnet wurde, ersichtlich. Diese Pixelgröße entspricht einer "besten" Messgenauigkeit von  $8.5 \mu\text{m}$  im Bild.

Da wir im Abschnitt a) festgestellt haben, dass wir die relative Bildmessgenauigkeit im Block 1 aufgrund der unzureichenden Testdaten eliminiert haben, dürfen wir die hier ermittelten Zahlen nur sehr experimentell betrachten. Für die Beantwortung der Frage der optimalen Pixelgröße werden wir daher nur die Resultate aus den manuellen Messungen heranziehen.

- e) Der Vergleich der Abbildung 6.20 mit 6.9 zeigt noch einmal eine große Übereinstimmung, die uns das Gefühl gibt, dass die Snakes genauso gut sind wie die manuellen digitalen Auswertungen.
- f) Die Bildmessgenauigkeit für  $20 \mu\text{m}$ -Pixel bei der halbautomatischen Methode (obwohl sehr experimentell betrachtet), haben wir festgestellt, liegt bei etwa  $9 \mu\text{m}$ . Bei der manuellen Auswertemethode liegt sie im selben Bereich - bei etwa  $8 \mu\text{m}$ . In Erinnerung an der automatischen Punktbestimmung (Abschnitt 1.2.1), wo wir gesagt haben, dass man eine Genauigkeit

von 3-4  $\mu\text{m}$  bei 22  $\mu\text{m}$ -Pixel erreichen kann, und nachdem wir die manuelle Punkt- und Linienauswertung in eine Gruppe zusammengefasst haben, können wir grob feststellen, dass die automatische Punktbestimmung noch doppelt so gut ist, wie unsere manuelle und halb-automatische Auswertung.

### 6.5.3 Absolute Genauigkeit der Snake-Linien mit terrestrischen Messungen als Referenz. Vergleich mit anderen relativen und absoluten Genauigkeiten

In der Tabelle 6.9 sind die absoluten Gesamtkoordinatenfehler aus Tabelle 5.12 auf das Bild bezogen. In Tabelle 6.10 sind nur die zufälligen Fehler aus Tabelle 5.13 nach der Elimination des systematischen Anteils auf das Bild bezogen. In Tabelle 6.11 sind die relativen zufälligen Fehler der betroffenen 3 Snake-Linien (mit Splines als Referenzmessung) zum Vergleich gezeigt. In Tabelle 6.12 sind die zufälligen Anteile des absoluten Gesamtkoordinatenfehlers der 3 manuell gemessenen Linien in  $[\mu\text{m}]$  noch einmal gezeigt. Diese Werte sind aus der Tabelle 5.6 entnommen.

	Block 3 1:4000,RGB, 30 $\mu\text{m}$ , 15cm B/Z=1/1.86		Block 5 1:4000,RGB, 15 $\mu\text{m}$ , 15cm B/Z=1/1.86	
	$\sigma_{abs,B,XY}^S$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\sigma_{abs,B,Z}^S$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\sigma_{abs,B,XY}^S$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\sigma_{abs,B,Z}^S$ [ $\mu\text{m}$ ]
32 <sup>E</sup>	27.5	14.1	26.8	22.7
33 <sup>E</sup>	6.8	20.5	6.0	38.9
35 <sup>G</sup>	25.8	13.1	11.3	31.8
$\sigma_{asb,B}^S$	22.1	16.3	17.1	31.8

**Tabelle 6.9:** Absoluter Gesamtkoordinatenfehler  $\sigma_{abs,B}^S$  der Snake-Linien in  $[\mu\text{m}]$  im Bild

	Block 3 1:4000,RGB, 30 $\mu\text{m}$ , 15cm B/Z=1/1.86		Block 5 1:4000,RGB, 15 $\mu\text{m}$ , 15cm B/Z=1/1.86	
	$\sigma_{abs,B,XY}^{S,zuf}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\sigma_{abs,B,Z}^{S,zuf}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\sigma_{abs,B,XY}^{S,zuf}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\sigma_{abs,B,Z}^{S,zuf}$ [ $\mu\text{m}$ ]
32 <sup>E</sup>	2.8	9.3	4.5	4.8
33 <sup>E</sup>	8.8	20.5	6.3	8.9
35 <sup>G</sup>	4.0	13.0	3.3	13.1
$\sigma_{abs,B}^{S,zuf}$	5.8	15.0	4.8	9.6

**Tabelle 6.10:** Zufällige Anteile des Absolutfehlers  $\sigma_{abs,B}^{S,zuf}$  der Snake-Linien in  $[\mu\text{m}]$  im Bild

	Block 3 1:4000,RGB,30 $\mu$ m,15cm B/Z=1/1.86		Block 5 1:4000,RGB,15 $\mu$ m,15cm B/Z=1/1.86	
	$\sigma_{rel,B,XY}^{S,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,Z}^{S,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,XY}^{S,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{rel,B,Z}^{S,zuf}$ [ $\mu$ m]
32 <sup>E</sup>	11.0	9.0	3.3	4.6
33 <sup>E</sup>	17.8	14.4	5.5	7.4
35 <sup>G</sup>	6.8	15.8	6.3	12.2
$\sigma_{rel,B}^{S,zuf}$	12.7	13.4	5.2	8.6

Tabelle 6.11: Zufällige Anteile des relativen Fehlers  $\sigma_{rel,B}^{S,zuf}$  der Snake-Linien in [ $\mu$ m] im Bild

	Block 3 1:4000,RGB,30 $\mu$ m,15cm B/Z=1/1.86		Block 5 1:4000,RGB,15 $\mu$ m,15cm B/Z=1/1.86	
	$\sigma_{abs,B,XY}^{nL,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{abs,B,Z}^{nL,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{abs,B,XY}^{nL,zuf}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{abs,B,Z}^{nL,zuf}$ [ $\mu$ m]
32 <sup>E</sup>	4.5	10.9	2.8	9.1
33 <sup>E</sup>	7.8	11.1	9.5	9.1
35 <sup>G</sup>	11.3	11.9	4.5	10.5
$\sigma_{abs,B}^{nL,zuf}$	8.3	15.9	6.3	9.6

Tabelle 6.12: Zufällige Anteile des Absolutfehlers  $\sigma_{abs,B}^{nL,zuf}$  der manuell gemessenen 3 Linien in [ $\mu$ m] im Bild

- a) Aus den Tabellen 6.9 bis 6.11 ist ein kleiner zufälliger und ein großer systematischer Fehler festzustellen. Das heißt, dass die Daten eigentlich gering schwanken, aber dass sie etwa um 20  $\mu$ m um den wahren Wert versetzt sind. Eine genauere Analyse (durch Anwendung prinzipiell verschiedener Bestimmungsmethoden unterstützt durch mehr Vergleichs-, Kontroll- und Probemessungen) der systematischen Einflüsse bei der Snake-Methode, wird zu einer etwas genaueren Erkennung des systematischen Anteils führen, der bei eventuellen zukünftigen Koordinatenbestimmungen durch Snakes berücksichtigt werden kann. Wenn wir diese Versetzung durch den schwer fassbaren systematischen Fehler reduzieren können, wir auf eine sehr zufriedenstellende Genauigkeit dieser Methode.
- b) Wenn wir Tabelle 6.10 (letzte Zeile) mit Tabelle 6.8 (die letzte Zeile für Blöcke 3 und 5) vergleichen, sehen wir, dass sich die relativen zufälligen Fehler nur sehr gering von den aus den absoluten Fehlern abgespaltenen zufälligen Fehlern unterscheiden. Die relativen zufälligen Fehler sind etwas größer, da deren Referenzdaten mit größeren Fehlern behaftet sind als die terrestrischen Vergleichsmessungen bei der absoluten Genauigkeit.
- c) Tabelle 6.11 ist eigentlich eine detaillierte Ansicht (nur die 3 Snake-Linien mit zufälligen Fehlern) der Tabelle 6.8, also sollte der Vergleich zwischen den Tabellen 6.10 und 6.11 zur selben Konklusion führen wie im Abschnitt b). Der Vergleich der beiden letzten Zeilen zeigt aber, dass die zufällige Höhengenaugigkeit der Snakes, die aus der absoluten Höhengenaugigkeit abgespalten wird, immer größer ist als die relative zufällige Genauigkeit. Das können wir mit der Linie 35 erklären: Sie hat eine sehr große Höhengenaugigkeit, weil sie zur Kategorie "Gehsteige" gehört. Abgesehen davon bleibt immer noch der Eindruck, dass die zufälligen Anteile der absoluten Genauigkeiten etwas größer sind als die zufälligen Anteile

der relativen Genauigkeit. Einen genaueren Blick auf die einzelnen Linien in beiden Tabellen zeigt eine Unsicherheit dieser Werte. Das deutet auf Folgendes hin:

1. Unzulänglichkeiten der Testdaten, besonders für die Ermittlung der Absoluten Genauigkeit. Hier haben wir dasselbe Problem, wie im Block 1 in Tabelle 6.8: unglücklicher Zufall bei geringer Linienanzahl. Die Methode der Mittelung gibt uns trotzdem ein Gefühl, was wir zu erwarten haben.
  2. Keine gute Definition dieser drei Linien im Bild (daher diese Unsicherheit der Werte), das sowohl für den Operateur als auch für die Snakes ein Problem war. Davon können wir uns auch von Tabelle 6.12 überzeugen. Die Werte dort zeigen große Abweichungen und Schwankungen von der terrestrischen Referenz. Insgesamt ist die relative Snake-Genauigkeit etwas größer als die von der absoluten Genauigkeit abgespaltenen zufälligen Anteile der manuellen Linien, was auch richtig ist.
- d) Der Vergleich der Tabellen 6.10 und 6.12 zeigt, dass die halbautomatische Linienauswertung besser ist als die manuelle Linienauswertung - um 27 % in der Lage und 3 % in der Höhe.

# Kapitel 7

## Abschließender Teil

### 7.1 Planung von Projektparametern

Am Anfang dieses Kapitels soll am Beispiel einiger Aufgaben demonstriert werden, wie Abbildungen, wie 6.13, 6.14, 6.15 und 6.16, zu verwenden wären. Die Beispiele (1 bis 3) zeigen, wie einige Fragen der Projektplanung beantwortet werden können .

#### Aufgabe 1:

*Mann will eine Höhengenaugigkeit von etwa 15 cm bei Auswertungen mit einer digitalen Station erreichen. Es steht eine Messkamera mit 21 cm Kamerakonstante ( $c$ ) zu Verfügung. Wie wäre die Flughöhe über Grund ( $h$ ) bei 15  $\mu\text{m}$ -Pixel zu wählen. Was für eine Lagegenauigkeit könnte man erwarten.*

In Anlehnung an Abbildung 6.16 ergibt sich aus der 15 cm-Höhengenaugigkeit eine Flughöhe über Grund von 1450 m. (Wir lesen von der Ursprungsgeraden ab.) Bei einer Kamerakonstanten von 21 cm ergibt sich nach der Formel  $m_b = \frac{h}{c}$  eine Bildmaßstabszahl  $m_b$  von 7000. Mit dieser Zahl ist eine Lagegenauigkeit von etwa 4 cm aus Tabelle 6.15 abzulesen. Für 15  $\mu\text{m}$ -Pixel wäre eine Lagemessgenauigkeit von etwa 6  $\mu\text{m}$  im Bild erreichbar. Bei 21 cm Messkameras ist ein Basis/Höhenverhältnis von 1/2 zu nehmen. Bei 1450 m Flughöhe würde das eine Basis von 725 m ergeben. Die Höhenmessgenauigkeit im Bild wäre dann 21  $\mu\text{m}$  im Bild oder 0.1 ‰ von der Aufnahmeentfernung.

#### Aufgabe 2:

*Man hat einen Flug mit 15 cm Kamerakonstante und Maßstab 1:15000. Das Basis/Höhenverhältnis ist 2/3. Was für eine Pixelgröße soll man für das Scannen der Bilder nehmen, damit wir eine Bildmessgenauigkeit von etwa 9  $\mu\text{m}$  im Bild beim Auswerten erreichen können. Was für eine Objektgenauigkeit wäre zu erwarten*

Aus Abbildung 6.13 können wir ablesen, das wir für eine Bildmessgenauigkeit von etwa 9  $\mu\text{m}$  im Bild entweder die 15  $\mu\text{m}$ -Pixel oder die 25  $\mu\text{m}$ -Pixel nehmen sollen.

Mit dem Maßstab und der Kamerakonstante können wir eine Flughöhe über Grund von 2250 m und eine Basis von 1500 m ausrechnen.

Aus Formeln 2.35 ergeben sich mit der angegebenen Bildmessgenauigkeit in beiden Fällen einen Lagefehler von 13.5 cm und einen Höhenfehler von 20 cm. Da wir mit den 25  $\mu\text{m}$  eine bessere Messsicherheit hätten, ist empfehlenswert die 25  $\mu\text{m}$  zu nehmen.

### Aufgabe 3:

Wie wäre die Flughöhe über Grund zu wählen damit wir bei 20  $\mu\text{m}$ -Pixel eine Bildmessgenauigkeit von 9  $\mu\text{m}$  erreichen. Wenn wir eine Kamerakonstante von 21 cm und ein Basis/Höhenverhältnis von 1/2 haben wollen, wie wären die Objektgenauigkeiten der digitalen Auswertungen zu erwarten.

Aus Abbildung 6.14 lesen wir für 9  $\mu\text{m}$  Bildmessgenauigkeit eine Flughöhe von 2100 m ab. Das entspricht einer Basis von 1050 m. Mit der angegebenen Kamerakonstanten und der Flughöhe rechnen wir einen Maßstab von 1:10000 aus. Aus Formeln 2.35 ergeben sich einen Lagefehler von 9 cm und einen Höhenfehler von 18 cm. (Diese Aufgabe hat keine praktische Bedeutung, da die Bildmessgenauigkeit sekundär ist. Die Genauigkeit am Objekt ist ausschlaggebend.)

## 7.2 Verallgemeinerung der Aussagen

Die dargebotene Analyse im Kapitel 6 lässt folgende *photogrammetrie-spezifische* Aussagen formulieren:

- In der digitalen Photogrammetrie erfolgt die manuelle Linienauswertung punktweise, sodass für die Genauigkeit der Linienauswertung die Genauigkeit der punktweisen Auswertung herangezogen werden kann.
- Bei den manuell digitalisierten Punkt- und Linienarten konnten keine nennenswerten Unterschiede festgestellt werden. Eine genauere Abgrenzung könnte Ziel einer anderen Untersuchung sein.
- In der analytischen Photogrammetrie liefern die Farbbilder die besseren Ergebnisse. Mit den digitalen Auswertemethoden konnten keine nennenswerten Unterschiede zwischen den manuellen Auswertungen auf Farb- oder Schwarzweißbildern festgestellt werden.
- Ein erfahrener Operateur beim Stereomessen ist auch in der digitalen Photogrammetrie wünschenswert.
- Die allgemeinen Genauigkeitsgesetze der analytischen Photogrammetrie sind weitgehend auf die digitale Photogrammetrie übertragbar. Aus dem Vergleich zwischen der analytischen und digitalen Photogrammetrie in den nächsten zwei Formeln, lässt sich folgendes feststellen :

$$\begin{array}{ll}
 \text{Lage: } \sigma_{XY}^{P+L} = \pm 6 \mu\text{m } m_B & \text{vgl. mit } \sigma_{XY}^{sP} = \pm 6 \mu\text{m } m_B \\
 \text{Höhe: } \sigma_Z^{P+L} = \pm 0.1 \text{‰ Flughöhe} & \text{vgl. mit } \sigma_Z^{sP} = \pm 0.06 \text{‰ Flughöhe}
 \end{array}
 \tag{7.1}$$

Die Formeln gelten für 15  $\mu\text{m}$  Pixelgröße.

1. Die Objektgenauigkeiten für die verwendeten natürlichen Objekte in der manuellen digitalen Photogrammetrie entsprechen fast den Genauigkeiten für signalisierte Punkte in der analytischen Photogrammetrie.
2. Die mittleren Fehler der Koordinaten sind proportional zur Bildmaßstabszahl.
3. Wenn man eine gleichmäßige Verschiebung anbringt (= Elimination des systematischen Fehlers) - sowohl für die manuelle, als auch für die halbautomatische Photogrammetrie -, dann **entsprechen** die erhaltenen **relativen Genauigkeiten** weitgehend auch den **absoluten Genauigkeiten**. Dieser Punkt zusammen mit dem ersten Punkt weisen eine sehr gute Qualität der Auswertung in der gegenwärtigen Photogrammetrie auf.

Die Ergebnisse ermöglichen noch folgende *digital-spezifische* Aussagen:

- Die Bildmessgenauigkeit der manuellen Auswertung aus den Lagefehlern beträgt  $\pm 6 \mu\text{m}$  und die aus den Höhenfehlern  $\pm 10.5 \mu\text{m}$ . Aus einer Mittelung der beiden Zahlen ergibt sich die zweitwichtigste Größe nach der Objektgenauigkeit in dieser Untersuchung - die generelle Bildmessgenauigkeit im Bild. Sie beträgt  $8.3 \mu\text{m}$  im Bild. Sie ist aber nur für den Datensatz aus dieser Untersuchung repräsentativ genug. (Diese Werte sind für  $15 \mu\text{m}$  Pixelgröße gültig.)
- Die günstigste Pixelgröße für die manuelle punkt- und linienweise Auswertung ist bei  $20 \mu\text{m}$ . An dieser optimalen Stelle beträgt die Messgenauigkeit  $8.2 \mu\text{m}^1$  im Bild oder 0.41 Anteile der Pixelgröße. Bei einer Pixelgröße größer als  $20 \mu\text{m}$  steigt zwar die Messsicherheit aber nicht die Messgenauigkeit. Bei deutlich kleinerer Pixelgröße beeinträchtigt das Rauschen die Messgenauigkeit. Als günstigste Pixelgröße für die halbautomatische Methode kann man auch etwas sehr Ähnliches erwarten.
- Die halbautomatische Linienauswertung durch Snakes ist besser als die manuelle Linienauswertung (etwa 30 % in der Lage und 3 % in der Höhe). Bei einer künftigen Verwendung von Stereo-Snakes und einer verbesserten Software (besonders die 3D-Lösung) wird die Genauigkeit vermutlich noch deutlicher ausfallen. Durch Berücksichtigung der Gegebenheiten der halbautomatischen Snake-Methode und entsprechende Adaption an die Photogrammetrie, könnte dem Operateur mühsame Arbeit erspart und eine hohe Leistung erzielt werden. Für die halbautomatische Linienauswertung ist eine Parallelität mit der Basis besonders unerwünscht, deshalb wäre ein Flug mit 60% Querüberdeckung stark empfohlen.

Folgende Gesetzmäßigkeiten in den Genauigkeitsparametern (Objektgenauigkeit und Bildmessgenauigkeit) konnten aufgrund des dargebotenes Zahlenmaterial festgestellt werden:

- Die Pixelgröße beeinflusst die *Objektgenauigkeit der manuellen Auswertung* sehr stark. Bei dem Übergang von  $30 \mu\text{m}$  auf  $15 \mu\text{m}$  Pixelgröße verbessert sich die Lage etwa um 60 % und die Höhe um etwa 30 %.

---

<sup>1</sup>Die genannten Bildmessgenauigkeiten ( $8.3 \mu\text{m}$  und  $8.2 \mu\text{m}$ ) sind leider nur empirische Werte aus einer beschränkten Datenmenge. Eine Erklärung für den geringen Unterschied wäre, dass sich die Bildmessgenauigkeit bei der günstigste Pixelgröße nur auf einen Block bezieht und die andere ist für alle Blöcke gerechnet. Siehe mehr dazu im Abschnitt 6.3.3 unten.

- Die Pixelgröße beeinflusst die *Objektgenauigkeit der halbautomatischen Auswertung* weniger stark. Bei dem Übergang von 30  $\mu\text{m}$  auf 15  $\mu\text{m}$  Pixelgröße verbessern sich die Lage und die Höhe um etwa 10 %.
- Die pixelbezogene *Bildmessgenauigkeit der manuellen Auswertung* verschlechtert sich um 30 % beim Übergang von 30  $\mu\text{m}$ -Pixel auf 15  $\mu\text{m}$ -Pixel.
- Die pixelbezogene *Bildmessgenauigkeit der halbautomatischen Auswertung* ist stärker von der Pixelgröße abhängig. Sie verschlechtert sich um 45 % beim Übergang von 30  $\mu\text{m}$ -Pixel auf 15  $\mu\text{m}$ -Pixel.
- Die pixelbezogene *Bildmessgenauigkeit der manuellen Auswertung* verschlechtert sich um etwa 20 % beim Übergang von 3150 m Flughöhe auf 600 m Flughöhe. Es ist daher besonders wichtig, dass eine Bewegungskompensation während des Fluges, besonders bei den tieferen Flughöhen durchgeführt wird.

### 7.3 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden Konzepte zur Genauigkeitsanalyse von großen Messreihen, die aus digitalen Auswertungen entstehen, ermittelt. Die Konzepte wurden auf statistische Methoden aufgebaut. Hiermit könnte man erfolgreich die Genauigkeit von photogrammetrischen Endprodukten projektbezogen schätzen. Demonstriert wurde das anhand von Zahlenmaterial, das von der Autorin dieser Arbeit erstellt wurde. Es ist bekannt, dass die bei der statistischen Analyse anfallenden Qualitätsparameter das konkrete Projekt oder Experiment repräsentieren. Die ermittelten Genauigkeiten aus diesem Experiment sind daher nur für das verwendete Bildmaterial und für das verwendete Zahlenmaterial gültig. Die ermittelten Zahlen beweisen trotzdem erwartungsgemäß die gute Qualität der gegenwärtigen digitalen Photogrammetrie. Sie steht der analytischen Photogrammetrie keineswegs nach. Es ist gelungen, einige allgemeine und sehr interessante Themen (wie die optimale Pixelgröße für die manuelle digitale Auswertung oder die Anwendung halbautomatischer Methoden für die Lösung photogrammetrischer Digitalisierungsaufgaben) mit den ermittelten Werten anzuschneiden. Mit den erhaltenen Qualitätsparametern hat man ein Mittel in der Hand a-priori Genauigkeiten in Abhängigkeit von den wichtigsten Parametern - Bildmaßstab bzw. Flughöhe über Grund und Pixelgröße - bei Anwendung der digitalen Photogrammetrie anzugeben. Bei einer Flugplanung oder Projektplanung z.B. richten sich die zu wählende Flughöhe bzw. Bildmaßstab und Pixelgröße nach der gewünschten Auflösung auf dem Gelände vor allem nach der gewünschten Genauigkeit der photogrammetrischen Endprodukte. M.a.W. man kann ausgehend von der erwünschten Genauigkeit der Endprodukte, aufgrund der erzeugten Tabellen und Abbildungen in dieser Arbeit, eine Wahl an Pixelgröße, Flughöhe und Bildmaßstab treffen.

Das allgemeine Konzept zur Ermittlung von Genauigkeiten (relative und absolute Genauigkeitsangaben) aus großen Messreihen wurde erstens an die sehr unterschiedlichen Problemstellungen der Punkt- und Linienauswertung und zweitens an die Problemstellungen der manuellen und halbautomatischen digitalen Auswertungen angepasst. Die Anwendung der halbautomatischen Methode der Snakes für die photogrammetrische dreidimensionale Linienauswertung benötigte wiederum die Entwicklung einer Strategie. In erster Linie wurde an der Problematik der Energiebilderzeugung gearbeitet, die für die Stärke des Anziehungsbereiches der Zielkurve Sorge trägt. Zweitens wurde eine Kompromisslösung für die Erzeugung von

dreidimensionalen Linien gefunden, da die gegenwärtigen zweidimensionalen Snakes noch nicht für den dreidimensionalen Raum entwickelt sind. Die große Ausschweifung der Arbeit in Richtung der Bildverarbeitung hat bezweckt, das Genauigkeitspotential dieser noch nicht vorhandenen Snake-Methode zu zeigen, was auch gelungen ist. Es wurde bewiesen, dass unter Berücksichtigung bestimmter Voraussetzungen und Anpassungen an die Aufgaben, die Snakes mindestens genauso gut sein können, wie die operateurgeführte digitale Auswertung.

## 7.4 Ausblick

Diese Arbeit liefert Themen für künftige Forschungen. Die wären:

1. Die Erweiterung dieser Untersuchung auf ein größeres Projekt, wo mehr und unterschiedliche Operateure beteiligt sind. Das könnte Beweismaterial für etwas allgemeinere Aussagen und Angaben von Faustformeln für die digitale Photogrammetrie liefern. Die Anfertigung von allgemeinen Abbildungen, wie 6.13, 6.14, 6.15 und 6.16, wäre für die Projektplanung von großem Interesse. Bei einer erweiterten Untersuchung könnten auch Genauigkeitsparameter für die unterschiedlichsten Punk- und Linienarten anfallen. Die Qualität von Geländekanten im digitalen Auswertesystem wäre von besonderer Wichtigkeit für einige photogrammetrische Anwendungen.
2. Man könnte sich auch in einer Untersuchung der Definitionsunsicherheit von Objekten in Abhängigkeit von dem Bildmaßstab (bzw. Flughöhe), der Pixelgröße etc. in der gegenwärtigen Photogrammetrie vertiefen.
3. Die Snakes stellen ein breites Feld für Forschungen dar, da sie noch keine lange Tradition haben. In Anlehnung an diese Arbeit wäre eine weitere Vertiefung in den Bereich der Bildverarbeitung von Interesse und natürlich die Ausarbeitung von Methoden für die Anwendung der Snakes für photogrammetrische Aufgaben.

## Anhang A

# Zusammenhang zwischen Koordinaten und Streckenfehler im ein-, zwei und dreidimensionalen Raum

Der berechnete aus den Koordinaten der 3 Punkte  $P_A, P_E, Q$  Abstand  $d$  in [Kraus, K. & Bettin, R., 1970] und [Kraus & Haussteiner, 1993] bezieht sich nur auf den ebenen Fall (2D). Folgende Herleitungen sollen den Leser überzeugen, dass die Genauigkeit der Abstandsberechnung in allen drei Fällen (1D, 2D, 3D) von der Koordinatengenauigkeit der beteiligten Punkte abhängig ist. Dazu nehmen wir den einfacheren Fall, wo der Punkt  $Q$  z.B. über dem Punkt  $P_A$  liegt (Abschnitt 2.3.1). Dann ist die Distanz wie in A.1, A.4, A.7 zu formulieren. Das Fehlerfortpflanzungsgesetz angewandt auf diese Formeln liefert uns die Formel für die bekannte Streckengenauigkeit (A.3, A.6, A.9). Wenn der Punkt  $Q$  nicht exakt über dem Punkt  $P_A$  liegt dann verschieben wir die Distanz auf dem Segment  $P_AP_E$  bis zum Lotfußpunkt. An dieser Stelle ist die Formel mit dem Koeffizient  $\frac{2\theta}{(\theta+1)^2}$  zu erweitern, wie in Formel 2.15, weil somit der Einfluß der Position des Lotfußpunktes auf der Streckengenauigkeit berücksichtigt wird. Das wurde bereits in [Kraus, K. & Bettin, R., 1970] abgeleitet.

Nun kommen wir zur Ableitung der Formel für die Streckengenauigkeit. Die notwendige Annahme am Anfang ist, dass alle drei Koordinaten die gleiche Koordinatengenauigkeit  $\sigma_{XYZ}$  haben.

Im dreidimensionalen Raum:

$$d_{XYZ} = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2} \quad (\text{A.1})$$

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2} \\ \Delta X &= (X_1 - X_2) \quad \Delta Y = (Y_1 - Y_2) \quad \Delta Z = (Z_1 - Z_2) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

$$\begin{aligned} \sigma_d^2 &= \frac{1}{2} 2 \left( \left( \frac{\Delta X}{S} \right)^2 + \left( \frac{\Delta X}{S} \right)^2 + \left( \frac{\Delta Y}{S} \right)^2 + \left( \frac{\Delta Y}{S} \right)^2 + \left( \frac{\Delta Z}{S} \right)^2 + \left( \frac{\Delta Z}{S} \right)^2 \right) \sigma_{XYZ}^2 \\ &= 2 \left( \frac{\Delta X^2}{S^2} + \frac{\Delta Y^2}{S^2} + \frac{\Delta Z^2}{S^2} \right) \sigma_{XYZ}^2 \\ &= 2 \left( \frac{S^2}{S^2} \right) \sigma_{XYZ}^2 \\ &= 2\sigma_{XYZ}^2 \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

Im zweidimensionalen Raum:

$$d_{XY} = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \\ \Delta X &= (X_1 - X_2) \quad \Delta Y = (Y_1 - Y_2) \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

$$\begin{aligned} \sigma_{d_{XY}}^2 &= \frac{1}{2} 2 \left( \left( \frac{\Delta X}{S} \right)^2 + \left( \frac{\Delta X}{S} \right)^2 + \left( \frac{\Delta Y}{S} \right)^2 + \left( \frac{\Delta Y}{S} \right)^2 \right) \sigma_{XY}^2 \\ &= 2 \left( \frac{\Delta X^2}{S^2} + \frac{\Delta Y^2}{S^2} \right) \sigma_{XY}^2 \\ &= 2 \left( \frac{S^2}{S^2} \right) \sigma_{XY}^2 \\ &= 2\sigma_{XY}^2 \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Im eindimensionalen Raum:

$$d_Z = \sqrt{(Z_1 - Z_2)^2} \quad (\text{A.7})$$

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{(Z_1 - Z_2)^2} \\ \Delta Z &= (Z_1 - Z_2) \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

$$\begin{aligned} \sigma_{d_Z}^2 &= \frac{1}{2} 2 \left( \left( \frac{\Delta Z}{S} \right)^2 + \left( \frac{\Delta Z}{S} \right)^2 \right) \sigma_Z^2 \\ &= 2 \left( \frac{\Delta Z^2}{S^2} \right) \sigma_Z^2 \\ &= 2 \left( \frac{S^2}{S^2} \right) \sigma_Z^2 \\ &= 2\sigma_Z^2 \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

# Anhang B

## Empirische Genauigkeiten aus den Punktauswertungen

### B.1 Relative Genauigkeit natürlicher Punkte

*Tabelle B.1: Relative Genauigkeit natürlicher Punkte auf Markierungen*

Nr	Block 1 1:15000, RGB, 20 $\mu\text{m}$ , 21 cm B/Z=1/2.55			Block 2 1:6000, SW, 15 $\mu\text{m}$ , 21 cm B/Z=1/2.37			Block 3 1:4000, RGB, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86			Block 4 1:4000, SW, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86			Block 5 1:4000, RGB, 25 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86		
	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]
01	0.031	0.054	0.169	0.019	0.026	0.112	0.019	0.029	0.039	0.014	0.028	0.059	0.013	0.015	0.050
01	0.033	0.021	0.137	0.019	0.060	0.107	0.014	0.028	0.059	0.034	0.015	0.085	0.021	0.023	0.055
01	0.019	0.031	0.101	0.037	0.051	0.129	0.034	0.015	0.085	0.067	0.030	0.211	0.012	0.028	0.081
01	0.030	0.042	0.125	0.067	0.030	0.211	0.028	0.024	0.112	0.013	0.020	0.039	0.030	0.038	0.059
02	0.029	0.038	0.142	0.013	0.020	0.113	0.019	0.029	0.039	0.019	0.029	0.039	0.013	0.015	0.050
02	0.042	0.045	0.136	0.036	0.017	0.124	0.016	0.013	0.073	0.022	0.030	0.069	0.014	0.009	0.059
02	0.040	0.047	0.147	0.022	0.030	0.127	0.014	0.035	0.069	0.017	0.023	0.058	0.022	0.011	0.066
02	0.029	0.050	0.153	0.028	0.045	0.107	0.017	0.023	0.058	0.021	0.021	0.042	0.016	0.016	0.054
03	0.036	0.052	0.163	0.025	0.019	0.067	0.021	0.021	0.042	0.027	0.015	0.067	0.018	0.013	0.047
03	0.067	0.045	0.163	0.028	0.030	0.067	0.028	0.030	0.083	0.021	0.030	0.061	0.015	0.021	0.051
03	0.035	0.048	0.090	0.024	0.038	0.083	0.024	0.038	0.083	0.019	0.023	0.048	0.023	0.025	0.086
03	0.035	0.050	0.086	0.016	0.050	0.110	0.016	0.050	0.110	0.019	0.023	0.048	0.020	0.020	0.078
06	0.033	0.046	0.150	0.023	0.022	0.083	0.024	0.022	0.078	0.024	0.022	0.078	0.020	0.026	0.068
06	0.041	0.060	0.118	0.018	0.021	0.158	0.021	0.019	0.090	0.021	0.019	0.090	0.016	0.024	0.065

	Block 1 1:15000, RGB, 20 $\mu\text{m}$ , 21 cm B/Z=1/2.55			Block 2 1:6000, SW, 15 $\mu\text{m}$ , 21 cm B/Z=1/2.37			Block 3 1:4000, RGB, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86			Block 4 1:4000, SW, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86			Block 5 1:4000, RGB, 25 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86		
Nr	$\sigma_X^{n,p}$ [m]	$\sigma_Y^{n,p}$ [m]	$\sigma_Z^{n,p}$ [m]	$\sigma_X^{n,p}$ [m]	$\sigma_Y^{n,p}$ [m]	$\sigma_Z^{n,p}$ [m]	$\sigma_X^{n,p}$ [m]	$\sigma_Y^{n,p}$ [m]	$\sigma_Z^{n,p}$ [m]	$\sigma_X^{n,p}$ [m]	$\sigma_Y^{n,p}$ [m]	$\sigma_Z^{n,p}$ [m]	$\sigma_X^{n,p}$ [m]	$\sigma_Y^{n,p}$ [m]	$\sigma_Z^{n,p}$ [m]
07	0.037	0.032	0.093	0.041	0.058	0.171	0.027	0.018	0.089	0.024	0.032	0.069	0.024	0.032	0.069
07	0.029	0.035	0.133	0.036	0.026	0.106	0.023	0.016	0.088	0.019	0.017	0.063	0.019	0.017	0.063
07	0.022	0.046	0.133	0.026	0.033	0.100	0.008	0.031	0.080	0.007	0.012	0.077	0.007	0.012	0.077
07	0.036	0.050	0.102	0.036	0.025	0.128	0.032	0.012	0.083	0.016	0.014	0.090	0.016	0.014	0.090
08	0.024	0.028	0.093	0.039	0.030	0.108	0.020	0.030	0.082	0.020	0.018	0.065	0.020	0.018	0.065
08	0.033	0.038	0.078	0.018	0.040	0.113	0.016	0.018	0.035	0.014	0.018	0.044	0.014	0.018	0.044
08	0.031	0.044	0.078	0.034	0.024	0.111	0.009	0.021	0.066	0.017	0.014	0.039	0.017	0.014	0.039
50	0.075	0.032	0.207	0.044	0.048	0.130	0.031	0.021	0.077	0.014	0.020	0.057	0.014	0.020	0.057
50	0.132	0.088	0.207												
$\sigma_{rel}^{n,p}$	0.046	0.046	0.134	0.032	0.036	0.121	0.022	0.023	0.072	0.018	0.021	0.064	0.018	0.021	0.064
	eliminierte Beobachtungen in X: 0			eliminierte Beobachtungen in X: 0			eliminierte Beobachtungen in X: 0			eliminierte Beobachtungen in X: 0			eliminierte Beobachtungen in X: 0		
	eliminierte Beobachtungen in Y: 0			eliminierte Beobachtungen in Y: 1			eliminierte Beobachtungen in Y: 0			eliminierte Beobachtungen in Y: 0			eliminierte Beobachtungen in Y: 0		
	eliminierte Beobachtungen in Z: 0			eliminierte Beobachtungen in Z: 0			eliminierte Beobachtungen in Z: 0			eliminierte Beobachtungen in Z: 0			eliminierte Beobachtungen in Z: 0		
	Anz. der Beob. im Datensatz: 288			Anz. der Beob. im Datensatz: 263			Anz. der Beob. im Datensatz: 220			Anz. der Beob. im Datensatz: 220			Anz. der Beob. im Datensatz: 220		
	Anz. der Unbek. im Datensatz: 24			Anz. der Unbek. im Datensatz: 22			Anz. der Unbek. im Datensatz: 22			Anz. der Unbek. im Datensatz: 22			Anz. der Unbek. im Datensatz: 22		



*Tabelle B.3: Relative Genauigkeit natürlicher Punkte auf Dachfirsten*

Nr	Block 1 1:15000, RGB, 20 $\mu\text{m}$ , 21 cm B/Z=1/2.55			Block 2 1:6000, SW, 15 $\mu\text{m}$ , 21 cm B/Z=1/2.37			Block 3 1:4000, RGB, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86			Block 4 1:4000, SW, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86			Block 5 1:4000, RGB, 25 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86		
	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]
01001	0.051	0.169	0.353				0.049	0.026	0.127	0.030	0.023	0.088	0.010	0.029	0.138
01001	0.089	0.149	0.353				0.058	0.030	0.135	0.042	0.022	0.108	0.010	0.021	0.115
02001				0.039	0.043	0.149	0.138	0.142	0.139	0.013	0.065	0.088	0.024	0.007	0.097
02001				0.028	0.020	0.135	0.074	0.028	0.129	0.052	0.041	0.139	0.028	0.020	0.089
02001				0.028	0.032	0.072	0.030	0.033	0.136	0.038	0.026	0.089	0.028	0.009	0.086
02001				0.012	0.012	0.132	0.106	0.038	0.178	0.028	0.041	0.086	0.013	0.012	0.074
02001				0.022	0.019	0.122	0.074	0.032	0.198	0.086	0.028	0.266	0.022	0.019	0.124
02001				0.019	0.012	0.134	0.043	0.022	0.190	0.050	0.024	0.266	0.015	0.008	0.113
02001				0.074	0.080	0.301	0.054	0.061	0.210	0.035	0.041	0.126	0.006	0.013	0.120
02002				0.031	0.013	0.102	0.041	0.031	0.156	0.036	0.179	0.084	0.032	0.049	0.048
02002				0.014	0.021	0.231	0.067	0.100	0.126	0.047	0.031	0.149	0.013	0.015	0.069
02003				0.021	0.022	0.237	0.071	0.045	0.094	0.062	0.043	0.131	0.018	0.024	0.067
02003				0.020	0.011	0.161	0.080	0.033	0.168	0.028	0.041	0.086	0.008	0.012	0.098
02003				0.029	0.016	0.104	0.060	0.044	0.091	0.067	0.045	0.136	0.029	0.021	0.083
02004				0.029	0.018	0.110	0.077	0.038	0.252	0.060	0.026	0.258	0.012	0.020	0.079
02004				0.048	0.100	0.254	0.047	0.061	0.085	0.052	0.061	0.060	0.027	0.024	0.076
02005							0.032	0.052	0.080	0.050	0.029	0.086	0.024	0.018	0.081
02005							0.066	0.037	0.146	0.034	0.027	0.175	0.019	0.014	0.056
02006							0.042	0.020	0.169	0.040	0.045	0.248	0.009	0.013	0.103
02006							0.032	0.015	0.111	0.057	0.028	0.289	0.013	0.008	0.099
03001	0.060	0.118	0.256	0.029	0.046	0.099	0.053	0.022	0.090	0.020	0.032	0.063	0.018	0.018	0.064
03001	0.072	0.085	0.256	0.034	0.031	0.099	0.025	0.023	0.061	0.038	0.028	0.063	0.023	0.018	0.064
04001							0.035	0.029	0.072	0.041	0.044	0.092	0.013	0.032	0.073
04001							0.049	0.048	0.140	0.059	0.065	0.126	0.014	0.028	0.119
04002							0.099	0.040	0.137	0.073	0.034	0.121	0.058	0.024	0.054
04002							0.072	0.059	0.107	0.030	0.077	0.195	0.026	0.015	0.107
05001							0.097	0.097	0.106	0.041	0.030	0.104	0.023	0.050	0.092
05001							0.031	0.068	0.125	0.062	0.052	0.075	0.009	0.018	0.061
05001							0.062	0.042	0.168	0.057	0.028	0.114	0.037	0.031	0.053
05002	0.102	0.138	0.485				0.031	0.063	0.109	0.072	0.054	0.079	0.013	0.035	0.059
05002	0.065	0.133	0.454				0.042	0.048	0.105	0.036	0.036	0.106	0.010	0.018	0.059
05002	0.107	0.174	0.484				0.053	0.025	0.105	0.056	0.039	0.106	0.028	0.010	0.059
05003							0.082	0.028	0.167	0.102	0.055	0.248	0.062	0.037	0.172
05003							0.052	0.049	0.115	0.028	0.029	0.097	0.014	0.019	0.094
05003							0.053	0.023	0.114	0.024	0.039	0.077	0.033	0.016	0.107
05004							0.061	0.055	0.143	0.027	0.050	0.089	0.029	0.051	0.091
05004							0.041	0.024	0.128	0.038	0.033	0.117	0.032	0.023	0.153
05004							0.072	0.048	0.218	0.083	0.051	0.126	0.027	0.022	0.107
06001							0.035	0.028	0.091	0.041	0.044	0.174	0.021	0.030	0.162

Nr	Block 1 1:15000, RGB, 20 $\mu\text{m}$ , 21 cm B/Z=1/2.55			Block 2 1:6000, SW, 15 $\mu\text{m}$ , 21 cm B/Z=1/2.37			Block 3 1:4000, RGB, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86			Block 4 1:4000, SW, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86			Block 5 1:4000, RGB, 25 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86		
	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]
06001				0.033	0.040	0.072	0.043	0.026	0.104	0.011	0.012	0.089			
06001				0.052	0.061	0.118	0.064	0.052	0.150	0.020	0.021	0.116			
06002				0.029	0.052	0.087	0.043	0.031	0.090	0.007	0.030	0.124			
06002				0.028	0.034	0.087	0.046	0.044	0.081	0.009	0.014	0.074			
06002				0.042	0.024	0.087	0.034	0.028	0.081	0.017	0.012	0.074			
06003				0.059	0.036	0.143	0.046	0.024	0.080	0.023	0.019	0.069			
06003				0.035	0.040	0.090	0.054	0.041	0.117	0.016	0.023	0.078			
06003				0.062	0.040	0.126	0.042	0.038	0.088	0.032	0.030	0.100			
06004				0.062	0.033	0.148	0.020	0.050	0.107	0.014	0.038	0.101			
06004				0.032	0.032	0.105	0.063	0.037	0.195	0.022	0.017	0.131			
06004				0.019	0.037	0.120	0.048	0.045	0.107	0.019	0.010	0.089			
07001	0.118	0.066	0.137	0.024	0.070	0.100	0.048	0.056	0.127	0.013	0.021	0.064			
07001	0.146	0.035	0.120	0.065	0.059	0.077	0.031	0.091	0.127	0.014	0.021	0.101			
07002				0.042	0.054	0.065	0.023	0.055	0.103	0.035	0.033	0.077			
07002				0.058	0.047	0.093	0.058	0.066	0.103	0.057	0.037	0.077			
07003				0.048	0.078	0.137	0.045	0.091	0.095	0.028	0.024	0.105			
07003				0.038	0.096	0.127	0.034	0.044	0.067	0.008	0.014	0.040			
07003				0.028	0.034	0.081	0.028	0.034	0.081	0.016	0.038	0.082			
07004	0.173	0.034	0.080	0.044	0.066	0.142	0.037	0.075	0.154	0.025	0.047	0.141			
07004	0.203	0.020	0.072	0.041	0.065	0.138	0.028	0.073	0.161	0.027	0.025	0.083			
07005				0.051	0.067	0.131	0.047	0.050	0.133	0.015	0.017	0.061			
07005				0.037	0.070	0.134	0.041	0.074	0.120	0.010	0.021	0.068			
07005				0.034	0.044	0.114	0.038	0.069	0.100	0.016	0.026	0.105			
07006	0.196	0.080	0.273	0.040	0.072	0.103	0.038	0.052	0.141	0.006	0.029	0.056			
07006	0.198			0.035	0.111	0.094	0.024	0.112	0.129	0.017	0.055	0.056			
08001				0.038	0.036	0.082	0.049	0.078	0.159	0.019	0.039	0.097			
08001				0.043	0.043	0.082	0.035	0.064	0.169	0.026	0.042	0.089			
08002				0.033	0.054	0.145	0.030	0.044	0.080	0.015	0.016	0.058			
08002				0.031	0.060	0.134	0.046	0.067	0.156	0.015	0.014	0.150			
08002				0.037	0.033	0.109	0.028	0.046	0.119	0.028	0.029	0.057			
08003				0.026	0.084	0.220	0.048	0.089	0.173	0.026	0.034	0.089			
08003				0.053	0.064	0.106	0.032	0.054	0.124	0.015	0.015	0.103			
08003				0.021	0.038	0.103	0.039	0.089	0.128	0.019	0.041	0.093			
08004				0.045	0.065	0.100	0.033	0.065	0.149	0.027	0.018	0.072			
08004				0.041	0.051	0.101	0.030	0.058	0.148	0.024	0.018	0.062			
08005				0.034	0.063	0.133	0.038	0.075	0.173	0.011	0.021	0.059			
08005				0.041	0.066	0.103	0.040	0.058	0.153	0.018	0.012	0.059			
08005				0.036	0.096	0.147	0.058	0.075	0.086	0.048	0.045	0.105			
09001				0.044	0.050	0.075	0.028	0.054	0.126	0.031	0.020	0.066			
09001				0.042	0.033	0.065	0.065	0.048	0.117	0.020	0.015	0.092			
09001				0.027	0.009	0.065	0.039	0.060	0.133	0.027	0.017	0.073			

Nr	Block 1 1:15000, RGB, 20 $\mu\text{m}$ , 21 cm B/Z=1/2.55			Block 2 1:6000, SW, 15 $\mu\text{m}$ , 21 cm B/Z=1/2.37			Block 3 1:4000, RGB, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86			Block 4 1:4000, SW, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86			Block 5 1:4000, RGB, 25 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86		
	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m]	$\sigma_Y^{nP}$ [m]	$\sigma_Z^{nP}$ [m]
09001				0.040	0.036	0.112	0.053	0.048	0.121	0.021	0.020	0.054			
09002				0.024	0.039	0.113	0.025	0.037	0.072	0.019	0.014	0.077			
09003				0.049	0.068	0.070	0.053	0.062	0.138	0.015	0.017	0.075			
09003				0.053	0.059	0.177	0.032	0.042	0.117	0.015	0.024	0.172			
09003				0.034	0.040	0.171	0.040	0.044	0.090	0.025	0.031	0.125			
09004				0.038	0.106	0.083	0.038	0.106	0.128	0.012	0.018	0.069			
09004				0.049	0.054	0.150	0.036	0.044	0.120	0.028	0.037	0.076			
09004				0.033	0.067	0.134	0.046	0.044	0.171	0.012	0.027	0.098			
09004				0.031	0.080	0.110	0.048	0.102	0.126	0.014	0.047	0.062			
09004				0.031	0.075	0.114	0.030	0.054	0.126	0.017	0.038	0.053			
09005				0.064	0.071	0.261	0.047	0.089	0.250	0.034	0.023	0.071			
09005				0.043	0.068	0.131	0.047	0.059	0.159	0.027	0.050	0.092			
09006				0.054	0.050	0.132	0.070	0.064	0.129	0.029	0.020	0.119			
09006				0.043	0.083	0.249	0.065	0.042	0.161	0.028	0.025	0.056			
09007				0.029	0.040	0.093	0.048	0.070	0.110	0.015	0.015	0.048			
09007				0.068	0.076	0.202	0.048	0.053	0.157	0.031	0.044	0.112			
09008				0.052	0.063	0.126	0.027	0.042	0.177	0.016	0.014	0.120			
09008				0.060	0.049	0.189	0.091	0.083	0.154	0.019	0.018	0.152			
09009				0.026	0.039	0.132	0.029	0.051	0.129	0.010	0.029	0.071			
09009				0.020	0.026	0.063	0.028	0.024	0.086	0.016	0.033	0.102			
09009				0.076	0.067	0.190	0.064	0.023	0.176	0.013	0.015	0.159			
09010				0.022	0.040	0.106	0.023	0.051	0.120	0.014	0.026	0.100			
09010				0.021	0.029	0.088	0.030	0.039	0.114	0.020	0.036	0.113			
09011				0.067	0.044	0.241	0.056	0.022	0.163	0.034	0.014	0.191			
09011				0.022	0.034	0.087	0.017	0.048	0.094	0.011	0.022	0.090			
09011				0.021	0.027	0.149	0.062	0.049	0.103	0.020	0.031	0.071			
10002			0.534	0.097	0.083	0.153	0.024	0.062	0.144	0.013	0.032	0.097			
10002			0.534	0.031	0.064	0.085	0.048	0.044	0.125	0.012	0.018	0.084			
10001				0.029	0.078	0.184	0.078	0.060	0.190	0.040	0.015	0.084			
10002				0.038	0.031	0.103	0.051	0.051	0.139	0.016	0.019	0.044			
10002				0.026	0.046	0.103	0.019	0.059	0.121	0.020	0.016	0.053			
10003				0.063	0.108	0.249	0.052	0.067	0.169	0.018	0.014	0.074			
10003				0.021	0.034	0.121	0.024	0.052	0.147	0.012	0.010	0.054			
10003				0.020	0.082	0.131	0.022	0.027	0.068	0.022	0.039	0.137			
10004			0.354	0.048	0.033	0.105	0.070	0.059	0.163	0.056	0.049	0.131			
10004				0.040	0.013	0.250	0.063	0.048	0.127	0.050	0.047	0.118			
10004				0.023	0.019	0.107	0.039	0.076	0.164	0.022	0.010	0.057			
10004				0.020	0.028	0.102	0.042	0.078	0.174	0.021	0.017	0.042			
10004				0.018	0.021	0.130	0.048	0.066	0.151	0.054	0.039	0.119			
10004				0.047	0.018	0.139	0.040	0.074	0.140	0.052	0.031	0.107			
10004			0.320	0.034	0.060	0.131	0.095	0.065	0.146	0.052	0.031	0.107			





	Block 1 1:15000, RGB, 20 $\mu\text{m}$ , 21 cm B/Z=1/2.55	Block 2 1:6000, SW, 15 $\mu\text{m}$ , 21 cm B/Z=1/2.37	Block 3 1:4000, RGB, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86	Block 4 1:4000, SW, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86	Block 5 1:4000, RGB, 25 $\mu\text{m}$ , 15 cm B/Z=1/1.86
Nir	$\sigma_X^{nP}$ [m] $\sigma_Y^{nP}$ [m] $\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m] $\sigma_Y^{nP}$ [m] $\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m] $\sigma_Y^{nP}$ [m] $\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m] $\sigma_Y^{nP}$ [m] $\sigma_Z^{nP}$ [m]	$\sigma_X^{nP}$ [m] $\sigma_Y^{nP}$ [m] $\sigma_Z^{nP}$ [m]
33001	0.093	0.082			
33001	0.066	0.065			
33001	0.101	0.095			
$\sigma_{rel}^{nP}$	0.083	0.131	0.060	0.048	0.024
	eliminierte Beobachtungen in X: 0 eliminierte Beobachtungen in Y: 0 eliminierte Beobachtungen in Z: 0 Anz. der Beob. im Datensatz: 470 Anz. der Unbek. im Datensatz: 47	eliminierte Beobachtungen in X: 0 eliminierte Beobachtungen in Y: 0 eliminierte Beobachtungen in Z: 0 Anz. der Beob. im Datensatz: 1010 Anz. der Unbek. im Datensatz: 101	eliminierte Beobachtungen in X: 0 eliminierte Beobachtungen in Y: 0 eliminierte Beobachtungen in Z: 0 Anz. der Beob. im Datensatz: 1350 Anz. der Unbek. im Datensatz: 135	eliminierte Beobachtungen in X: 0 eliminierte Beobachtungen in Y: 0 eliminierte Beobachtungen in Z: 0 Anz. der Beob. im Datensatz: 1310 Anz. der Unbek. im Datensatz: 131	eliminierte Beobachtungen in X: 0 eliminierte Beobachtungen in Y: 0 eliminierte Beobachtungen in Z: 0 Anz. der Beob. im Datensatz: 1330 Anz. der Unbek. im Datensatz: 133

## Anhang C

# Empirische Genauigkeiten aus den Linienauswertungen

### C.1 Relative Genauigkeit natürlicher Linien

Block 1 1:15000, RGB, 20 $\mu\text{m}$ , 21 cm, B/Z=1/2.55									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Linie}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Linie}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
01	0,390	0,092	719	6	0,8%	0,379	723	2	0,3%
02	0,374	0,086	951	1	0,1%	0,364	951	1	0,1%
03	0,333	0,110	638	0	0,0%	0,314	631	7	1,1%
05	0,312	0,092	659	6	0,9%	0,298	665	0	0,0%
06	0,351	0,095	738	2	0,3%	0,338	740	0	0,0%
07	0,296	0,097	460	0	0,0%	0,280	460	0	0,0%
08	0,351	0,054	135	0	0,0%	0,347	135	0	0,0%
11	0,329	0,101	469	0	0,0%	0,313	469	0	0,0%
13	0,300	0,081	164	0	0,0%	0,289	164	0	0,0%
23	0,216	0,087	223	8	3,5%	0,198	231	0	0,0%
32	0,451	0,140	795	133	14,3%	0,429	928	0	0,0%
33	0,394	0,097	1102	66	5,7%	0,382	1168	0	0,0%
37	0,476	0,165	749	7	0,9%	0,447	753	3	0,4%
42	0,309	0,079	532	1	0,2%	0,299	533	0	0,0%
43	0,374	0,099	705	5	0,7%	0,361	710	0	0,0%
44	0,308	0,115	680	5	0,7%	0,286	684	1	0,1%
45	0,393	0,147	788	5	0,6%	0,365	789	4	0,5%
52	0,350	0,089	636	2	0,3%	0,339	637	1	0,2%
$\sigma_{rel}^{nL}$	0,355	0,105	11143	247	3,8%	0,340	11371	19	0,3%

**Tabelle C.1:** Relative Objektgenauigkeit  $\sigma_{rel}^{Linie}, \sigma_{rel}^{nL}$  natürlicher Linien aus der Klasse "ebenes Gelände" im Block 1 in [m] am Objekt

Block 2									
1:6000, SW, 15 $\mu$ m, 21 cm, B/Z=1/2.37									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Linie}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Linie}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
01	0.135	0.027	325	4	1.2%	0.132	329	0	0.0%
02	0.152	0.040	338	0	0.0%	0.147	338	0	0.0%
03	0.124	0.042	338	1	0.3%	0.117	335	4	1.2%
04	0.157	0.044	1708	6	0.4%	0.151	1708	6	0.4%
05	0.136	0.044	5096	14	0.3%	0.129	5110	0	0.0%
06	0.140	0.038	132	0	0.0%	0.135	132	0	0.0%
07	0.127	0.035	330	3	0.9%	0.122	333	0	0.0%
08	0.085	0.030	334	2	0.6%	0.080	335	1	0.3%
09	0.134	0.050	1535	15	1.0%	0.124	1548	2	0.1%
10	0.104	0.032	285	0	0.0%	0.099	285	0	0.0%
11	0.127	0.038	881	89	9.2%	0.121	970	0	0.0%
12	0.161	0.039	1375	33	2.3%	0.156	1395	13	0.9%
14	0.214	0.063	1635	14	0.8%	0.204	1649	0	0.0%
15	0.219	0.081	698	2	0.3%	0.204	692	8	1.1%
16	0.295	0.101	237	2	0.8%	0.277	239	0	0.0%
17	0.164	0.052	638	0	0.0%	0.156	638	0	0.0%
18	0.267	0.055	132	0	0.0%	0.261	132	0	0.0%
19	0.270	0.075	132	0	0.0%	0.259	132	0	0.0%
20	0.193	0.059	131	0	0.0%	0.184	131	0	0.0%
21	0.155	0.052	132	0	0.0%	0.146	132	0	0.0%
22	0.211	0.064	133	0	0.0%	0.201	133	0	0.0%
23	0.279	0.064	139	0	0.0%	0.272	139	0	0.0%
24	0.258	0.069	136	0	0.0%	0.249	136	0	0.0%
25	0.203	0.075	133	0	0.0%	0.189	133	0	0.0%
28	0.237	0.060	1236	39	3.1%	0.229	1252	23	1.8%
30	0.195	0.063	344	1	0.3%	0.185	345	0	0.0%
31	0.197	0.056	779	184	19.1%	0.189	961	2	0.2%
36	0.221	0.037	1024	2	0.2%	0.218	1024	2	0.2%
40	0.209	0.058	2355	62	2.6%	0.201	2415	2	0.1%
41	0.157	0.053	1989	30	1.5%	0.148	2015	4	0.2%
42	0.175	0.042	1588	10	0.6%	0.170	1597	1	0.1%
43	0.183	0.048	343	0	0.0%	0.177	343	0	0.0%
49	0.204	0.040	305	5	1.6%	0.200	310	0	0.0%
50	0.212	0.038	132	0	0.0%	0.209	132	0	0.0%
$\sigma_{rel}^{nL}$	0.192	0.054	27048	518	3.8%	0.185	27498	68	0.5%

**Tabelle C.2:** Relative Objektgenauigkeit  $\sigma_{rel}^{Linie}, \sigma_{rel}^{nL}$  natürlicher Linien aus der Klasse "ebenes Gelände" im Block 2 in [m] am Objekt

Block 3									
1:4500, RGB, 30 $\mu$ m, 15 cm, B/Z=1/1.86									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Linie}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Linie}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
01	0.180	0.033	420	6	1.4%	0.177	425	1	0.2%
02	0.126	0.027	338	6	1.7%	0.123	344	0	0.0%
03	0.087	0.026	319	7	2.1%	0.083	326	0	0.0%
04	0.116	0.029	2255	12	0.5%	0.112	2267	0	0.0%
05	0.080	0.027	6539	115	1.7%	0.075	6578	76	1.1%
06	0.128	0.022	133	0	0.0%	0.126	133	0	0.0%
07	0.125	0.026	321	11	3.3%	0.122	330	2	0.6%
08	0.123	0.030	322	4	1.2%	0.119	326	0	0.0%
09	0.102	0.027	2315	10	0.4%	0.098	2325	0	0.0%
10	0.114	0.042	331	0	0.0%	0.106	331	0	0.0%
11	0.107	0.043	1160	28	2.4%	0.098	1188	0	0.0%
12	0.142	0.037	868	9	1.0%	0.137	877	0	0.0%
13	0.126	0.033	808	0	0.0%	0.122	808	0	0.0%
20	0.121	0.028	240	0	0.0%	0.118	240	0	0.0%
21	0.129	0.031	536	44	7.6%	0.125	579	1	0.2%
22	0.111	0.028	133	0	0.0%	0.107	133	0	0.0%
23	0.146	0.113	561	8	1.4%	0.092	569	0	0.0%
24	0.096	0.033	338	3	0.9%	0.090	341	0	0.0%
26	0.224	0.055	283	1	0.4%	0.217	282	2	0.7%
31	0.126	0.050	801	1	0.1%	0.116	802	0	0.0%
32	0.143	0.032	2070	302	12.7%	0.139	2350	22	0.9%
33	0.135	0.043	3672	125	3.3%	0.128	3780	17	0.4%
37	0.217	0.056	1931	20	1.0%	0.210	1946	5	0.3%
39	0.151	0.050	777	1	0.1%	0.143	778	0	0.0%
41	0.116	0.046	1288	12	0.9%	0.106	1300	0	0.0%
42	0.128	0.050	2092	23	1.1%	0.118	2111	4	0.2%
43	0.079	0.039	2300	15	0.6%	0.069	2306	9	0.4%
48	0.133	0.044	648	2	0.3%	0.125	650	0	0.0%
50	0.104	0.044	627	98	13.5%	0.094	724	1	0.1%
52	0.122	0.039	1887	15	0.8%	0.116	1900	2	0.1%
$\sigma_{rel}^{nL}$	0.132	0.043	36313	878	3.9%	0.125	37049	142	0.3%

**Tabelle C.3:** Relative Objektgenauigkeit  $\sigma_{rel}^{Linie}, \sigma_{rel}^{nL}$  natürlicher Linien aus der Klasse "ebenes Gelände" im Block 3 in [m] am Objekt

Block 4									
1:4500, SW, 30 $\mu$ m, 15 cm, B/Z=1/1.86									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Linie}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Linie}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
01	0.081	0.020	292	3	1.0%	0.078	294	1	0.3%
02	0.066	0.021	231	4	1.7%	0.063	235	0	0.0%
03	0.062	0.022	237	0	0.0%	0.058	237	0	0.0%
04	0.070	0.022	1662	3	0.2%	0.066	1662	3	0.2%
05	0.089	0.020	5080	15	0.3%	0.087	5086	9	0.2%
06	0.086	0.019	90	0	0.0%	0.084	90	0	0.0%
07	0.085	0.015	207	0	0.0%	0.084	207	0	0.0%
08	0.069	0.018	228	5	2.1%	0.067	233	0	0.0%
09	0.070	0.020	1682	3	0.2%	0.067	1679	6	0.4%
10	0.092	0.027	194	12	5.8%	0.088	206	0	0.0%
11	0.047	0.025	779	51	6.1%	0.040	830	0	0.0%
12	0.095	0.030	941	1	0.1%	0.090	942	0	0.0%
13	0.071	0.023	571	4	0.7%	0.067	571	4	0.7%
15	0.086	0.027	313	14	4.3%	0.082	327	0	0.0%
20	0.070	0.020	161	0	0.0%	0.067	161	0	0.0%
21	0.104	0.017	214	9	4.0%	0.103	223	0	0.0%
22	0.104	0.027	91	0	0.0%	0.100	91	0	0.0%
23	0.077	0.028	367	26	6.6%	0.072	393	0	0.0%
24	0.086	0.018	218	1	0.5%	0.084	219	0	0.0%
26	0.083	0.021	191	0	0.0%	0.080	191	0	0.0%
31	0.119	0.045	479	13	2.6%	0.110	492	0	0.0%
32	0.097	0.025	904	1	0.1%	0.094	903	2	0.2%
33	0.106	0.038	2120	15	0.7%	0.099	2129	6	0.3%
37	0.113	0.034	1472	6	0.4%	0.108	1474	4	0.3%
39	0.124	0.031	479	3	0.6%	0.120	482	0	0.0%
41	0.092	0.034	1063	10	0.9%	0.086	1073	0	0.0%
42	0.126	0.039	605	9	1.5%	0.120	614	0	0.0%
43	0.085	0.037	1541	4	0.3%	0.076	1540	5	0.3%
48	0.085	0.047	520	2	0.4%	0.071	522	0	0.0%
50	0.104	0.036	593	1	0.2%	0.098	594	0	0.0%
52	0.099	0.033	1732	15	0.9%	0.093	1744	3	0.2%
$\sigma_{rel}^{nL}$	0.090	0.028	25257	230	2.4%	0.086	25444	43	0.2%

**Tabelle C.4:** Relative Objektgenauigkeit  $\sigma_{rel}^{Linie}$ ,  $\sigma_{rel}^{nL}$  natürlicher Linien aus der Klasse "ebenes Gelände" im Block 4 in [m] am Objekt

Block 5									
1:4500, SW, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm, B/Z=1/1.86									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Linie}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Linie}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
01	0.070	0.016	273	12	4.2 %	0.068	284	1	0.4 %
02	0.059	0.012	216	0	0.0 %	0.058	216	0	0.0 %
03	0.071	0.017	229	1	0.4 %	0.069	230	0	0.0 %
04	0.067	0.021	1608	11	0.7 %	0.064	1615	4	0.2 %
05	0.085	0.021	5077	18	0.4 %	0.082	5070	25	0.5 %
06	0.069	0.018	90	0	0.0 %	0.067	90	0	0.0 %
07	0.075	0.017	220	2	0.9 %	0.073	222	0	0.0 %
08	0.052	0.016	231	0	0.0 %	0.049	231	0	0.0 %
09	0.071	0.019	1806	3	0.2 %	0.068	1804	5	0.3 %
10	0.096	0.033	223	2	0.9 %	0.090	225	0	0.0 %
11	0.102	0.039	780	54	6.5 %	0.094	834	0	0.0 %
12	0.096	0.024	917	0	0.0 %	0.093	913	4	0.4 %
13	0.078	0.027	611	5	0.8 %	0.073	616	0	0.0 %
14	0.102	0.038	1059	30	2.8 %	0.095	1086	3	0.3 %
15	0.084	0.025	322	10	3.0 %	0.080	332	0	0.0 %
20	0.093	0.019	155	0	0.0 %	0.091	154	1	0.6 %
21	0.078	0.019	238	8	3.3 %	0.076	246	0	0.0 %
22	0.116	0.033	94	0	0.0 %	0.111	94	0	0.0 %
23	0.075	0.025	366	421	0.3 %	0.071	408	0	0.0 %
24	0.127	0.029	235	3	1.3 %	0.124	238	0	0.0 %
26	0.081	0.026	90	0	0.0 %	0.077	90	0	0.0 %
31	0.089	0.038	477	0	0.0 %	0.081	477	0	0.0 %
32	0.070	0.019	885	0	0.0 %	0.067	885	0	0.0 %
33	0.084	0.028	2391	58	2.4 %	0.079	2439	10	0.4 %
37	0.085	0.037	1730	14	0.8 %	0.077	1740	4	0.2 %
39	0.092	0.031	422	1	0.2 %	0.087	423	0	0.0 %
41	0.080	0.030	1152	17	1.5 %	0.074	1169	0	0.0 %
42	0.103	0.033	736	2	0.3 %	0.098	735	3	0.4 %
43	0.090	0.034	1502	5	0.3 %	0.083	1507	0	0.0 %
48	0.088	0.035	559	0	0.0 %	0.081	558	1	0.2 %
50	0.080	0.025	330	1	0.3 %	0.076	331	0	0.0 %
52	0.085	0.029	2132	19	0.9 %	0.080	2146	5	0.2 %
$\sigma_{rel}^{nL}$	0.086	0.027	27156	318	2.5 %	0.081	27408	66	0.2 %

**Tabelle C.5:** Relative Objektgenauigkeit  $\sigma_{rel}^{Linie}, \sigma_{rel}^{nL}$  natürlicher Linien aus der Klasse "ebenes Gelände" im Block 15 in [m] am Objekt

Block 1									
1:15000, RGB, 20 $\mu\text{m}$ , 21 cm, B/Z=1/2.55									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Linie}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Linie}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
16	0.324	0.080	153	0	0.0 %	0.314	153	0	0.0 %
28	0.383	0.145	352	0	0.0 %	0.355	352	0	0.0 %
29	0.330	0.113	699	61	8.0 %	0.310	752	8	1.1 %
$\sigma_{rel}^{nL}$	0.347	0.116	1204	61	4.6 %	0.327	1257	8	0.6 %

**Tabelle C.6:** Relative Objektgenauigkeit  $\sigma_{rel}^{Linie}, \sigma_{rel}^{nL}$  natürlicher Linien aus der Klasse "Gehsteigkanten" im Block 1 in [m] am Objekt

Block 2									
1:6000, SW, 15 $\mu\text{m}$ , 21 cm, B/Z=1/2.37									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Linie}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Linie}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
26	0.209	0.067	1312	7	0.5 %	0.198	1318	1	0.1 %
27	0.215	0.055	3654	33	0.9 %	0.208	3671	16	0.4 %
35	0.138	0.035	132	0	0.0 %	0.133	132	0	0.0 %
37	0.217	0.047	2038	5	0.2 %	0.212	2041	2	0.1 %
38	0.195	0.059	1353	69	4.9 %	0.186	1422	0	0.0 %
39	0.213	0.060	2352	7	0.3 %	0.204	2354	5	0.2 %
46	0.167	0.061	1335	2	0.1 %	0.155	1337	0	0.0 %
$\sigma_{rel}^{nL}$	0.195	0.056	12176	123	1.9 %	0.187	12275	24	0.2 %

**Tabelle C.7:** Relative Objektgenauigkeit  $\sigma_{rel}^{Linie}, \sigma_{rel}^{nL}$  natürlicher Linien aus der Klasse "Gehsteigkanten" im Block 2 in [m] am Objekt

Block 3									
1:4500, RGB, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm, B/Z=1/1.86									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Linie}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Linie}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
16	0.153	0.051	471	0	0.0 %	0.144	471	0	0.0 %
18	0.141	0.034	6544	382	5.5 %	0.137	6908	18	0.3 %
28	0.093	0.045	910	20	2.2 %	0.081	930	0	0.0 %
35	0.124	0.040	6983	86	1.2 %	0.117	7052	17	0.2 %
40	0.128	0.053	1865	6	0.3 %	0.116	1871	0	0.0 %
46	0.124	0.043	3179	33	1.0 %	0.116	3197	15	0.5 %
51	0.131	0.043	2549	15	0.6 %	0.124	2539	25	1.0 %
$\sigma_{rel}^{nL}$	0.129	0.045	0.121	22501	542	2.3 %	22968	75	0.4 %

**Tabelle C.8:** Relative Objektgenauigkeit  $\sigma_{rel}^{Linie}, \sigma_{rel}^{nL}$  natürlicher Linien aus der Klasse "Gehsteigkanten" im Block 3 in [m] am Objekt

Block 4									
1:4500, SW, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm, B/Z=1/1.86									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Linie}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Linie}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
16	0.114	0.036	387	0	0.0 %	0.108	387	0	0.0 %
18	0.108	0.027	4858	239	4.7 %	0.105	5092	5	0.1 %
19	0.124	0.023	263	0	0.0 %	0.122	263	0	0.0 %
28	0.123	0.036	741	2	0.3 %	0.118	743	0	0.0 %
35	0.099	0.031	3391	39	1.1 %	0.094	3404	26	0.8 %
40	0.099	0.043	1702	14	0.8 %	0.089	1708	8	0.5 %
46	0.091	0.033	2642	3	0.1 %	0.085	2639	6	0.2 %
51	0.110	0.041	2078	11	0.5 %	0.102	2087	2	0.1 %
$\sigma_{rel}^{nL}$	0.109	0.034	16062	308	1.7 %	0.104	16323	47	0.3 %

**Tabelle C.9:** Relative Objektgenauigkeit  $\sigma_{rel}^{Linie}, \sigma_{rel}^{nL}$  natürlicher Linien aus der Klasse "Gehsteigkanten" im Block 4 in [m] am Objekt

Block 5									
1:4500, SW, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm, B/Z=1/1.86									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Linie}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Linie}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
18	0.086	0.027	4766	222	4.5 %	0.082	4983	5	0.1 %
19	0.076	0.024	263	0	0.0 %	0.072	262	1	0.4 %
28	0.100	0.030	852	3	0.4 %	0.095	854	1	0.1 %
35	0.068	0.023	4275	21	0.5 %	0.064	4283	13	0.3 %
40	0.134	0.040	1810	36	2.0 %	0.128	1813	33	1.8 %
46	0.066	0.023	3138	19	0.6 %	0.062	3147	10	0.3 %
51	0.096	0.036	2297	22	0.9 %	0.089	2298	21	0.9 %
$\sigma_{rel}^{nL}$	0.092	0.030	0.087	17401	323	1.9 %	17640	84	0.8 %

**Tabelle C.10:** Relative Objektgenauigkeit  $\sigma_{rel}^{Linie}, \sigma_{rel}^{nL}$  natürlicher Linien aus der Klasse "Gehsteigkanten" im Block 5 in [m] am Objekt

Block 1									
1:15000, RGB, 20 $\mu\text{m}$ , 21 cm, B/Z=1/2.55									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Linie}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Linie}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
04001	0.361	0.061	90	0	0.0 %	0.356	90	0	0.0 %
05002	0.484	0.073	144	13	8.3 %	0.478	157	0	0.0 %
06001	0.266	0.059	90	0	0.0 %	0.259	90	0	0.0 %
07001	0.295	0.080	90	0	0.0 %	0.284	90	0	0.0 %
07004	0.507	0.198	92	0	0.0 %	0.467	92	0	0.0 %
07006	0.486	0.071	90	0	0.0 %	0.481	90	0	0.0 %
08001	0.306	0.084	89	1	1.1 %	0.294	90	0	0.0 %
08002	0.379	0.082	90	0	0.0 %	0.370	90	0	0.0 %
09003	0.289	0.056	90	0	0.0 %	0.284	90	0	0.0 %
09004	0.193	0.059	90	0	0.0 %	0.184	90	0	0.0 %
10002	0.544	0.086	90	0	0.0 %	0.537	90	0	0.0 %
10004	0.363	0.113	99	0	0.0 %	0.345	99	0	0.0 %
10006	0.366	0.046	90	0	0.0 %	0.363	90	0	0.0 %
10008	0.347	0.064	90	0	0.0 %	0.341	90	0	0.0 %
11001	0.309	0.087	259	0	0.0 %	0.296	259	0	0.0 %
$\sigma_{rel}^{nL}$	0.379	0.089	1583	14	2.2 %	0.368	1597	0	0.0 %

**Tabelle C.11:** Relative Objektgenauigkeit  $\sigma_{rel}^{Linie}, \sigma_{rel}^{nL}$  natürlicher Linien aus der Klasse "Dachfirste" im Block 1 in [m] am Objekt

Block 2									
1:6000, SW, 15 $\mu\text{m}$ , 21 cm, B/Z=1/2.37									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Linie}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Linie}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
01002	0.072	0.013	90	0	0.0%	0.071	90	0	0.0%
01005	0.123	0.018	90	0	0.0%	0.122	90	0	0.0%
03001	0.104	0.031	90	0	0.0%	0.099	90	0	0.0%
04002	0.177	0.015	96	0	0.0%	0.176	96	0	0.0%
06001	0.184	0.019	90	0	0.0%	0.183	90	0	0.0%
07001	0.131	0.020	90	0	0.0%	0.129	90	0	0.0%
07004	0.080	0.025	88	2	2.2%	0.076	90	0	0.0%
09001	0.085	0.030	515	28	5.2%	0.079	521	22	4.1%
09003	0.113	0.021	91	0	0.0%	0.111	91	0	0.0%
09004	0.085	0.019	90	0	0.0%	0.083	90	0	0.0%
10004	0.128	0.036	354	58	14.1%	0.123	364	48	11.7%
10008	0.182	0.016	90	0	0.0%	0.181	90	0	0.0%
11001	0.187	0.014	90	0	0.0%	0.186	90	0	0.0%
12001	0.105	0.014	90	0	0.0%	0.104	90	0	0.0%
$\sigma_{rel}^{nL}$	0.131	0.022	1954	88	4.1%	0.130	1972	70	3.3%

**Tabelle C.12:** Relative Objektgenauigkeit  $\sigma_{rel}^{Linie}, \sigma_{rel}^{nL}$  natürlicher Linien aus der Klasse "Dachfirste" im Block 2 in [m] am Objekt

Block 3									
1:4500, RGB, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm, B/Z=1/1.86									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Linie}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Linie}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
01001	0.139	0.055	89	0	0.0%	0.128	89	0	0.0%
03001	0.083	0.037	92	0	0.0%	0.074	92	0	0.0%
06002	0.089	0.030	162	1	0.6%	0.084	163	0	0.0%
07001	0.097	0.046	90	0	0.0%	0.085	90	0	0.0%
07002	0.122	0.061	92	0	0.0%	0.106	92	0	0.0%
07004	0.153	0.066	91	0	0.0%	0.138	91	0	0.0%
07006	0.106	0.041	91	0	0.0%	0.098	91	0	0.0%
08001	0.093	0.038	90	0	0.0%	0.085	90	0	0.0%
08004	0.117	0.051	90	0	0.0%	0.105	90	0	0.0%
09004	0.139	0.051	340	0	0.0%	0.129	340	0	0.0%
09010	0.113	0.023	91	0	0.0%	0.111	91	0	0.0%
10002	0.095	0.033	90	0	0.0%	0.089	90	0	0.0%
10004	0.132	0.054	558	24	4.1%	0.120	559	23	4.0%
10006	0.139	0.049	91	0	0.0%	0.130	91	0	0.0%
10008	0.140	0.058	90	0	0.0%	0.127	90	0	0.0%
$\sigma_{rel}^{nL}$	0.119	0.048	2147	25	1.1%	0.109	2149	23	1.0%

**Tabelle C.13:** Relative Objektgenauigkeit  $\sigma_{rel}^{Linie}, \sigma_{rel}^{nL}$  natürlicher Linien aus der Klasse "Dachfirste" im Block 3 in [m] am Objekt

Block 4									
1:4500, SW, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm, B/Z=1/1.86									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Linie}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Linie}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
01001	0.106	0.037	90	0	0.0%	0.099	90	0	0.0%
03001	0.071	0.030	90	0	0.0%	0.064	90	0	0.0%
06002	0.096	0.039	157	15	8.7%	0.088	172	0	0.0%
07001	0.134	0.041	90	0	0.0%	0.128	90	0	0.0%
07002	0.122	0.063	89	0	0.0%	0.104	89	0	0.0%
07004	0.174	0.074	90	0	0.0%	0.158	90	0	0.0%
07006	0.139	0.029	90	0	0.0%	0.136	90	0	0.0%
08001	0.176	0.051	98	0	0.0%	0.168	98	0	0.0%
08004	0.160	0.057	90	0	0.0%	0.149	90	0	0.0%
09004	0.145	0.051	339	2	0.6%	0.136	341	0	0.0%
09010	0.123	0.029	91	0	0.0%	0.120	91	0	0.0%
10002	0.140	0.049	89	0	0.0%	0.131	89	0	0.0%
10004	0.148	0.055	547	27	4.7%	0.137	551	23	4.0%
10006	0.154	0.057	91	0	0.0%	0.143	91	0	0.0%
10008	0.117	0.052	91	0	0.0%	0.105	91	0	0.0%
$\sigma_{rel}^{nL}$	0.136	0.049	2132	44	2.6%	0.127	2153	23	1.0%

**Tabelle C.14:** Relative Objektgenauigkeit  $\sigma_{rel}^{Linie}$ ,  $\sigma_{rel}^{nL}$  natürlicher Linien aus der Klasse "Dachfirste" im Block 4 in [m] am Objekt

Block 5									
1:4500, SW, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm, B/Z=1/1.86									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Linie}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Linie}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Linie}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
01001	0.129	0.011	91	0	0.0%	0.129	91	0	0.0%
03001	0.067	0.020	89	0	0.0%	0.064	89	0	0.0%
06002	0.085	0.013	165	16	8.8%	0.084	178	3	1.7%
07001	0.086	0.012	89	0	0.0%	0.085	89	0	0.0%
07002	0.087	0.038	90	0	0.0%	0.078	90	0	0.0%
07004	0.120	0.035	89	1	1.1%	0.115	90	0	0.0%
07006	0.057	0.008	82	8	8.9%	0.056	90	0	0.0%
08001	0.095	0.016	90	1	1.1%	0.094	91	0	0.0%
08004	0.070	0.020	90	0	0.0%	0.067	90	0	0.0%
09004	0.076	0.023	343	10	2.8%	0.072	352	1	0.3%
09010	0.112	0.019	93	0	0.0%	0.110	93	0	0.0%
10002	0.050	0.015	90	0	0.0%	0.048	90	0	0.0%
10004	0.091	0.029	381	40	9.5%	0.086	382	39	9.3%
10006	0.100	0.016	90	0	0.0%	0.099	90	0	0.0%
10008	0.070	0.014	89	0	0.0%	0.069	89	0	0.0%
$\sigma_{rel}^{nL}$	0.089	0.021	1961	76	4.1%	0.087	1994	43	2.4%

**Tabelle C.15:** Relative Objektgenauigkeit  $\sigma_{rel}^{Linie}$ ,  $\sigma_{rel}^{nL}$  natürlicher Linien aus der Klasse "Dachfirste" im Block 5 in [m] am Objekt

## Anhang D

# Empirische Genauigkeiten aus den Snake-Auswertungen

### D.1 Reproduzierbarkeit der Snake-Linien

Block 1 1:15000, RGB, 20 $\mu\text{m}$ , 21 cm									
Nr	$\sigma_{repr}^S$ [ $\Delta$ ]	Reproduzierbarkeit im linken Bild				Reproduzierbarkeit im rechten Bild			
		$\sigma_{repr,lB}^S$ [ $\Delta$ ]	Verw. $\xi, \eta$	Elim. $\xi, \eta$	Elim. $\xi, \eta$ [%]	$\sigma_{repr,rB}^S$ [ $\Delta$ ]	Verw. $\xi, \eta$	Elim. $\xi, \eta$	Elim. $\xi, \eta$ [%]
29	0.093	0.088	4320	0	0.0 %	0.097	4744	26	0.5 %
37	0.128	0.164	2160	0	0.0 %	0.078	1862	28	1.5 %
42	0.095	0.096	2880	0	0.0 %	0.093	3035	25	0.8 %
52	0.130	0.133	2880	0	0.0 %	0.126	3150	0	0.0 %
61	0.117	0.110	6111	9	0.1 %	0.124	6000	30	0.5 %
62	0.103	0.109	7107	3	0.0 %	0.097	7101	9	0.1 %
63	0.195	0.187	5038	2	0.0 %	0.203	5121	9	0.2 %
64	0.131	0.099	4848	0	0.0 %	0.157	3240	0	0.0 %
65	0.113	0.068	4842	18	0.4 %	0.145	5114	16	0.3 %
66	0.162	0.144	8100	0	0.0 %	0.178	8100	0	0.0 %
67	0.146	0.168	3870	0	0.0 %	0.120	5744	0	0.0 %
73	0.110	0.120	2610	0	0.0 %	0.100	2700	0	0.0 %
74	0.117	0.128	4610	41	0.9 %	0.104	2970	0	0.0 %
75	0.090	0.108	2068	2	0.1 %	0.067	2160	0	0.0 %
$\sigma_{repr}^S$	0.127	0.127	61444	75	0.3 %	0.126	61041	143	0.5 %

*Tabelle D.1: Reproduzierbarkeit  $\sigma_{repr}^S$  der Snake-Linien im Block 1 in [Teile des Pixels]*

Block 2									
1:6000, SW, 20 $\mu\text{m}$ , 21 cm									
Nr	$\sigma_{repr}^S$ [ $\Delta$ ]	Reproduzierbarkeit im linken Bild				Reproduzierbarkeit im rechten Bild			
		$\sigma_{repr, lB}^S$ [ $\Delta$ ]	Verw. $\xi, \eta$	Elim. $\xi, \eta$	Elim. $\xi, \eta$ [%]	$\sigma_{repr, rB}^S$ [ $\Delta$ ]	Verw. $\xi, \eta$	Elim. $\xi, \eta$	Elim. $\xi, \eta$ [%]
17	0.292	0.306	2270	70	3.0 %	0.277	2872	0	0.0 %
26	0.190	0.202	11587	489	4.0 %	0.178	6917	643	8.5 %
27	0.271	0.243	17710	555	3.0 %	0.296	16771	599	3.4 %
28	0.250	0.308	5835	15	0.3 %	0.174	5641	29	0.5 %
29	0.235	0.206	5505	165	2.9 %	0.261	3681	9	0.2 %
32	0.277	0.258	4414	0	0.0 %	0.294	2790	0	0.0 %
34	0.205	0.196	6084	57	0.9 %	0.213	3847	23	0.6 %
39	0.221	0.266	8339	564	6.3 %	0.165	10044	126	1.2 %
40	0.253	0.214	8013	177	2.2 %	0.286	7331	319	4.2 %
41	0.263	0.219	9904	86	0.9 %	0.300	9277	353	3.7 %
42	0.275	0.226	8867	223	2.5 %	0.317	9023	157	1.7 %
72	0.212	0.217	3960	0	0.0 %	0.207	3674	16	0.4 %
$\sigma_{repr}^S$	0.247	0.241	92488	2401	2.8 %	0.253	81868	2274	3.2 %

*Tabelle D.2: Reproduzierbarkeit  $\sigma_{repr}^S$  der Snake-Linien im Block 2 in [Teile des Pixels]*

Block 3									
1:4500, RGB, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm									
Nr	$\sigma_{repr}^S$ [ $\Delta$ ]	Reproduzierbarkeit im linken Bild				Reproduzierbarkeit im rechten Bild			
		$\sigma_{repr, lB}^S$ [ $\Delta$ ]	Verw. $\xi, \eta$	Elim. $\xi, \eta$	Elim. $\xi, \eta$ [%]	$\sigma_{repr, rB}^S$ [ $\Delta$ ]	Verw. $\xi, \eta$	Elim. $\xi, \eta$	Elim. $\xi, \eta$ [%]
20	0.060	0.076	1350	0	0.0 %	0.039	1350	0	0.0 %
21	0.038	0.052	1260	0	0.0 %	0.016	1260	0	0.0 %
29	0.054	0.066	3303	27	0.8 %	0.039	1350	0	0.0 %
32	0.022	0.026	990	0	0.0 %	0.016	1260	0	0.0 %
33	0.108	0.130	1710	0	0.0 %	0.081	3393	27	0.8 %
35	0.244	0.114	5269	41	0.8 %	0.325	5583	63	1.1 %
37	0.132	0.130	4035	105	2.5 %	0.134	990	0	0.0 %
39	0.096	0.113	3091	59	1.9 %	0.074	1800	0	0.0 %
42	0.137	0.176	6429	141	2.1 %	0.081	8756	257	2.9 %
52	0.180	0.149	7470	0	0.0 %	0.206	4018	32	0.8 %
62	0.104	0.131	2320	20	0.9 %	0.067	2610	0	0.0 %
63	0.151	0.093	1800	0	0.0 %	0.193	4689	81	1.7 %
64	0.152	0.117	5933	7	0.1 %	0.181	7470	0	0.0 %
66	0.140	0.092	2826	54	1.9 %	0.176	2512	8	0.3 %
67	0.112	0.096	2700	0	0.0 %	0.126	2070	0	0.0 %
20	0.098	0.076	1350	0	0.0 %	0.116	6028	2	0.0 %
21	0.069	0.052	1260	0	0.0 %	0.083	3036	24	0.8 %
35	0.118	0.114	5269	41	0.8 %	0.121	2592	18	0.7 %
$\sigma_{repr}^S$	0.124	0.107	58365	495	1.1 %	0.138	60767	512	0.9 %

*Tabelle D.3: Reproduzierbarkeit  $\sigma_{repr}^S$  der Snake-Linien im Block 3 in [Teile des Pixels]*

Block 5									
1:4000, RGB, 15 $\mu\text{m}$ , 15 cm									
Nr	$\sigma_{repr}^S$ [ $\Delta$ ]	Reproduzierbarkeit im linken Bild				Reproduzierbarkeit im rechten Bild			
		$\sigma_{repr, lB}^S$ [ $\Delta$ ]	Verw. $\xi, \eta$	Elim. $\xi, \eta$	Elim. $\xi, \eta$ [%]	$\sigma_{repr, rB}^S$ [ $\Delta$ ]	Verw. $\xi, \eta$	Elim. $\xi, \eta$	Elim. $\xi, \eta$ [%]
20	0.064	0.063	2790	0	0.0 %	0.065	2790	0	0.0 %
21	0.088	0.105	2430	0	0.0 %	0.066	4278	0	0.0 %
29	0.099	0.110	6714	36	0.5 %	0.087	6894	36	0.5 %
32	0.091	0.064	1890	0	0.0 %	0.111	1980	0	0.0 %
33	0.080	0.092	3420	0	0.0 %	0.066	3420	0	0.0 %
35	0.088	0.095	11368	602	5.0 %	0.081	10702	18	0.2 %
37	0.248	0.236	7624	386	4.8 %	0.259	7685	145	1.9 %
39	0.151	0.160	6128	82	1.3 %	0.141	5216	4	0.1 %
42	0.272	0.249	9166	1184	11.4 %	0.294	12798	1102	7.9 %
52	0.235	0.253	14041	359	2.5 %	0.215	13822	668	4.6 %
62	0.166	0.178	4676	4	0.1 %	0.152	4440	60	1.3 %
63	0.182	0.133	3150	0	0.0 %	0.221	3150	0	0.0 %
64	0.181	0.160	9520	20	0.2 %	0.200	9709	11	0.1 %
66	0.202	0.219	5790	240	4.0 %	0.184	5442	408	7.0 %
67	0.167	0.115	5175	45	0.9 %	0.207	5117	103	2.0 %
20	0.064	0.063	2790	0	0.0 %	0.065	2790	0	0.0 %
21	0.088	0.105	2430	0	0.0 %	0.066	4278	0	0.0 %
35	0.088	0.095	11368	602	5.0 %	0.081	10702	18	0.2 %
$\sigma_{repr}^S$	0.156	0.152	110470	3560	3.6 %	0.160	115213	2573	2.8 %

Tabelle D.4: Reproduzierbarkeit  $\sigma_{repr}^S$  der Snake-Linien im Block 5 in [Teile des Pixels]

## D.2 Relative Genauigkeiten der Snake-Linien mit den manuellen Splines als Referenz

### D.2.1 Relativer Gesamtkoordinatenfehler der Snake-Linien

Block 1									
1:15000, RGB, 20 $\mu\text{m}$ , 21 cm, B/Z=1/2.55									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Snake}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Snake}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Snake}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
42	0.906	0.490	309	0	0.0 %	0.762	309	0	0.0 %
52	1.357	0.771	300	0	0.0 %	1.117	300	0	0.0 %
$\sigma_{rel}^S$	1.200	0.870	789	0	0.0 %	0.827	789	0	0.0 %

Tabelle D.5: Relativer Gesamtkoordinatenfehler  $\sigma_{rel}^S$  der Snake-Linien aus der Klasse "ebenes Gelände" in [m] im Block 1

Block 2									
1:6000, SW, 15 $\mu$ m, 21 cm, B/Z=1/2.37									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Snake}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Snake}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Snake}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
17	0.181	0.044	250	1	0.4 %	0.176	251	0	0.0 %
26	0.296	0.086	898	28	3.0 %	0.283	926	0	0.0 %
27	0.288	0.114	1832	9	0.5 %	0.264	1828	13	0.7 %
34	0.171	0.081	462	0	0.0 %	0.151	444	18	3.9 %
39	0.272	0.087	960	0	0.0 %	0.258	958	2	0.2 %
41	0.266	0.107	1071	3	0.3 %	0.243	1074	0	0.0 %
42	0.231	0.084	957	3	0.3 %	0.215	960	0	0.0 %
$\sigma_{rel}^S$	0.248	0.089	6430	44	1.2 %	0.232	6441	33	1.5 %

**Tabelle D.6:** Relativer Gesamtkoordinatenfehler  $\sigma_{rel}^S$  der Snake-Linien aus der Klasse "ebenes Gelände" in [m] im Block 2

Block 3									
1:4000, RGB, 30 $\mu$ m, 15 cm, B/Z=1/1.86									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Snake}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Snake}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Snake}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
32	0.251	0.066	99	0	0.0 %	0.242	99	0	0.0 %
33	0.223	0.125	180	0	0.0 %	0.185	180	0	0.0 %
37	0.302	0.108	437	0	0.0 %	0.282	437	0	0.0 %
39	0.223	0.125	180	0	0.0 %	0.185	180	0	0.0 %
42	0.168	0.063	565	3	0.5 %	0.156	568	0	0.0 %
52	0.151	0.047	785	0	0.0 %	0.143	785	0	0.0 %
$\sigma_{rel}^S$	0.225	0.094	246	3	0.2 %	0.205	22249	0	0.0 %

**Tabelle D.7:** Relativer Gesamtkoordinatenfehler  $\sigma_{rel}^S$  der Snake-Linien aus der Klasse "ebenes Gelände" in [m] im Block 3

Block 5									
1:4000, RGB, 15 $\mu$ m, 15 cm, B/Z=1/1.86									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Snake}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Snake}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Snake}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
32	0.113	0.102	185	0	0.0 %	0.049	185	0	0.0 %
33	0.184	0.081	355	0	0.0 %	0.165	355	0	0.0 %
37	0.153	0.065	816	2	0.2 %	0.139	807	11	1.3 %
39	0.159	0.078	552	0	0.0 %	0.139	552	0	0.0 %
42	0.232	0.089	1121	1	0.1 %	0.214	1113	9	0.8 %
52	0.204	0.084	1559	0	0.0 %	0.186	1537	22	1.4 %
$\sigma_{rel}^S$	0.178	0.084	4588	3	0.1 %	0.157	4549	42	0.9 %

**Tabelle D.8:** Relativer Gesamtkoordinatenfehler  $\sigma_{rel}^S$  der Snake-Linien aus der Klasse "ebenes Gelände" in [m] im Block 5

Block 3									
1:4000, RGB, 15 $\mu$ m, 15 cm, B/Z=1/1.86									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Snake}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Snake}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Snake}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
20	0.363	0.030	138	0	0.0 %	0.362	138	0	0.0 %
21	0.183	0.027	121	0	0.0 %	0.181	121	0	0.0 %
35	0.203	0.077	566	3	0.5 %	0.188	569	0	0.0 %
$\sigma_{rel}^S$	0.262	0.050	825	3	0.3 %	0.258	828	0	0.0 %

**Tabelle D.9:** Relativer Gesamtkoordinatenfehler  $\sigma_{rel}^S$  der Snake-Linien aus der Klasse "Gehsteigkanten" in [m] im Block 3

Block 5									
1:4000, RGB, 15 $\mu$ m, 15 cm, B/Z=1/1.86									
Nr	$\sigma_{rel,R}^{Snake}$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^{Snake}$ [m]	Verw. XY	Elim. XY	Elim. XY [%]	$\sigma_{rel,Z}^{Snake}$ [m]	Verw. Z	Elim. Z	Elim. Z [%]
20	0.342	0.023	288	0	0.0 %	0.341	288	0	0.0 %
21	0.221	0.052	260	0	0.0 %	0.215	260	0	0.0 %
35	0.143	0.040	1146	16	1.4 %	0.137	1140	22	1.9 %
$\sigma_{rel}^S$	0.249	0.040	1694	16	0.8 %	0.246	1688	22	1.1 %

**Tabelle D.10:** Relativer Gesamtkoordinatenfehler  $\sigma_{rel}^S$  der Snake-Linien aus der Klasse "Gehsteigkanten" in [m] im Block 5

**D.2.2 Systematische und zufällige Anteile des relativen Gesamtkoordinatenfehlers der Snake-Linien**

Block 1				
1:15000, RGB, 20 $\mu$ m, 21 cm, B/Z=1/2.55				
Nr	$s_{rel,XY}^{Snake, sys}$ [m]	$s_{rel,Z}^{Snake, sys}$ [m]	$s_{rel,XY}^{Snake, zuf}$ [m]	$s_{rel,Z}^{Snake, zuf}$ [m]
37	1.165	-0.289	0.280	0.374
42	0.480	-0.704	0.100	0.294
52	0.763	-1.064	0.111	0.341
	0.850	0.755	0.183	0.338

**Tabelle D.11:** Systematische und zufällige Anteile des relativen Gesamtkoordinatenfehlers  $\sigma_{rel}^S$  der Snake-Linien aus der Klasse "ebenes Gelände" in [m] im Block 1

Block 2				
1:2000, SW, 15 $\mu$ m, 21 cm, B/Z=1/2.37				
Nr	$s_{rel,XY}^{Snake,sys}$	$s_{rel,Z}^{Snake,sys}$	$s_{rel,XY}^{Snake,zuf}$	$s_{rel,Z}^{Snake,zuf}$
	[m]	[m]	[m]	[m]
17	0.038	0.053	0.023	0.168
26	0.068	-0.073	0.052	0.273
27	0.093	-0.100	0.066	0.244
34	0.070	0.035	0.041	0.148
39	0.075	-0.134	0.043	0.221
41	0.086	-0.062	0.065	0.235
42	0.070	-0.118	0.047	0.180
	0.073	0.089	0.050	0.214

**Tabelle D.12:** Systematische und zufällige Anteile des relativen Gesamtkoordinatenfehlers  $\sigma_{rel}^S$  der Snake-Linien aus der Klasse "ebenes Gelände" in [m] im Block 2

Block 3				
1:4000, RGB, 30 $\mu$ m, 15 cm, B/Z=1/1.86				
Nr	$s_{rel,XY}^{Snake,sys}$	$s_{rel,Z}^{Snake,sys}$	$s_{rel,XY}^{Snake,zuf}$	$s_{rel,Z}^{Snake,zuf}$
	[m]	[m]	[m]	[m]
32	0.049	-0.232	0.044	0.067
33	0.102	-0.151	0.071	0.107
37	0.092	-0.253	0.056	0.125
39	0.060	-0.114	0.047	0.085
42	0.052	-0.091	0.036	0.127
52	0.039	-0.087	0.026	0.114
	0.070	0.168	0.049	0.106

**Tabelle D.13:** Systematische und zufällige Anteile des relativen Gesamtkoordinatenfehlers  $\sigma_{rel}^S$  der Snake-Linien aus der Klasse "ebenes Gelände" in [m] im Block 3

Block 5				
1:4000, RGB, 15 $\mu$ m, 15 cm, B/Z=1/1.86				
Nr	$s_{rel,XY}^{Snake,sys}$	$s_{rel,Z}^{Snake,sys}$	$s_{rel,XY}^{Snake,zuf}$	$s_{rel,Z}^{Snake,zuf}$
	[m]	[m]	[m]	[m]
32	0.101	0.035	0.013	0.034
33	0.078	0.156	0.022	0.055
37	0.052	0.005	0.038	0.139
39	0.069	0.124	0.037	0.064
42	0.075	0.036	0.048	0.211
52	0.076	0.152	0.036	0.106
	0.077	0.104	0.034	0.118

**Tabelle D.14:** Systematische und zufällige Anteile des relativen Gesamtkoordinatenfehlers  $\sigma_{rel}^S$  der Snake-Linien aus der Klasse "ebenes Gelände" in [m] im Block 5

Block 3				
1:4000, RGB, 30 $\mu\text{m}$ , 15 cm, B/Z=1/1.86				
Nr	$s_{rel,XY}^{Snake,sys}$ [m]	$s_{rel,Z}^{Snake,sys}$ [m]	$s_{rel,XY}^{Snake,zuf}$ [m]	$s_{rel,Z}^{Snake,zuf}$ [m]
20	0.029	-0.334	0.009	0.140
21	0.020	-0.131	0.019	0.125
35	0.073	-0.146	0.027	0.118
	0.047	0.224	0.020	0.128

**Tabelle D.15:** Systematische und zufällige Anteile des relativen Gesamtkoordinatenfehlers  $\sigma_{rel}^S$  der Snake-Linien aus der Klasse "Gehsteigkanten" in [m] im Block 3

Block 5				
1:4000, RGB, 15 $\mu\text{m}$ , 15 cm, B/Z=1/1.86				
Nr	$s_{rel,XY}^{Snake,sys}$ [m]	$s_{rel,Z}^{Snake,sys}$ [m]	$s_{rel,XY}^{Snake,zuf}$ [m]	$s_{rel,Z}^{Snake,zuf}$ [m]
20	0.021	-0.313	0.008	0.137
21	0.049	-0.173	0.016	0.127
35	0.032	0.103	0.025	0.091
	0.036	0.215	0.018	0.120

**Tabelle D.16:** Systematische und zufällige Anteile des relativen Gesamtkoordinatenfehlers  $\sigma_{rel}^S$  der Snake-Linien aus der Klasse "Gehsteigkanten" in [m] im Block 5

## **Anhang E**

# **Abbildungen zu einigen Linien**



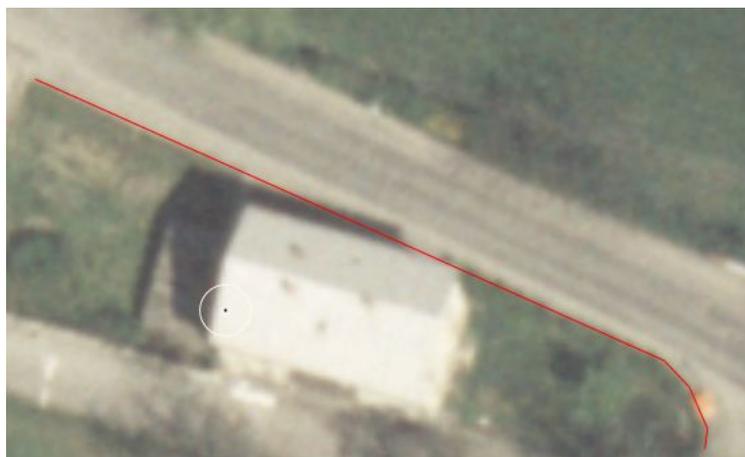
E.1.1: Linie 01



E.1.2: Linie 08



E.1.3: Linie 11



E.1.4: Linie 28



E.1.5: Linie 29



E.1.6: Linien 32 und 33

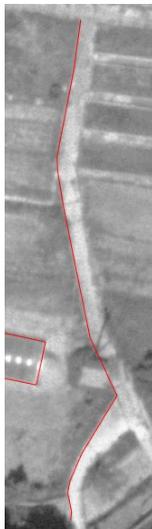
Abbildung E.1: Einige Exemplare von manuell ausgewerteten Linien im Block 1



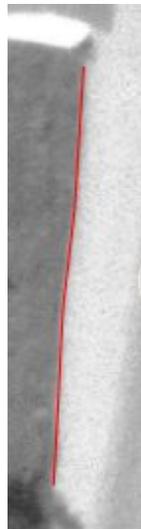
E.2.1: Linien 01÷09



E.2.2: Linie 11



E.2.3: Linie 14



E.2.4:  
Linie 17



E.2.5: Linie 34

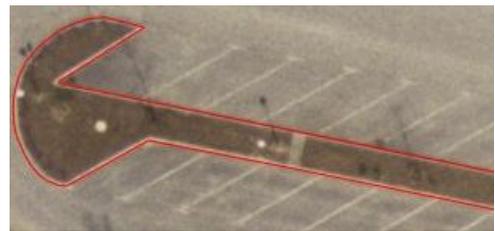


E.2.6: Linie 39

**Abbildung E.2:** Einige Exemplare von manuell ausgewerteten Linien im Block 2



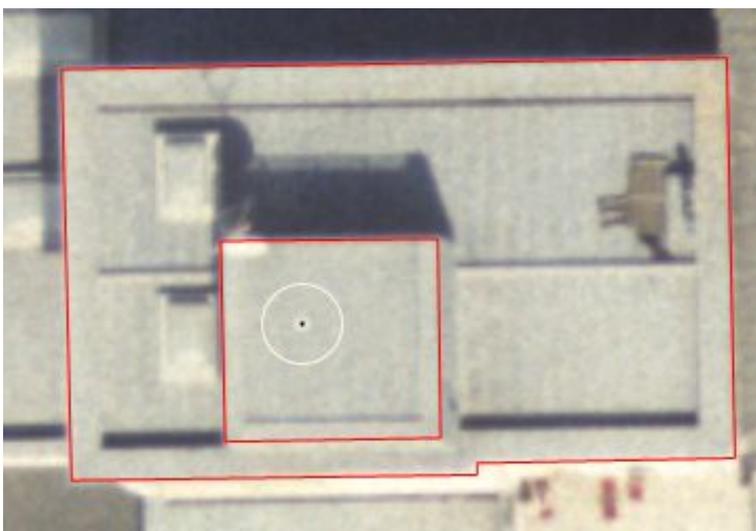
E.3.1: Linie 13



E.3.2: Linie 18



E.3.3: Linien 20÷21



E.3.4: Linien 23÷24



E.3.5: Linie 37

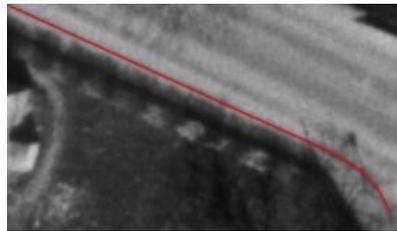


E.3.6: Linie 42

Abbildung E.3: Einige Exemplare von manuell ausgewerteten Linien im Block 3



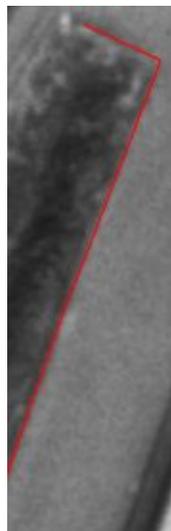
E.4.1: Linie 19



E.4.2: Linie 28



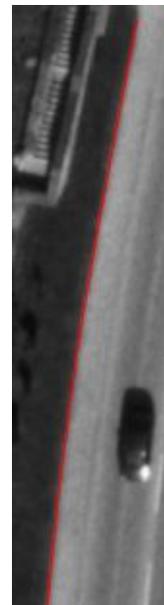
E.4.3: Linie 35



E.4.4: Linie 39

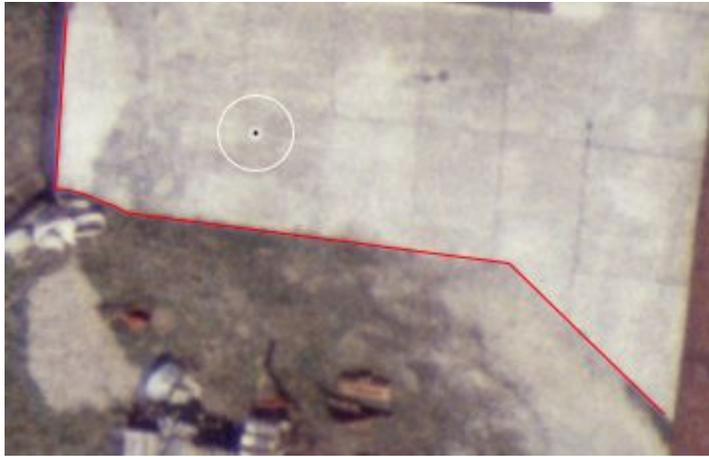


E.4.5: Linie 51

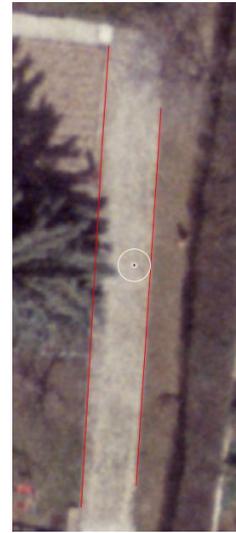


E.4.6: Linie 52

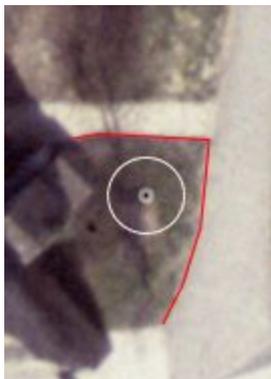
**Abbildung E.4:** Einige Exemplare von manuell ausgewerteten Linien im Block 4



E.5.1: Linie 13



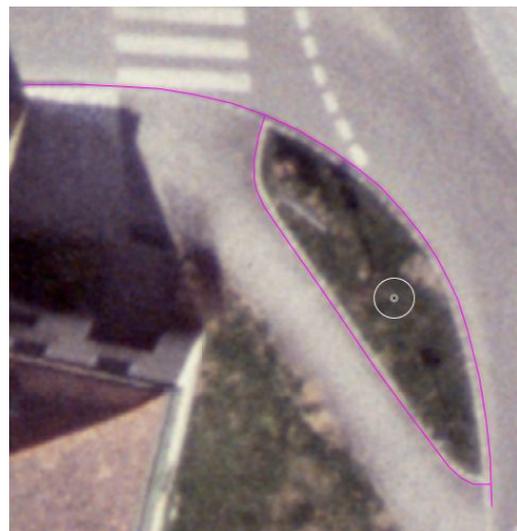
E.5.2: Linien 25÷26



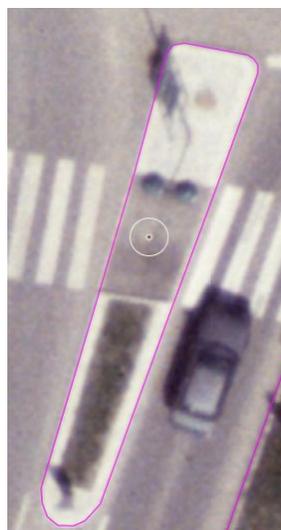
E.5.3: Linie 31



E.5.4: Linien 32÷33

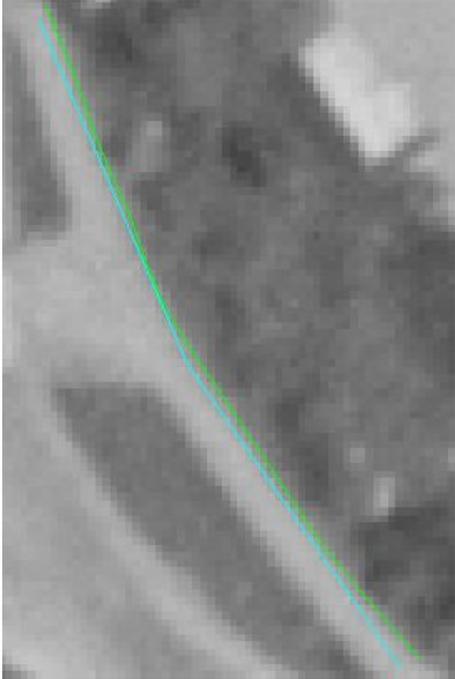


E.5.5: Linien 40÷41

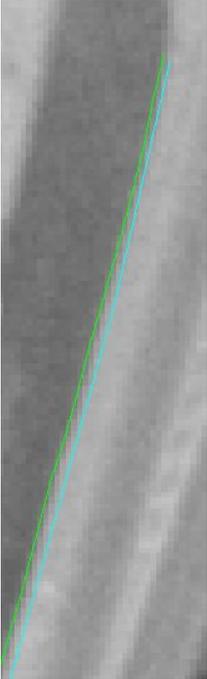


E.5.6: Linie 43

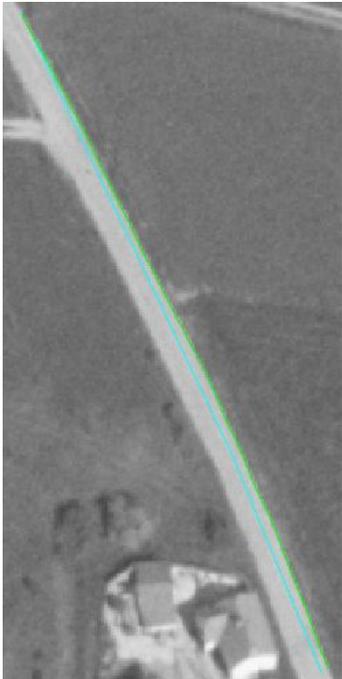
Abbildung E.5: Einige Exemplare von manuell ausgewerteten Linien im Block 5



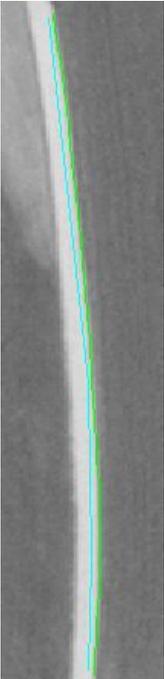
E.6.1: Snake 37



E.6.2: Snake 42

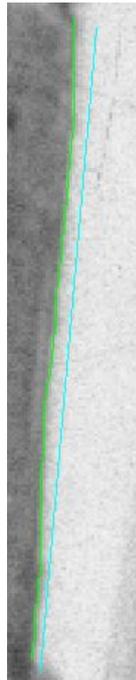


E.6.3: Snake 62

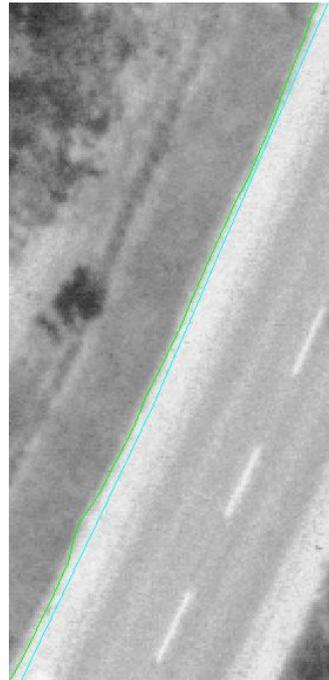


E.6.4: Snake 65

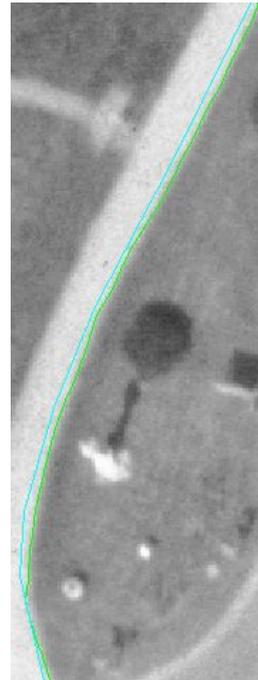
Abbildung E.6: Einige Exemplare von Snake-Linien im Block 1



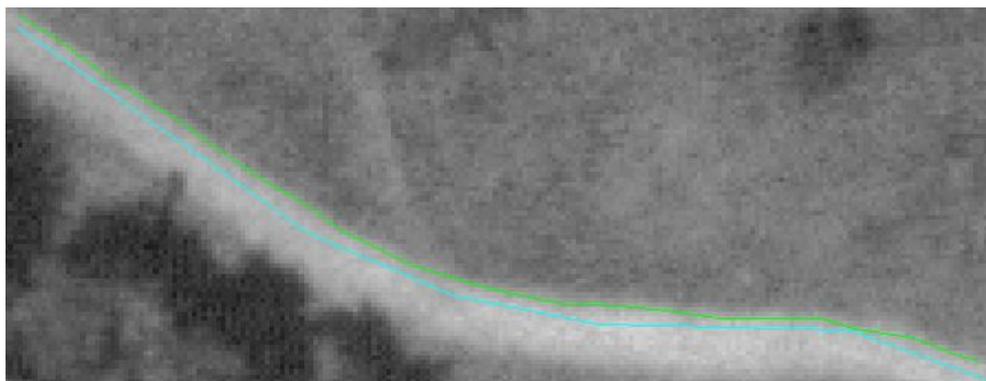
E.7.1:  
Snake 17



E.7.2: Snake 26

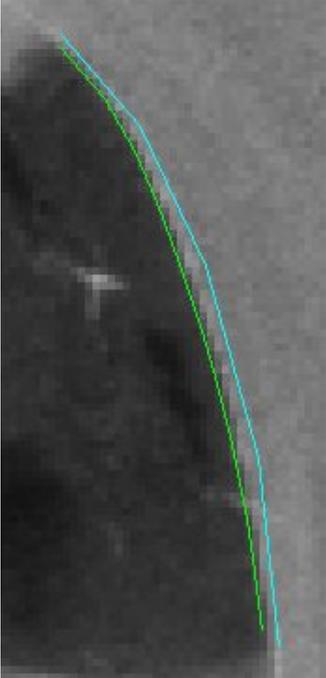


E.7.3: Snake 34

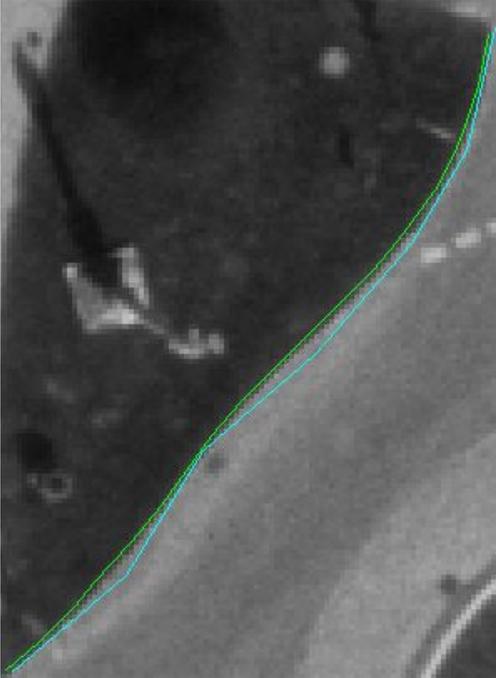


E.7.4: Snake 32

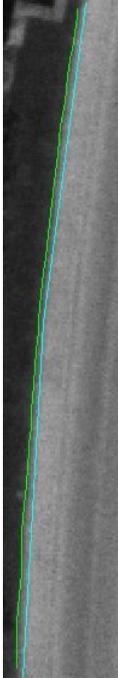
*Abbildung E.7: Einige Exemplare von Snake-Linien im Block 2*



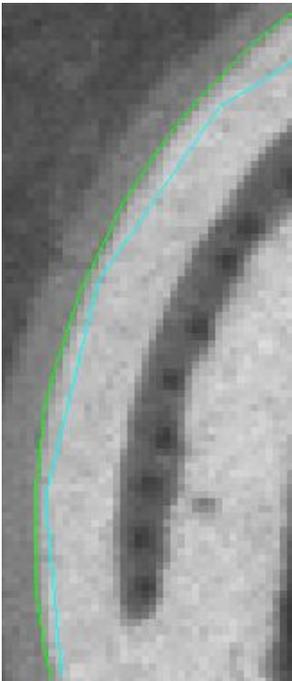
E.8.1: Snake 32



E.8.2: Snake 33



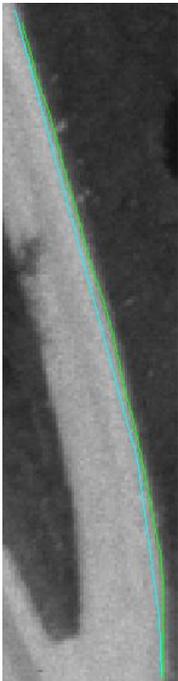
E.8.3: Snake 52



E.8.4: Snake 62

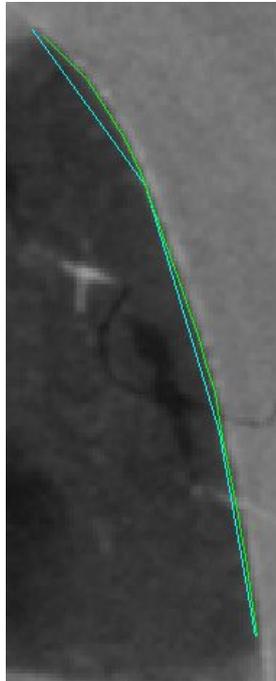


E.8.5: Snake 64

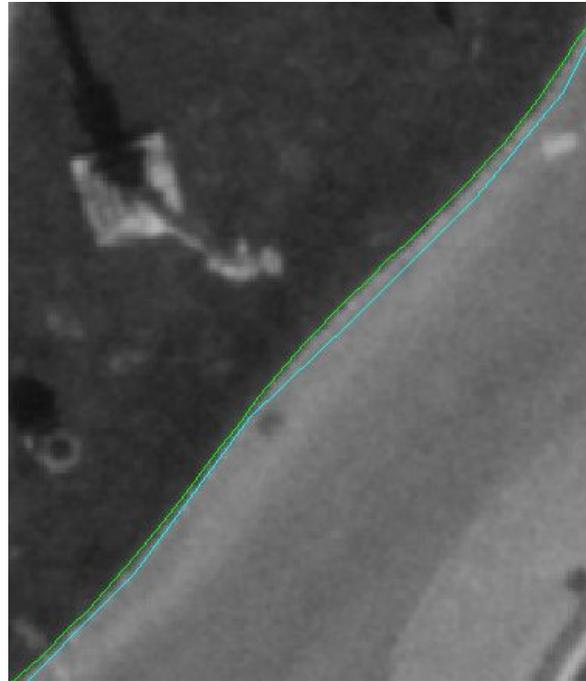


E.8.6: Snake 66

Abbildung E.8: Einige Exemplare von Snake-Linien im Block 3



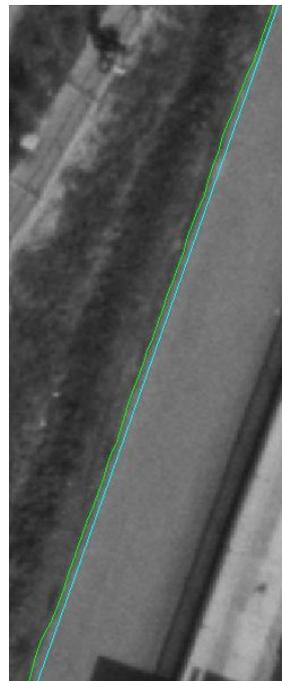
E.9.1: Snake 32



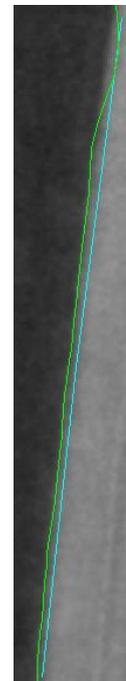
E.9.2: Snake 33



E.9.3: Snake 37



E.9.4: Snake 39



E.9.5: Snake 52

*Abbildung E.9: Einige Exemplare von Snake-Linien im Block 5*

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Dipl.-Ing. Veselina Dencheva

Geboren am 22/09/1979 in Sofia, Bulgarien, als Einzelkind von Univ. Doz. Dr. med. Stefan Denchev, Kardiologe, und Univ. Doz. Dr. phil. Emilia Dencheva (geboren als Kostova), Germanistin

## Ausbildung

1985 – 1995      Grundschule und Gymnasium in Sofia, Bulgarien  
1995 – 1997      Deutsches Sprachgymnasium in Sofia, Bulgarien  
05/1997          Gymnasiumabschluss

## Studium

1997 – 2003      Geodäsie Studium an der Technischen Universität in Sofia, Studienrichtung: *Angewandte Geodäsie*  
02/2001-09/2002      Anstellung bei DATECS GIS Centre in Sofia, Bulgarien  
03/2002-07/2002      Erasmusstudentin am I.P.F (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung) an der Technischen Universität in Wien  
01/2003          Studienabschluss. Diplomthema: *Die Erzeugung qualitativ hochwertiger Geländemodelle aus digitalisierten Höhenschichtlinien topographischer Karten*  
03/2003          Beginn des Doktoratsstudiums am I.P.F. (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung) an der Technischen Universität in Wien  
10/2003-09/2005      Träger des Karl-Neumaier-Stipendiums

Wien, 29. November 2005