



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

## DIPLOMARBEIT

# UAV im Kontext der Katastervermessung: Eine Genauigkeitsabschätzung auf Basis robuster Netzausgleichung

zur Erlangung des akademischen Grades

**Diplom-Ingenieur**

ausgeführt am Department für Geodäsie und Geoinformation  
Forschungsbereich Photogrammetrie  
der Technischen Universität Wien

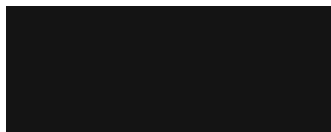
unter der Anleitung von

**Univ.Prof. Dr.-Ing. Dr.techn. Gottfried Mandlbürger**

durch

**Mario Pracher**  
**(11811374)**

Wien, Dezember 2025



Unterschrift (Verfasser)



Unterschrift (Betreuer)

# Eidesstattliche Erklärung

Ich, Mario Pracher, erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig von mir erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit aufgelistet und wurden an zitierten Stellen kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich erkläre weiters, dass die eingereichte digitale Fassung der Arbeit mit der gedruckten Fassung inhaltlich übereinstimmt.

St. Pölten, am 04.12.2025

A black rectangular box redacting the signature of the author.

*Unterschrift*

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich auf meinem Lebensweg, während meines Studiums und insbesondere bei der Anfertigung dieser Forschungsarbeit begleitet, unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gilt mein Dank Herrn Univ.Prof. Dr.-Ing. Dr.techn. Gottfried Mandlbürger für die Betreuung sowie die Möglichkeit, meine Diplomarbeit im Bereich der Photogrammetrie mit Schwerpunkt auf UAV-Messungen zu gestalten. Er brachte konstruktives Feedback ein, hatte für jede Frage eine hilfreiche Antwort und ließ mir bei der Umsetzung der Arbeit freie Hand. Vielen Dank für die ausgezeichnete Betreuung, die gute Kommunikation und den angenehmen Arbeitsprozess.

Ein herzliches Dankeschön richte ich an meine Arbeitskollegen Christoph, Aladin und Tobias von der Vermessung Schubert ZT GmbH, die mich maßgeblich bei der Datenverarbeitung, der Entwicklung der Targets und den Befliegungen im Feld unterstützten. Ebenso möchte ich mich für die Geduld und das Verständnis meines Kataster-Teams bedanken, in dem jeder Einzelne stets Rücksicht auf mein Studium und meine daraus resultierenden, teils exotischen Arbeitszeiten nahm.

Ein besonderer Dank gebührt meinen beiden Arbeitgebern Martin und Dominik. Mein beruflicher Werdegang – von der Lehre über die Matura bis zum Studium – wurde nur durch euer Vertrauen und eure Unterstützung möglich. Ich schätze euch dafür sehr und freue mich auf alles, was noch kommt.

Auch bei Christoph, Olivia, Lena und Benjamin möchte ich mich für unsere gemeinsame Zeit im Studium bedanken. Danke für das gemeinsame Lernen, Lachen, Motivieren – und vor allem für die daraus entstandene Freundschaft.

Ein besonderer Dank gilt meiner Partnerin Celine für die Geduld, den Rückhalt und die Unterstützung, mit denen du mich in jeder Phase meines Studiums begleitet hast.

Zu guter Letzt: Danke Mama, Danke Papa. In jeder Situation und bei jeder Entscheidung meines Lebens habt ihr mir Mut, Zuversicht und Unterstützung geschenkt. Danke für eure Liebe, eure warmen Worte sowie eure immerzu offenen Arme und Ohren.

# Abstract

The continuous advancement of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) opens new possibilities for high-precision surveying. This study evaluates the suitability and accuracy of UAV-based measurement techniques for cadastral surveying applications. The central question is whether UAV systems – specifically UAV LiDAR and UAV photogrammetry – can achieve reproducible single-point determinations with a positional accuracy better than 5 cm. This accuracy requirement corresponds to the tolerance limits defined in the Austrian Surveying Regulation and therefore represents a practically relevant benchmark for UAV-assisted cadastral surveys.

To address this question, both UAV LiDAR and photogrammetric datasets are acquired using a DJI Matrice 350 RTK equipped with the Zenmuse L2 LiDAR sensor and the Zenmuse P1 camera. For geometric evaluation, specific target objects are designed and 3D-printed. Spherical and pyramidal targets for LiDAR measurements, as well as coded targets for photogrammetry, are analysed using self-developed MATLAB adjustment algorithms. Another key focus is the development of a robust two-dimensional network adjustment program with automated outlier detection, which is used to derive precise terrestrial reference coordinates.

The results show that UAV LiDAR measurements achieve horizontal and vertical deviations of less than 2,5 cm. In photogrammetry, the DJI P1 camera produces deviations within the low-centimetre range, even under direct georeferencing. Consequently, the hypothesis that UAV-based surveying methods can achieve reproducible point determinations with positional accuracies of 5 cm or better is clearly confirmed.

The findings highlight the considerable potential of UAV-based cadastral surveying, particularly in topographically challenging terrain. At the same time, the study identifies a need for further development in data-processing workflows. An integrated, cadastral-compliant software environment that unifies UAV data acquisition, point-cloud processing, and geodetic adjustment would significantly enhance practical applicability. When properly planned and evaluated, UAV systems reliably meet legal accuracy requirements and represent an efficient technical and economic complement to conventional terrestrial surveying.

# Kurzfassung

Die fortschreitende Entwicklung unbemannter Luftfahrtsysteme (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) eröffnet neue Möglichkeiten für hochpräzise Vermessungen. Ziel dieser Arbeit war es, die Eignung und Genauigkeit von UAVs für Anwendungen im Katasterwesen zu untersuchen. Im Mittelpunkt stand die Frage, ob UAV-basierte Messverfahren – insbesondere UAV-LiDAR und UAV-Photogrammetrie – eine reproduzierbare Einzelpunktbestimmung mit einer Lagegenauigkeit von höchstens 5 cm ermöglichen. Diese Genauigkeitsanforderung entspricht den in der österreichischen Vermessungsverordnung festgelegten Toleranzgrenzen und stellt somit eine praxisrelevante Zielgröße für UAV-gestützte Katastervermessungen dar.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurden sowohl UAV-LiDAR- als auch photogrammetrische Aufnahmen mit einer DJI Matrice 350 RTK durchgeführt, ausgestattet mit dem Zennuse L2-LiDAR-Sensor bzw. der Zennuse P1-Kamera. Für die geometrische Auswertung wurden spezifische Zielkörper entwickelt und im 3D-Druck gefertigt. Kugel- und Pyramidentargets für LiDAR-Aufnahmen sowie codierte Targets für die Photogrammetrie wurden mithilfe eigens programmierter MATLAB-Ausgleichsverfahren ausgewertet. Ein weiterer Schwerpunkt lag in der Entwicklung eines robusten zweidimensionalen Netzausgleichsprogramms mit automatisierter Ausreißerererkennung, das zur Ermittlung präziser terrestrischer Referenzkoordinaten diente.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit UAV-LiDAR Lage- und Höhenabweichungen von unter 2,5 cm erreicht werden können. Auch in der Photogrammetrie konnten mit der DJI P1-Kamera sogar bei direkter Georeferenzierung Abweichungen im niederen Zentimeterbereich erzielt werden. Die Hypothese, dass UAV-gestützte Verfahren eine Einzelpunktbestimmung mit einer Lagegenauigkeit von höchstens 5 cm reproduzierbar ermöglichen, konnte damit eindeutig bestätigt werden.

Die Untersuchungen verdeutlichen das große Potenzial UAV-basierter Katastervermessungen, insbesondere in topografisch anspruchsvollem Gelände. Gleichzeitig zeigen sie den aktuellen Entwicklungsbedarf in der Datenprozessierung: Eine integrierte, katasterkonforme Softwareumgebung für UAV-Datenerfassung, Punktwolkenprozessierung und geodätische Auswertung würde den praktischen Einsatz erheblich vereinfachen. UAV-Systeme erfüllen bei geeigneter Flugplanung und sorgfältiger Auswertung die gesetzlichen Genauigkeitsanforderungen und stellen eine effiziente technische sowie wirtschaftliche Ergänzung zur klassischen terrestrischen Vermessung dar.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>iv</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Hypothese und Fragestellungen . . . . .	3
1.3 Methodik und Herangehensweise . . . . .	4
1.4 Gliederung . . . . .	6
<b>2 Geodätische Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1 Messsysteme . . . . .	7
2.1.1 Satellitengestützte Vermessung . . . . .	7
2.1.2 Terrestrische Vermessung . . . . .	8
2.1.3 UAV-LiDAR . . . . .	8
2.1.4 UAV-Photogrammetrie . . . . .	9
2.2 Bezugssysteme . . . . .	10
2.2.1 Referenzellipsoide . . . . .	10
2.2.2 Schwerebezugssysteme . . . . .	10
2.3 Koordinatenreferenzsysteme . . . . .	11
2.3.1 World Geodetic System 1984 . . . . .	11
2.3.2 International Terrestrial Reference System . . . . .	11
2.3.3 European Terrestrial Reference System 1989 . . . . .	12
2.3.4 Österreichische Landeskoordinatensystem MGI . . . . .	12
<b>3 Katastertechnische Grundlagen</b>	<b>13</b>
3.1 Gesetzliche Vorgaben . . . . .	13
3.2 Lokale Anfoderung an das Festpunktfeld . . . . .	14
3.2.1 Helmert-Ähnlichkeitstransformation . . . . .	14
<b>4 Ausgleichsaufgaben</b>	<b>15</b>
4.1 Grundlagen der Ausgleichsrechnung . . . . .	15
4.2 Freie Stationierung . . . . .	16
4.3 Netzausgleich (MATLAB-Programmierung) . . . . .	16
4.3.1 Bestimmung von Näherungskordinaten . . . . .	17

4.3.2	Iterativer Ausgleich und Gewichtung . . . . .	18
4.3.3	Ausreißerdetektion . . . . .	19
4.3.4	Qualitätsbeurteilung des Ausgleichsergebnis . . . . .	23
4.3.5	Beispielnetz . . . . .	24
4.4	Bündelblockausgleich . . . . .	30
4.5	Kugelausgleich (MATLAB-Programmierung) . . . . .	32
4.6	Pyramidenausgleich (MATLAB-Programmierung) . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Testgebiet: Schottergrube</b>	<b>40</b>
5.1	Datenerfassung . . . . .	40
5.1.1	Testgebiet und Referenzmessung . . . . .	40
5.1.2	UAV-Targets . . . . .	41
5.1.3	UAV-Konfigurationen . . . . .	44
5.2	Datenauswertung . . . . .	44
5.2.1	GNSS . . . . .	44
5.2.2	Netzausgleich . . . . .	45
5.2.3	UAV-LiDAR . . . . .	46
5.2.4	UAV-Photogrammetrie . . . . .	49
5.3	Ergebnisse und Vergleich . . . . .	51
5.3.1	Koordinatendifferenzen . . . . .	51
5.3.2	Erkenntnisse und Schwierigkeiten . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Testgebiet: Güterweg</b>	<b>56</b>
6.1	Datenerfassung . . . . .	56
6.1.1	Testgebiet und Referenzmessung . . . . .	56
6.1.2	UAV-Targets . . . . .	57
6.1.3	UAV-Konfigurationen . . . . .	59
6.2	Datenauswertung . . . . .	60
6.2.1	GNSS . . . . .	60
6.2.2	Netzausgleich . . . . .	61
6.2.3	UAV-LiDAR . . . . .	61
6.2.4	UAV-Photogrammetrie . . . . .	62
6.3	Ergebnisse und Vergleich . . . . .	63
6.3.1	Koordinatendifferenzen: UAV-LiDAR . . . . .	63
6.3.2	Koordinatendifferenzen: UAV-Photogrammetrie . . . . .	72
6.3.3	Erkenntnisse und Schwierigkeiten . . . . .	74
<b>7</b>	<b>Testgebiet: Forststraße</b>	<b>75</b>
7.1	Datenerfassung . . . . .	75
7.1.1	Testgebiet und Referenzmessung . . . . .	75
7.1.2	UAV-Targets . . . . .	77

7.1.3	UAV-Konfigurationen . . . . .	77
7.2	Datenauswertung . . . . .	78
7.2.1	GNSS . . . . .	78
7.2.2	Netzausgleich . . . . .	78
7.2.3	UAV-LiDAR . . . . .	80
7.2.4	UAV-Photogrammetrie . . . . .	80
7.3	Ergebnisse und Vergleich . . . . .	81
7.3.1	Koordinatendifferenzen: UAV-LiDAR . . . . .	81
7.3.2	Koordinatendifferenzen: UAV-Photogrammetrie . . . . .	83
7.3.3	Interne Genauigkeitsparameter . . . . .	84
7.3.4	Erkenntnisse und Schwierigkeiten . . . . .	87
7.3.5	Wirtschaftliche Aspekte . . . . .	88
<b>8</b>	<b>Conclusio</b>	<b>89</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>92</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>93</b>
	<b>Literatur</b>	<b>96</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

In nahezu allen technischen Fachbereichen steigt der wirtschaftliche Druck infolge zunehmender Anforderungen an Effizienz, Präzision und Kostensenkung. Dienstleistungen und Produkte sollen unmittelbar bereitgestellt werden und dabei möglichst geringe Kosten verursachen, während der anhaltende Fachkräftemangel die Situation zusätzlich verschärft (Dornmayr und Riepl, 2024). Diese Entwicklung betrifft auch das Vermessungswesen – insbesondere die Katastervermessung, welche durch ein breites Spektrum an Anwendungsfällen geprägt ist. Dieses reicht von Vermessungen im Bauland über agrarische Flächen bis hin zu Aufnahmen in Forstgebieten. Gerade bei Vermessungen im bewaldeten Gelände stoßen konventionelle Messverfahren häufig an ihre Grenzen: Signale von satellitengestützten Navigationssystemen (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) werden durch die Vegetation stark abgeschattet (Kemkes et al., 2018), weshalb solche Aufnahmen in der Praxis meist terrestrisch mit einer Totalstation durchgeführt werden müssen. Dies führt in der Regel zu langen, zeitintensiven Polygonzügen. Die hohe Anzahl an Stationierungen innerhalb eines Polygonzugs erhöht nicht nur die Fehlerfortpflanzung von Messabweichungen, sondern auch die Wahrscheinlichkeit von Messfehlern im Zuge der Aufnahme (Brunn, 2024). In weiterer Folge steigt der Aufwand für die Auswertung und die erreichbare Punktgenauigkeit wird negativ beeinflusst (Zeger, 1971). Innovative Messmethoden gewinnen daher zunehmend an Bedeutung. Fortschritte in der Sensorik, Datenerfassung und Automatisierung haben in den letzten Jahren zu einem Paradigmenwechsel in der Geodäsie geführt. Auch der Übergang von statischen zu kinematischen Messverfahren ist für viele Aufgabenstellungen bereits seit den frühen 2000er-Jahren weit verbreitet (Caspary, 2002).

Messsysteme auf unbemannten Luftfahrzeugen (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) ermöglichen heute eine effiziente und flächendeckende Erfassung von Objekten, deren geometrische Auflösung bereits mit der Genauigkeit terrestrischer GNSS-Messungen konkurrieren kann (Gojcic et al., 2019). Drohnen werden daher längst nicht mehr als reine Ergänzung gesehen, sondern sind oftmals die bevorzugte Wahl für eine Vielzahl geodätischer Aufgaben (Eltner et al., 2022). Insbesondere für topografische Geländeaufnahmen, Kubaturbestimmungen und weiträumige

Überwachungsaufgaben bietet ein UAV erhebliche Vorteile gegenüber klassischen Messmethoden – speziell in Bezug auf Zeitaufwand und Personalkosten (DVW, 2020). Seit der Integration von Echtzeit-GNSS (Real-Time Kinematic, RTK-GNSS) und Trägheitsnavigationssystemen (Inertial Navigation Systems, INS) in UAVs haben sich neben der UAV-Photogrammetrie zunehmend aktive Sensorsysteme wie UAV-LiDAR (Light Detection and Ranging, LiDAR) etabliert. Abbildung 1.1 zeigt eine vereinfachte zeitliche Entwicklung der horizontalen Systemgenauigkeit beider Technologien bei direkter Georeferenzierung – also ohne die Verwendung von Bodenpasspunkten. Die Lagegenauigkeit eines Gesamtsystems, bestehend aus Plattform und Sensoreinheit, wird dabei durch den Root Mean Square Error (RMSE) beschrieben, welcher den mittleren quadratischen Fehler zwischen gemessenen und bekannten Referenzwerten angibt. Die Grafik verdeutlicht den klaren Trend der UAV-Systemgenauigkeit, welche im letzten Jahrzehnt vom dm-Bereich in einen niederen cm-Bereich gesteigert werden konnte. Diese technologischen Fortschritte in der Sensorik und Plattformtechnologie machen UAVs zu einer Schlüsselinnovation der modernen Geodäsie. Sie ermöglichen nicht nur eine ausreichende Genauigkeit für zahlreiche vermessungstechnische Aufgaben, sondern bieten zugleich auch erhebliche wirtschaftliche Vorteile in einem zunehmend wettbewerbsorientierten Markt.

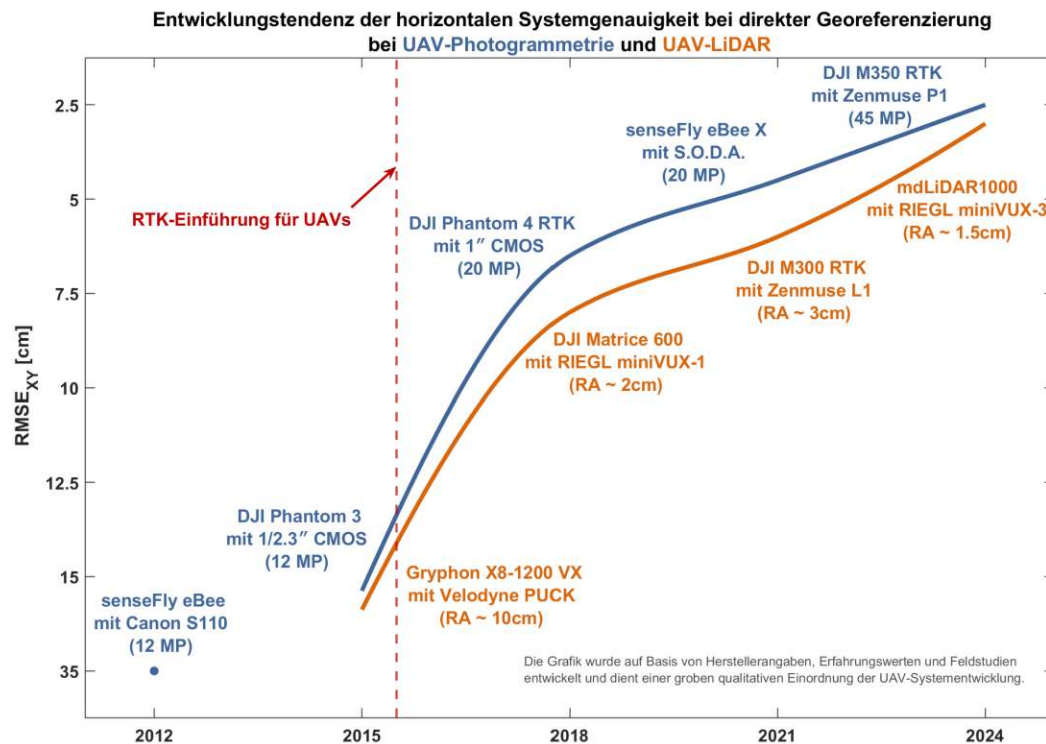


Abb. 1.1: Historische Entwicklung der Genauigkeit von UAV-Systemen

Neben der Datenerfassung selbst, bieten aktuelle Entwicklungen auch in der Auswertung geodätischer Messungen vielfältige Ansätze zur Qualitätsverbesserung. Eine robuste Ausgleichung und eine realistische Unsicherheitsabschätzung sollten integraler Bestandteil jeder Vermessung sein – idealerweise automatisiert und nachvollziehbar dokumentiert. In der Praxis wird dies jedoch häufig nicht in der wünschenswerten Konsequenz umgesetzt: Zeitdruck, unzureichend angepasste Softwarelösungen oder mangelndes Bewusstsein für eine kontrollierte Qualitätsbewertung können dazu führen, dass moderne technische Möglichkeiten ungenutzt bleiben und Unsicherheiten nicht transparent kommuniziert werden.

## 1.2 Hypothese und Fragestellungen

In dieser Arbeit wird die Hypothese untersucht, dass moderne UAV-Messsysteme unter geeigneten Flug- und Messkonfigurationen Einzelpunktbestimmungen mit einer Lagegenauigkeit von höchstens 5 cm ermöglichen und damit die in der österreichischen Vermessungsverordnung geforderten Genauigkeitsanforderungen für Katastervermessungen erfüllen können. Darüber hinaus wird angenommen, dass diese Genauigkeiten auch ohne den Einsatz von Bodenpasspunkten, also durch ausschließliche direkte Georeferenzierung, erreichbar sind. Es wird weiters erwartet, dass UAV-basierte Katastervermessungen, insbesondere im Forstgebiet, ein höheres wirtschaftliches Potenzial besitzen als konventionelle terrestrische Vermessungsmethoden mit Polygonzügen.

Weiterführend soll anhand der Ergebnisse auch eine auch in §1 Abs. 8 VermV enthaltene, mittlerweile überholte Aussage überprüft werden, wonach photogrammetrisch bestimmte Einschaltpunkte die geforderte mittlere Punktlagegenauigkeit von 3 cm nicht einhalten können. Es soll gezeigt werden, dass moderne UAV-gestützte Messverfahren in Kombination mit zeitgemäßer Auswertemethodik diese Genauigkeitsanforderung sehr wohl erreichen oder sogar übertreffen können. Eine Aktualisierung dieser Einschätzung wäre insbesondere für das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) relevant, da in schwer zugänglichen Gebirgs- und Forstgebieten vielerorts beschädigte oder verlorene Festpunkte bestehen. Gerade dort müssen Katastervermessungen häufig mit terrestrischem Anschluss erfolgen, was ein dichtes und stabiles Festpunktfeld voraussetzt. UAV-basierte Messungen könnten hier eine effiziente Möglichkeit zur Verdichtung und Modernisierung des Festpunktfeldes bieten.

Ausgehend von dieser Hypothese ergeben sich mehrere Fragestellungen. Zunächst ist zu untersuchen, welche Ziel-Targets am besten für eine präzise Einzelpunktbestimmung mittels UAV-LiDAR und UAV-Photogrammetrie geeignet sind. Aufbauend darauf stellt sich die Frage, unter welchen Flugkonfigurationen – insbesondere

Flughöhe, Fluggeschwindigkeit und Bildüberlappung – die höchsten Genauigkeiten erzielt werden können und wie sich die gewählten Targets in Kombination mit den Konfigurationen verhalten. Darüber hinaus soll auch die Intensitätsfilterung der LiDAR-Targets und deren Einfluss auf die erreichbare Genauigkeit untersucht werden. Die gewonnenen Erkenntnisse führen schließlich zur zentralen Frage der Arbeit, ob und unter welchen Bedingungen UAV-Messsysteme die amtlichen Genauigkeitsanforderungen für eine Katastervermessung erfüllen können und wie solche Messungen anhand geeigneter Genauigkeitsparameter überprüft werden können. Eine weitere Fragestellung betrifft die Erforderlichkeit von Bodenpasspunkten, also ob die gewünschte Genauigkeit auch durch ausschließliche direkte Georeferenzierung erreicht werden kann. Abschließend ist zu untersuchen, welche Höhengenaugkeiten mit UAV-Messsystemen erzielt werden können und wie sich UAV-basierte Messungen im wirtschaftlichen Vergleich zu terrestrischen Messmethoden darstellen.

Eine weitere Fragestellung betrifft die Qualität der terrestrischen Referenzkoordinaten, welche für die Bewertung der UAV-Messungen herangezogen werden. Etablierte Ausgleichsprogramme wie rmGEO arbeiten zwar zuverlässig, die verwendeten Ausgleichsalgorithmen sind jedoch in der Regel nicht vollständig offen gelegt. Beispielsweise liefert die in der Praxis übliche Ausreißerdetektion über Absolutglieder insbesondere bei kleineren systematischen Abweichungen nur eingeschränkt verlässliche Ergebnisse und erfordert zudem eine manuelle Auswahl der zu eliminierenden Beobachtungen. Zwar bietet rmGEO grundsätzlich auch spezifischere Möglichkeiten zur Ausreißerererkennung, diese setzen jedoch vertiefte Anwenderkenntnisse voraus und sind mit einem deutlich höheren manuellen Aufwand verbunden als ein vollständig automatisierter Prozess. Aus diesem Grund soll im Rahmen dieser Arbeit ein eigenes, transparentes MATLAB-Programm zur robusten Netzausgleichung entwickelt werden. Ziel dieses Programms ist es, Referenzkoordinaten mit einem hohen Maß an Nachvollziehbarkeit, innerer Zuverlässigkeit und statistischer Kontrolle bereitzustellen, sodass auch kleinere systematische Abweichungen verlässlich erkannt und die Unsicherheiten der berechneten Koordinaten fundiert beurteilt werden können.

## 1.3 Methodik und Herangehensweise

Die Arbeit folgt einem inkrementellen Untersuchungsdesign, das sich in drei aufeinander aufbauende Testgebiete gliedert. In einem ersten Messversuch wird eine freiliegende Schottergrube überflogen, um grundlegende Erkenntnisse über geeignete UAV-Targets zu gewinnen. Auf Basis dieser Ergebnisse werden die Targets optimiert und anschließend in weiteren Messflügen entlang eines angrenzenden Güterweges eingesetzt, um geeignete Flugkonfigurationen für eine UAV-Katastervermessung zu

bestimmen. Im letzten Schritt wird an einer dicht bewaldeten Forststraße unter realitätsnahen Bedingungen die geeignetste Kombination aus Targets und Flugparametern getestet. Abschließend werden alle verwendeten Messsysteme hinsichtlich erreichbarer Genauigkeit, Kosten und Zeitaufwand miteinander verglichen und geeignete Genauigkeitsparameter für eine amtliche Qualitätskontrolle vorgeschlagen.

Für die Auswertung der eigens entwickelten LiDAR-Targets werden spezielle Algorithmen vorgestellt, die sowohl der Punktwolkenfilterung als auch der präzisen geometrischen Ausgleichung der Zielkörper dienen. Die entwickelten Targettypen umfassen kugelförmige Targets sowie gleichschenkelige Dreieckspyramiden, für die jeweils robuste Ausgleichsverfahren implementiert wurden. Die Kugeltargets werden auf Grundlage der allgemeinen Kugelgleichung mithilfe eines kombinierten LMS-RANSAC-Verfahrens bestimmt, wobei LMS für Least Median of Squares und RANSAC für Random Sample Consensus steht. Für die pyramidalen Targets kommt ein robuster LS-RANSAC-Ansatz (Least Squares, LS) zur Anwendung. Hierbei werden zunächst die einzelnen Seitenflächen separat ausgeglichen, bevor die Pyramidenspitze durch den Schnitt dieser Ebenen berechnet wird. Für beide Targettypen werden interne Qualitätsparameter definiert, die eine fundierte Bewertung der jeweiligen Ausgleichung ermöglichen.

Die Entwicklung des Programms zur robusten Netzberechnung erfolgt ebenfalls in MATLAB. Die automatisierte Ausreißerdetektion basiert auf einem iterativen Verfahren, das die Beobachtungen mithilfe eines Score-basierten Ansatzes bewertet. Als Eingabedaten dienen ausschließlich Festpunktkoordinaten und Messwerte, sodass auch die Berechnung geeigneter Näherungslösungen ebenfalls vollständig automatisiert erfolgt. Im Anschluss werden Zuverlässigkeits- und Unsicherheitsparameter bestimmt und gemeinsam mit den ausgeglichenen Koordinaten sowie den Residuen in einem Netzplot visualisiert. Ein Ausgleichsprotokoll stellt zusätzlich die vollständige Dokumentation und Nachvollziehbarkeit der Berechnung sicher. Die Ausgleichung kann wahlweise auf Basis einer gezwängten, einer freien oder einer weichen Datumslagerung durchgeführt werden. Anhand eines Beispielnetzes mit synthetischen Messdaten wird gezeigt, welchen Vorteil das robuste Ausgleichsprogramm im Vergleich zur Netzausgleichung mit rmGEO bietet. In weiterer Folge wird das Programm zur Bestimmung präziser und verlässlicher Referenzkoordinaten der Testgebiete eingesetzt, welche die Grundlage für den Vergleich mit den UAV-Messungen bilden.

## 1.4 Gliederung

Die Arbeit gliedert sich in insgesamt acht Kapitel. Nach der Einleitung werden im Kapitel 2 die Messmethoden und die technischen Spezifikationen der verwendeten Messsysteme erläutert. Anschließend wird auf die verschiedenen Koordinatensysteme eingegangen, die im Rahmen von Katastervermessungen berücksichtigt werden müssen. Kapitel 3 beschreibt die geltenden gesetzlichen Genauigkeitsvorgaben für Katastervermessungen und den Umgang mit Klaffungen im österreichischen Festpunktfeld. Kapitel 4 widmet sich den mathematischen Ausgleichsaufgaben, welche zur Auswertung der Messdaten relevant sind. Zunächst werden die Grundlagen der Ausgleichsrechnung wiederholt. Im Unterkapitel 4.3 wird anschließend das entwickelte Programm zur Netzausgleichung näher vorgestellt. Die nachfolgenden Unterkapitel 4.5 und 4.6 beschreiben den Kugelausgleich und den Pyramidenausgleich. Die Kapitel 5, 6 und 7 beginnen jeweils mit der Vorstellung des entsprechenden Testgebiets und einer Beschreibung der terrestrischen Referenzmessung. Darauffolgend werden die verwendeten Targets und gewählten Konfigurationen bei der UAV-Datenerfassung beschrieben. In der jeweiligen Datenauswertung werden zunächst die benötigten GNSS-Transformationen für die gewählte Anfelderung in das Österreichische Landeskoordinatensystem erläutert, sowie die Ausgleichsergebnisse der Referenznetze gezeigt. Anschließend wird die Auswertung der UAV-Messungen beschrieben. Jedes Testgebiet-Kapitel endet mit einer Gegenüberstellung der Koordinatendifferenzen der verwendeten Messsysteme. In Kapitel 7 werden darüber hinaus auch die wirtschaftlichen Aspekte der Messsysteme gegenübergestellt, sowie mögliche Genauigkeitsparameter vorgestellt, die zur Einbettung der Messmethoden in die katastertechnische Praxis dienen könnten. Eine zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse und ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen runden die Arbeit in Kapitel 8 ab.

# 2 Geodätische Grundlagen

Die in diesem Kapitel vorgestellten geodätischen Grundlagen beruhen sowohl auf universitätseigenen Lehrunterlagen, insbesondere Böhm (2020), als auch auf Fachliteratur wie Freedon und Rummel (2018), Heunecke et al. (2000), Hofmann-Wellenhof et al. (2008), Heipke (2017), Yeo et al. (2021) und Staffas et al. (2024).

## 2.1 Messsysteme

Im Zuge der Arbeit wurden für jedes Messgebiet mehrere Messmethoden zur Bestimmung der vermarkten Punkte angewendet. Zunächst wurden alle Punkte mit einem GNSS-Empfänger und anschließend mit einer Totalstation eingemessen. Die GNSS-Punkte dienten in der Auswertung als Näherungskordinaten für einen Netzausgleich der terrestrischen Vermessung. Abschließend wurden die Testgebiete, und somit auch wieder alle markierten Punkte, mit unterschiedlichen Konfigurationen und Sensoren mit einem UAV überflogen. Alle für die Arbeit notwendigen Messsysteme wurden von der Vermessung Schubert ZT GmbH zur Verfügung gestellt. Zusätzlich stellte auch noch die TU Wien einen photogrammetrischen Sensor-Aufsatz für die Drohne bereit.

### 2.1.1 Satellitengestützte Vermessung

Globale Navigationssatellitensysteme (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) dienen der präzisen Positionierung und Navigation auf der Erde. Ein GNSS-System welches in der klassischen Vermessung Anwendung findet, besteht üblicherweise aus einem Lotstab mit einem darauf montierten Signal-Empfänger. Diesem werden über Funkcodes kontinuierlich die Position und Uhrzeit von Satelliten mitgeteilt, wodurch sich in Echtzeit die aktuelle Positionskoordinate des Empfängers auf der Erde bestimmen lässt. Zur Genauigkeitssteigerung der Positionsbestimmung können Korrekturdaten von stationären Empfangsstationen bezogen werden. Für die Punktbestimmung mittels GNSS wurde im Rahmen der Messarbeiten der Austrian Positioning Service (APOS) als Korrekturdatenanbieter und ein Leica Viva GS14 der Firma Leica Geosystems AG als Empfänger verwendet. Laut Datenblatt wird bei RTK-Messungen unter guten Bedingungen und bei hoher Satellitenverfügbarkeit eine horizontale Genauigkeit von  $8 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$  erreicht (*Leica Viva GS14 Data*

Sheet, 2016). Der ppm-Wert bezieht sich dabei auf die Entfernung zur nächstgelegenen Referenzstation. Je nach Korrekturdatenanbieter beträgt der Abstand zwischen den realen Referenzstationen in Österreich typischerweise 30 bis 70 Kilometer. Durch den Einsatz des *Master Auxiliary Concept* (MAC), bei dem Messdaten mehrerer Referenzstationen an den Rover übertragen werden, oder durch die Erzeugung einer *Virtual Reference Station* (VRS) in unmittelbarer Nähe des Rovers können entfernungsabhängige Fehlerquellen deutlich reduziert werden. Unter guten Bedingungen sind daher horizontale Echtzeitgenauigkeiten im Bereich weniger Zentimeter erreichbar. In Waldgebieten kann sich die Genauigkeit jedoch durch Abschattung oder Mehrwegeeffekte erheblich verschlechtern. Die Untersuchung von Wing et al. (2005) zeigte, dass sich die horizontale Positionsgenauigkeit im dichten Wald gegenüber offenen Flächen sogar um mehrere Meter verschlechtern kann.

### 2.1.2 Terrestrische Vermessung

Für eine aussagekräftige Genauigkeitsabschätzung der UAV-Messungen ist die Zuverlässigkeit und die Genauigkeit von GNSS-bestimmten Punkten nicht ausreichend. Aus diesem Grund wurden terrestrische Messungen durchgeführt, um die Punktkoordinaten im Zuge einer Ausgleichung zu optimieren. Die dafür notwendigen Distanz- und Richtungsmessungen erfolgte mit einer Leica Viva TS15. Diese Totalstation weist laut Datenblatt eine Winkelgenauigkeit von 1 mgon sowie eine Distanzmessgenauigkeit von 1 mm + 1,5 ppm bei Verwendung eines Reflektors auf (*Leica Viva TS15 Datenblatt*, 2010).

### 2.1.3 UAV-LiDAR

Die Befliegung der Testgebiete erfolgte mit einer Matrice 350 RTK der Firma DJI. Diese Drohnenplattform bietet eine integrierte RTK-Positionierung mit einer horizontalen Genauigkeit von 1 cm + 1 ppm und einer vertikalen Genauigkeit von 1,5 cm + 1 ppm (*Matrice 350 RTK - Technische Daten*, 2023). Darüber hinaus sorgt ein 6-Richtungs-Hinderniserkennungssystem für erhöhte Flugsicherheit, insbesondere in komplexem Gelände. Mit einer maximalen Flugzeit von bis zu 55 Minuten und einer Nutzlastkapazität von 2,7 kg ermöglicht die Matrice 350 den parallelen Einsatz mehrerer Sensoren. Zur Datenerfassung wurden die Testgebiete sowohl mit einem aktiven Sensorsystem – dem Zenmuse L2 LiDAR-Modul – als auch mit einem passiven Sensorsystem – der Zenmuse P1 Vollformatkamera – befliegen. Beide Sensoren stammen ebenfalls von DJI. Aktive Sensorsysteme erzeugen eigenständig Strahlung, um Objekte zu erfassen. Ein LiDAR-Sensor sendet diese Strahlung in Form von Laserimpulsen aus. Bei UAV-LiDAR-Messungen werden die ausgesandten Signale vom Boden reflektiert bzw. zurückgestreut und anschließend vom Sensor wieder empfangen. Die Bestimmung der Entfernung erfolgt dabei

entweder mittels Time-of-Flight (ToF)-Methode oder Continuous-Wave (CW)-Methode. Erstere kommt auch bei der Zenmuse L2 zum Einsatz. Die Sensorik der L2 arbeitet mit einer Wellenlänge von 905 nm und mit einer Pulsfrequenz von 40 kHz. Durch die sechs LiDAR-Einheiten ergibt sich eine Scanfrequenz von 240 kHz. Parallel dazu beträgt die maximale Abtastfrequenz (Sampling Frequency) bis zu 720 kHz, bedingt durch bis zu drei Echos pro Laserimpuls. Dies gibt an, wie oft der Sensor pro Sekunde reflektierte Lasersignale aufzeichnet und verarbeitet. Das horizontale Sichtfeld (*Field of View*, FOV) des Scanners liegt bei 70°, was unter optimalen Bedingungen Entfernungsmessungen bis zu 450 m ermöglicht. Unter Berücksichtigung der Scanfrequenz sowie des FOV können bei einer Flughöhe von 100 m Punktdichten von bis zu 240 Punkten/m<sup>2</sup> erreicht werden. Durch die Kombination von GNSS und einer hochpräzisen, von DJI selbst entwickelten INS kann mit der L2 unter geeigneten Bedingungen eine vertikale Genauigkeit von bis zu 4 cm sowie eine horizontale Genauigkeit von bis zu 5 cm erzielt werden (*Zenmuse L2 - Technisches Datenblatt*, 2023).

### 2.1.4 UAV-Photogrammetrie

Passive Sensorsysteme zeichnen sich durch die Nutzung natürlicher Strahlung aus. Dies trifft auf die meisten Kamerasysteme zu, da hier das Sonnenlicht als externe Strahlungsquelle verwendet wird. Photogrammetrische UAV-Sensoren, wie die Zenmuse P1, erfassen Bilddaten in hoher räumlicher Auflösung und eignen sich besonders für die Erstellung von Orthophotos und Geländemodellen. Die P1 verfügt über einen Vollformatsensor mit 45 MP Auflösung und ist mit einem globalen Verschluss ausgestattet, was Bildverzerrungen bei dynamischen Flugmanövern reduziert (*Zenmuse P1 - Datenblatt*, 2020). In Kombination mit der RTK-Positionierung der Matrice 350 und einer integrierten INS können die Bilddaten präzise georeferenziert werden. Im Vergleich zu aktiven Sensorsystemen ist die Genauigkeit photogrammetrischer Verfahren deutlich stärker von der Fluggeometrie abhängig. So beeinflussen insbesondere die Flughöhe, die Brennweite der Kamera sowie die Basislänge zwischen zwei Aufnahmestandpunkten die erreichbare Höhen- und Längengenauigkeit.

Auch die Zenmuse L2 verfügt über eine integrierte Kameraeinheit, die eine RGB-Bildauflösung von 2 MP bietet. Diese dient in erster Linie zur Aufnahme von Intensitätsinformationen und zur Farbgebung der erzeugten Punktwolke (*Zenmuse L2 - Technisches Datenblatt*, 2023). Für das erste Testgebiet erfolgte die photogrammetrische Auswertung nur mit diesen Kameradaten. Die späteren Testgebiete wurden auch mit der Zenmuse P1 befliegen.

## 2.2 Bezugssysteme

Für die eindeutige Definition geodätischer Koordinatensysteme ist ein klar definiertes, physikalisch fundiertes Bezugssystem notwendig. Ein solches Bezugssystem bildet gemeinsam mit dem zugehörigen, realisierten Koordinatensystem ein sogenanntes Koordinatenreferenzsystem (*Coordinate Reference System*, CRS). Modelle der Erdfigur beschreiben die geometrischen und physikalischen Eigenschaften der Erde und werden innerhalb eines Bezugssystems definiert. In vielen Anwendungen wird dabei ein Rotationsellipsoid verwendet, da es die Erdfigur sowohl geometrisch als auch aus potentialtheoretischer Sicht gut approximiert. Ein Bezugssystem ermöglicht aufbauend die Definition ellipsoidische oder kartesischer Koordinatensysteme. Für die praktische Nutzung eines Bezugssystems in Form eines anwendbaren Koordinatensystems wird ein geodätisches Datum benötigt. Es legt eindeutig fest, wie das Bezugssystem innerhalb des Erdkörpers positioniert und orientiert ist.

### 2.2.1 Referenzellipsoide

Ein Rotationsellipsoid kann durch seine beiden Halbachsen, seine Abplattung, seine Exzentrizitäten sowie seine Hauptkrümmungsradien beschrieben werden, wobei bereits zwei voneinander unabhängige Größen ausreichen, um seine Form eindeutig zu definieren. Das für die Geodäsie wichtigste globale Referenzellipsoid ist jenes des Geodetic Reference System 1980 (GRS80). Es ist international als mittleres Erdellipsoid definiert, da es die Erdfigur im globalen Mittel volumenmäßig optimal approximiert. Bezogen auf das GRS80-Ellipsoid beträgt die mittlere Geoidundulation in Österreich etwa 47 m. Aussagen über Geoidabweichungen erfordern jedoch stets ein geodätisches Datum, das die räumliche Lagerung des Ellipsoids festlegt. Da moderne globale Referenzsysteme wie ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989), WGS84 (World Geodetic System 1984) und das ITRS (International Terrestrial Reference System) nahezu identische Ellipsoide und Lagerungen verwenden, gilt dieser mittlere Undulationswert systemübergreifend.

### 2.2.2 Schwerebezugssysteme

Während Referenzellipsoide ein geometrisches Erdmodell bereitstellen, bilden Schwerebezugssysteme die Grundlage für die Definition physikalisch sinnvoller Höhen. Sie beruhen auf Erdschwerermodellen, die das Gravitationspotential der Erde mithilfe einer Kugelfunktionsentwicklung in harmonische Terme bis zu einer bestimmten Ordnung darstellen. Bekannte Beispiele sind das Earth Gravitational Model 1996 (EGM96) mit einer Entwicklung bis Grad 360 und das EGM2008, das bis Grad 2160 reicht. Solche Gravitationsmodelle ermöglichen es, die Ortsabhängigkeit des Erdschwerepotentials präzise zu beschreiben und Geoidundulationen in Bezug auf

ein Referenzellipsoid zu berechnen. Damit bilden sie die physikalische Grundlage für eine zuverlässige Höhenbestimmung in der modernen Geodäsie und sichern den Zusammenhang zwischen geometrischen und physikalischen Bezugssystemen, sodass Koordinaten- und Höhenangaben weltweit konsistent und vergleichbar bleiben.

## 2.3 Koordinatenreferenzsysteme

Geodätische Koordinatensysteme definieren den mathematischen Teil eines Koordinatenreferenzsystems und bilden die Grundlage für die präzise Beschreibung von Punkten und Koordinaten auf der Erdoberfläche. Globale Bezugssysteme, wie zum Beispiel das ITRS oder WGS84, werden häufig als „Koordinatensysteme“ bezeichnet, obwohl sie streng genommen vollständige Koordinatenreferenzsysteme darstellen. Diese terminologische Vereinfachung ist in der Praxis üblich, setzt jedoch voraus, dass der zugrunde liegende Unterschied klar ist. Grundsätzlich ist zwischen globalen, kontinentalen und nationalen Koordinatenreferenzsystemen zu unterscheiden, welche jeweils unterschiedliche Realisierungen und Genauigkeiten aufweisen.

### 2.3.1 World Geodetic System 1984

Das weltweit wichtigste System für ellipsoidische Koordinaten ist das WGS84. Sein Referenzellipsoid ist geometrisch nahezu identisch mit dem des GRS80, wurde jedoch um zusätzliche Schwerefeldinformationen ergänzt, wodurch die Parameter für die Erdmasse und die Abplattung geringfügige Abweichungen aufweisen. Das zugrunde liegende Erdschweremodell ist das EGM96. Die Verankerung des Systems in der Erdkruste erfolgt über zwölf weltweit verteilte Fundamentalstationen, die eine präzise Modellanbindung an die Erdoberfläche gewährleisten. Das zugehörige Koordinatensystem ist ein dreidimensionales, geozentrisches kartesisches Rechtssystem. Die Z-Achse zeigt zum Nordpol, die X-Achse verläuft in Richtung des Schnittpunkts von Äquator und Nullmeridian und die Y-Achse weist nach 90° Ost.

### 2.3.2 International Terrestrial Reference System

Das ITRS ist das international anerkannte globale dreidimensionale Bezugssystem für präzise kartesische Erdkoordinaten. Es bildet ein erdfestes, geozentrisches Quasi-Inertialsystem mit Ursprung im Massenzentrum der Erde. Die Z-Achse ist auf die mittlere Erdrotationsachse ausgerichtet, während die X-Achse durch den Schnittpunkt von Äquator und Nullmeridian (Greenwich) verläuft. Die Y-Achse vervollständigt das rechtshändige System. Die praktische Realisierung erfolgt über den International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Dieser Referenzrahmen

basiert auf präzisen Messungen eines weltweiten Netzes von Fundamentalstationen, welche mithilfe verschiedener satelliten- und weltraumgeodätischer Techniken bestimmt werden. Die Anbindung an das Himmelsbezugsystem erfolgt über das International Celestial Reference Frame (ICRF). Da sich die Erdkruste aufgrund von Plattentektonik und Gezeitenkräften laufend bewegt, sind ITRF-Koordinaten stets mit einer Bezugsepoche anzugeben (z.B. ITRF2014, Epoche 2010.0).

### 2.3.3 European Terrestrial Reference System 1989

Das ETRS89 ist das in Europa gültige geodätische Bezugssystem. Das European Geodetic Reference Systems (EUREF) wurde von der europäischen Subkommission der International Association of Geodesy (IAG) definiert, um ein einheitliches, plattentektonisch stabiles Referenzsystem für Europa zu schaffen. Geometrisch basiert das ETRS89 auf dem GRS80-Ellipsoid und ist zur Epoche 1989.0 identisch mit dem ITRS. Anders als das globale, erdfeste ITRS ist das ETRS89 jedoch fest an den stabilen Teil der eurasischen Kontinentalplatte gekoppelt. Dadurch bleibt der europäische Festlandrahmen langfristig stabil, während sich Eurasien im globalen Bezugssystem jährlich um ca. 2,5 cm verschiebt. Nach über 30 Jahren ergibt sich daraus bereits ein Differenzvektor von rund 80 cm zwischen ETRF- und ITRF-Koordinaten desselben Punktes. Das ETRS89 ist in kartesischen 3D-Koordinaten angegeben, wird in der Praxis jedoch meist in ellipsoidische Breite, Länge und Höhe (2D+1D) umgerechnet. Seine Realisierung erfolgt über verschiedene European Terrestrial Reference Frames (ETRF), wie etwa ETRF2000 oder ETRF2014, die regelmäßig an die aktuellen Bewegungen der eurasischen Platte angepasst werden. Das ETRS89 dient in Europa oftmals als Grundlage für nationale Bezugssysteme.

### 2.3.4 Österreichische Landeskoordinatensystem MGI

Für nationale Anwendungen wird in Österreich ein eigenes Koordinatenreferenzsystem verwendet: das österreichische Landeskoordinatensystem, das auf dem MGI (Militärgeographisches Institut) basiert. Die zugrunde liegende Referenzfläche ist dabei das Bessel-Ellipsoid, das historisch als bestmögliche Annäherung an die Erdfigur im Bereich der österreichischen Landesvermessung gewählt wurde. Zur praktischen Nutzung, insbesondere in der Kataster- und Landesvermessung, werden die ellipsoidischen Koordinaten mittels Gauß-Krüger-Projektion in kartesische 2D-Koordinaten dargestellt. Diese Projektion erlaubt eine verzerrungsarme Abbildung regionaler Gebiete und ist daher in Österreich weit verbreitet. Für regionale Vermessungsaufgaben ist das MGI mit dem Bessel-Ellipsoid somit die österreichische Standardgrundlage, während für europaweite bzw. globale Anwendungen die Systeme ETRS89 bzw. WGS84 zum Einsatz kommen.

# 3 Katastertechnische Grundlagen

## 3.1 Gesetzliche Vorgaben

Die Vorgaben für den Österreichischen Kataster, insbesondere für Grenzvermessungen, werden im österreichischen Vermessungsgesetz („VermG“, 1968) und in der Vermessungsverordnung („VermV“, 2016) geregelt. Für Zivilgeometer hat dabei der §36 des VermG besonderes Augenmerk, da in diesen die Bestimmungen für Grenzvermessungen und den dafür notwendigen Anschluss an das amtliche Festpunktfeld zu finden sind. Die näheren Vorschriften zur Feststellung von Grenzpunkten, sowie die erlaubten Fehlergrenzen eines Festpunktanschlusses, werden vom Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft in der VermV geregelt. Diese besagen laut VermV §3, dass der Anschluss an die nächstgelegenen Festpunkte erfolgen muss und im Falle von satellitengestützten oder hybriden Messverfahren durchgreifend kontrolliert und überbestimmt sein muss. Weiters dürfen nur Messmethoden verwendet werden, welche nach dem Stand der Wissenschaft und Technik geeignet sind und die Einhaltung der Genauigkeitsanforderungen des §6 der VermV gewährleisten. Diese Anforderungen beziehen sich auf Messpunkte, welche neben den Festpunkten als zusätzliche Standpunkte für die Vermessung von Grenzpunkten verwendet werden. Solche Messpunkte müssen von den Festpunkten durchgreifend kontrolliert abgeleitet werden. Dies kann durch satellitengestützten Messverfahren gelingen oder durch Anwendung terrestrischer Messverfahren. Im Falle von satellitengestützter Messung, darf die einfache mittlere Punktlagegenauigkeit des zu bestimmenden Messpunktes einen Grenzwert von 2 cm nicht überschreiten. Im Falle von terrestrisch bestimmten Messpunkten liegt die Grenze bei 4 cm. Schlussendlich ist die Bestimmung von Grenzpunkten so vorzunehmen, dass bei einer Kontrollmessung eine maximale Abweichung von 5 cm in der Lage nicht überschritten wird. Diese Arbeit hat daher das Ziel, nachzuweisen, dass Punktbestimmungen mit einer maximalen Lageabweichung von 5 cm gegenüber einem Referenzwert reproduzierbar mittels UAV-LiDAR und UAV-Photogrammetrie erreicht werden können.

## 3.2 Lokale Anfelderung an das Festpunktfeld

Da das österreichische Festpunktfeld in sich starke Spannungen vorweist, liegt die amtliche Lösung für Katastervermessungen derzeit bei lokal angepassten Helmert-Transformationen, welche das jeweilige Interessensgebiet umschließen müssen. Ausgenommen sind hier Polygonzüge, welche direkt an Festpunkten an-, und abgeschlossen wurden. Eine berechnete ebene Helmert-Transformation, welche als Anschluss an das amtliche Festpunktfeld dienen soll, muss daher laut §6 VermV mindestens aus den vier nächst gelegenen Festpunkten bestehen, wobei die Lage-Restklaffungen in den Festpunkten den Wert von 5 cm nicht übersteigen dürfen. Für den Maßstabsfaktor liegt der Grenzwert bei 100 ppm.

### 3.2.1 Helmert-Ähnlichkeitstransformation

Eine zweidimensionale Helmert-Ähnlichkeitstransformation beschreibt den Übergang von Koordinaten eines Ausgangssystems in ein Zielsystem mittels einer einheitlichen Drehung, Maßstabsänderung und Translation. Zur Bestimmung der vier Transformationsparameter werden mindestens zwei Identpunkte benötigt, deren Koordinaten in beiden Systemen bekannt sind. Aus den Koordinatenunterschieden dieser Punkte lassen sich die Richtungswinkel und Strecken in beiden Systemen berechnen, woraus der Drehwinkel und der Maßstabsfaktor hervorgehen. Die verbleibenden zwei Translation-Parameter ergeben sich aus den Koordinatendifferenzen im Ursprung. Liegen mehr als zwei Identpunkte und somit eine Überbestimmung vor, wird die Transformation im Zuge einer kleinsten-Quadrate-Ausgleichung gelöst.

Die Höhenkomponente wird im Katasterwesen meist durch eine eindimensionale Verschiebung in Z-Richtung berücksichtigt (2D + 1D Transformation). Eine alternative Möglichkeit besteht darin, die 2D-Transformation auf eine vollständige 7-Parameter-Transformation zu erweitern. Diese 3D-Helmert-Transformation umfasst dann drei Translationen, drei Rotationen, sowie einen einheitlichen Maßstabsfaktor.

# 4 Ausgleichsaufgaben

## 4.1 Grundlagen der Ausgleichsrechnung

Die Ausgleichsrechnung stellt ein zentrales Werkzeug der Geodäsie dar, um aus einer Vielzahl von Messwerten eine bestmögliche Schätzung der unbekannt Parameter eines mathematischen Modells zu ermitteln. Grundlage dafür ist ein überbestimmtes Gleichungssystem – es stehen also mehr Beobachtungen zur Verfügung, als zur eindeutigen Bestimmung der unbekannt Parameter erforderlich wären. Diese Redundanz ermöglicht es, zufällige Fehler zu erkennen und erhöht die Wahrscheinlichkeit, die wahren Werte möglichst genau zu schätzen. Die gebräuchlichste Methode zur Schätzung der unbekannt Parameter ist die Methode der kleinsten Quadrate (*Least Squares*, LS). Grundlage bildet ein funktionaler Zusammenhang zwischen den gemessenen Beobachtungen  $\mathbf{l}$  und den zu bestimmenden Unbekannt  $\mathbf{x}$ , der durch die sogenannte Designmatrix  $\mathbf{A}$  beschrieben wird.

$$\mathbf{l} = \mathbf{A} \mathbf{x} \quad (4.1)$$

Ergänzend wird durch Angaben zur Genauigkeit der Beobachtungen ein stochastisches Modell definiert, das über eine Gewichtsmatrix  $\mathbf{P}$  die Vertrauenswürdigkeit der einzelnen Beobachtungen im Ausgleich berücksichtigt. In Kombination mit der Designmatrix ergibt sich die Normalgleichungsmatrix  $\mathbf{N}$ .

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \quad (4.2)$$

Die Lösung der Normalgleichungen liefert die geschätzten Parameterzuschläge  $\mathbf{x}$  für die Unbekannt.

$$\mathbf{x} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \quad (4.3)$$

Mit diesen lassen sich wiederum die ausgeglichenen Unbekannt, sowie die Verbesserungen  $\mathbf{v}$  für die Beobachtungen bestimmen.

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{l} \quad (4.4)$$

Aus diesen Residuen können wiederum wichtige Kennwerte wie Standardabweichungen, Zuverlässigkeits- und Unsicherheitsparameter abgeleitet werden, die eine Aussage über die Qualität und Genauigkeit der Ausgleichung erlauben.

Die angeführten Formeln, sowie weitere Grundformeln zur Ausgleichsrechnung, die auch für die Programmierung in dieser Arbeit verwendet wurden, sind beispielsweise in Niemeier (2008) zu finden. In der Praxis wird dieser Grundaufbau je nach Aufgabe erweitert, etwa um Methoden der robusten Ausgleichsrechnung oder um spezielle Lagerungsbedingungen für das geodätische Datum. Zusätzlich lassen sich in Niemeiers Lehrbuch auch alle notwendigen Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsbestimmung zur Qualitätsbestimmung einer Ausgleichung finden. Allgemeine geodätische Hauptaufgaben und Formelapparate wie jene der Konfidenzellipsen oder des Helmert'schen Punktlagefehlers finden sich auch in Gruber und Joeckel (2022) wieder.

## 4.2 Freie Stationierung

Die freie Station ist ein bewährtes Verfahren, um die wahrscheinlichste Lage und Orientierung eines Standpunkts zu bestimmen, wenn dessen Koordinaten unbekannt sind. Dabei wird der unbekannte Standpunkt über Winkel- und Streckenmessungen zu mehreren bekannten Festpunkten ermittelt. Sind mehr Messdaten vorhanden, als zur eindeutigen Berechnung erforderlich wären, muss auch dieses überbestimmte Gleichungssystem mit Methoden der Ausgleichsrechnung gelöst werden.

## 4.3 Netzausgleich (MATLAB-Programmierung)

Eine der wichtigsten vermessungstechnischen Aufgaben ist die Berechnung geodätischer Netze. Dabei werden gleichzeitig mehrere Netzpunkte koordinativ bestimmt und die Orientierungen der Standpunkte geschätzt (Heck und Hager, 2018). Auch ein überbestimmter Polygonzug kann als Netzausgleich berechnet werden. Je nach Aufgabe erfolgt ein Netzausgleich mit einer entsprechenden Datumslagerung, die den geometrischen Bezug des Netzes festlegt. Unterschieden wird dabei im Wesentlichen zwischen gezwängter, freier und weicher Lagerung. Bei einer gezwängten Lagerung werden ausgewählte Festpunkte mit bekannten Koordinaten unverändert im Ausgleich gehalten. Diese Punkte definieren Ursprung, Lage und Orientierung des Netzes eindeutig. Beim freien Ausgleich wird hingegen kein Punkt festgehalten, sodass sich alle Punkte im Netz gemeinsam verschieben und verdrehen können. Dadurch ist das Netz als Ganzes geometrisch frei, was vor allem zur internen Qualitätskontrolle dient. Bei der weichen Lagerung werden Festpunkte nicht starr festgehalten, sondern als Beobachtungen mit definierten Unsicherheiten (Pseudo-beobachtungen) in den Ausgleich eingebracht. Dies ermöglicht es, systematische Abweichungen aus verschiedenen Bezugssystemen auszugleichen oder Festpunkte mit GPS-Daten flexibel einzubinden.

Das im Rahmen der Arbeit entwickelte MATLAB-Ausgleichsprogramm verfügt über die Möglichkeit, den Netzausgleich entsprechend der gewünschten Datumslagerung durchzuführen. Die dafür erforderlichen Informationen sind direkt im Einlesefile für die Netzknoten enthalten. Ein zweites Einlesefile enthält die Messdaten der Standpunkte. Die geschätzten Standardabweichungen für die Distanzen, die Richtungsmessungen, sowie gegebenenfalls auch für die Pseudo-Koordinatenbeobachtungen können direkt im Hauptskript angegeben werden. Anschließend kann das Ausgleichsprogramm gestartet werden, welches alle Berechnungsschritte bis zum Erhalt der Ergebnisse vollständig automatisiert durchführt. Zunächst erfolgt eine iterative Bestimmung der Näherungsknoten. Danach werden in einem iterativen Ausgleichsprozess eventuelle Ausreißer erkannt, gewichtet oder eliminiert. Nach jedem Iterationsschritt wird außerdem eine Qualitätsbeurteilung des aktuellen Ergebnisses vorgenommen. Diese einzelnen Schritte werden im Folgenden noch genauer beschrieben. Es sei an dieser Stelle noch kurz angemerkt, dass die Programmierung des Ausgleichsskripts einen erheblichen Zeitaufwand darstellte und insbesondere die Berechnung von weich gelagerten Netzen noch nicht in ausreichendem Maße geprüft und getestet werden konnte. Aus diesem Grund wurden sämtliche Netze im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich mit Zwang oder völlig zwangsfrei berechnet.

### 4.3.1 Bestimmung von Näherungsknoten

Die Bestimmung von Näherungsknoten erfolgt iterativ und folgt einem strukturierten Ablauf. Zunächst werden alle Festpunkte identifiziert, deren Koordinaten bereits bekannt sind. Liegen für einen Standpunkt sowohl Koordinaten als auch Orientierung vor, können damit zunächst unbekannte Netzknoten durch Polarknotenbestimmung berechnet werden. Fehlt nur die Orientierung, wird diese anhand von Messungen zu bekannten Punkten bestimmt. Sind weder Koordinaten noch Orientierung für einen Standpunkt vorhanden, wird, falls möglich, eine freie Stationierung oder ein direkter Anschluss durchgeführt, um die Standpunktknoten zu ermitteln. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis allen Punkten Näherungsknoten und allen Standpunkten Orientierungen zugewiesen sind. Anschließend wird die Berechnung der Näherungen in mehreren Schritten robust verfeinert: Für jeden Standpunkt wird erneut eine freie Stationierung anhand aller vorhandenen Näherungsknoten durchgeführt. Danach wird für jeden Netzknoten geprüft, welche weiteren Polarknotenberechnungen möglich sind, um alternative Näherungsknoten zu ermitteln. Aus diesen Varianten wird der Median der berechneten Koordinaten gebildet, um Ausreißer zu dämpfen und eine stabilere Näherung zu erzielen. Abschließend erhalten alle Standpunkte aktualisierte Orientierungen. Auf Basis dieser so bestimmten Näherungsknoten wird anschließend eine erste Ausgleichung ohne Ausreißerdetektion gerechnet, um die Näherungen final zu stabilisieren.

### 4.3.2 Iterativer Ausgleich und Gewichtung

Nach der Bestimmung der Näherungskordinaten beginnt der iterative Ausgleichsprozess. In jedem Iterationsschritt wird zunächst die auffälligste Beobachtung identifiziert. Diese wird anhand der Ergebnisse des vorhergehenden Ausgleich ermittelt, wobei die Beobachtung mit dem höchsten Score-Wert in der Ausreißerdetektion (siehe nächstes Unterkapitel 4.3.3) als auffälligste gilt. Anhand der Höhe des Scores wird entschieden, ob eine Herabgewichtung oder sogar eine direkte Eliminierung dieser Beobachtung notwendig ist. Die Gewichtung der Beobachtung erfolgt daher nach einem ähnlichen Prinzip, das an das von Baarda, 1968 entwickelte Data-Snooping-Verfahren angelehnt ist: Pro Iteration wird ausschließlich die auffälligste Beobachtung behandelt. Sie wird nur bei eindeutiger Auffälligkeit eliminiert, andernfalls zunächst schrittweise herabgewichtet. Hierfür wurden mehrere Gewichtungsstufen definiert. Die Standardstufe entspricht der zuvor geschätzten Standardabweichung der Beobachtungen. Die erste Herabstufung ergibt sich durch Multiplikation dieser Standardabweichung mit einem festgelegten Faktor von 1,4. Die Faktoren der weiteren Stufen betragen 2,0, 2,5 und 3,5. Die *ppm*-Anteile der Streckenbeobachtungen werden mit jeder Herabstufung zusätzlich um 1 erhöht. Abbildung 4.1 zeigt einen Protokollauschnitt der Gewichtsstufen für geschätzte Standardabweichungen in einem Netzausgleich und den daraus resultierenden Gewichten. Mit jeder Herabstufung vergrößert sich die Standardabweichung der betroffenen Beobachtung, wodurch sich deren Gewichtung in der P-Matrix entsprechend verringert. In jedem Iterationsschritt wird stets nur eine einzige Beobachtung um höchstens eine Gewichtsstufe herabgestuft. Hat eine Beobachtung bereits die höchste Herabstufung erreicht und wird in einer weiteren Iteration erneut als auffälligste erkannt, so wird sie endgültig eliminiert. Bevor eine Beobachtung jedoch ausgeschlossen wird, wird geprüft, ob der Ausgleich auch ohne diese Beobachtung noch lösbar ist. Ist dies nicht der Fall, so bleibt die Beobachtung mit den Standardabweichungen der höchsten Herabstufung im Ausgleich und kann in weiteren Iterationen nicht erneut als auffälligste Beobachtung identifiziert werden.

(G) Gewichtungs-Stufen für Beobachtungen anhand $\sigma$ :				
Herabstufung	$\sigma_{hz}$ [gon]	$\sigma_{dh}$ [m]	ppm	Gewichtung
$\sigma$	0.0025	0.0020	2	1.0000
B1	0.0035	0.0028	3	0.5101
B2	0.0050	0.0040	4	0.2500
B3	0.0063	0.0050	5	0.1600
B4	0.0088	0.0070	6	0.0817
Eli	-----	-----	---	0.0000

Abb. 4.1: Protokollauschnitt: Gewichtungsstufen für auffällige Beobachtungen anhand geschätzter Standardabweichungen für Richtungen und Distanzen

Nach der Anpassung des Gewichts der auffälligsten Beobachtung folgt der eigentliche Ausgleichsschritt inklusive Qualitätsbeurteilung (siehe übernächstes Unterkapitel 4.3.4). Zum Abschluss jeder Iteration erfolgt ein Updateschritt, bei dem die Näherungskordinaten aktualisiert werden.

### 4.3.3 Ausreißerdetektion

Die Programmierung der Ausreißerdetektion erfolgte als kontinuierlicher Optimierungsprozess. Zunächst wurde die Detektion ausschließlich auf Grundlage von Least-Median-Squares-Gewichten durchgeführt. Diese Gewichte werden anhand der Residuen des letzten Ausgleichsergebnisses berechnet. Dabei werden die Verbesserungsquadrate der Residuen getrennt für Distanz- und Richtungsbeobachtungen bestimmt und jeweils deren Median ermittelt. Über einen einstellbaren Robustheitsfaktor  $k$  kann gesteuert werden, wie empfindlich die Detektion erfolgt. Das robuste LMS-Gewicht einer Beobachtung ergibt sich, indem der Medianwert aller Verbesserungsquadrate ins Verhältnis zum individuellen Verbesserungsquadrat gesetzt wird. Dadurch erhalten Beobachtungen mit großen Residuen ein entsprechend geringeres Gewicht, was ihre Einflussnahme im nächsten Ausgleichsschritt reduzieren würde, wenn man diese direkt in die  $\mathbf{P}$ -Matrix übernehmen würde (Rousseeuw, 1984). Eine unmittelbare Anwendung der LMS-Gewichte würde somit dazu führen, dass alle Beobachtungen gleichzeitig gewichtet werden. Dies ist im vorliegenden Ansatz jedoch nicht erwünscht, da, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, pro Iteration stets nur eine einzelne Beobachtung schrittweise angepasst werden soll. Aus diesem Grund werden die LMS-Gewichte nur als Indikator verwendet, indem sie invertiert werden, sodass jene Beobachtung mit dem höchsten inversen Gewicht, also die Beobachtung, deren ursprüngliches Gewicht am nächsten bei 0 liegt, als wahrscheinlichster Ausreißer identifiziert wird. Erste Versuche mit der reinen LMS-Ausreißerdetektion zeigten, dass eine Beobachtung, nachdem sie gewichtet worden war, in der nächsten Iteration häufig noch auffälliger wurde als zuvor. Dieser Effekt ist naheliegend, da durch das verringerte Gewicht das Residuum der Beobachtung in den meisten Fällen weiter ansteigt. In mehreren Iterationen wurde daher immer wieder dieselbe Beobachtung als auffällig erkannt und erneut gewichtet, bis sie schließlich eliminiert wurde. Erst danach traten andere Beobachtungen als potenzielle Ausreißer hervor. Es zeigte sich also, dass die LMS-Gewichtung nur bei eindeutig erkennbaren Ausreißern geeignet ist, um diese sofort zu eliminieren, jedoch nicht dafür, Beobachtungen gleichmäßig zu gewichten. Aus diesem Grund wurden weitere Ausreißer-Indikatoren eingeführt und in einer kombinierten Score-Analyse berücksichtigt. Die Score-Werte einer Beobachtung ergeben sich dabei aus drei Komponenten: den inversen LMS-Gewichten, den normalisierten, normierten Verbesserungen (Koch, 1999) sowie den inversen Gewichten aus M-Schätzern nach der Danish-Methode (Huber, 1964 und Krarup et al., 1980). Alle drei Indikatoren liefern Werte im Intervall von

0 bis 1 und können über individuell einstellbare Gewichtungsfaktoren ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) kombiniert werden. Diese Multiplikatoren müssen zusammen stets 100 Prozent ergeben, wodurch auch die finalen Score-Werte im Intervall von 0 bis 1 liegen. Je höher der Score, desto auffälliger wird eine Beobachtung eingestuft. Zusätzlich wurde für die inversen LMS-Gewichte ein kleiner Score-Abzug eingeführt, der sich mit jeder Gewichtsstufe um 2 Prozent erhöht. Dies stellt sicher, dass nicht in jeder Iteration immer dieselbe Beobachtung als auffälligste erkannt wird und ermöglicht eine ausgewogenere Gewichtungsverteilung. Formel 4.5 zeigt die Berechnung der Score-Werte nochmals übersichtlich.

$$\text{Score} = \alpha \cdot (\text{inv}(w_{\text{LMS}}) - \text{Abzug}) + \beta \cdot v_{\text{norm}} + \gamma \cdot \text{inv}(w_{\text{Danish}}) \quad (4.5)$$

Die Berechnung der normierten Verbesserungen erfolgt mithilfe der Standardabweichungen der geschätzten Verbesserungen, die getrennt für Distanz- und Richtungsbeobachtungen bestimmt werden. Die tatsächlichen Verbesserungen werden anschließend jeweils durch diese Standardabweichungen dividiert, wodurch normierte Verbesserungen entstehen, welche die Größe der Residuen relativ zu ihrer erwarteten Streuung ausdrücken. Um eine einheitliche Skalierung zu erreichen, werden diese Werte normalisiert, sodass alle Resultate im selben Intervall wie die inversen LMS-Gewichte liegen. Genau hierbei zeigt sich jedoch ein Problem. Die Normalisierung führt dazu, dass der auffälligste Wert immer den Score 1 erreicht, während die LMS-Gewichte nicht zwingend den Maximalwert 1 annehmen, sondern auch darunter liegen können. War eine Beobachtung also bei den LMS-Gewichten eher unauffällig, gleichzeitig aber bei den normierten Verbesserungen sehr hoch, erhöhte dies den Score dieser Beobachtung unverhältnismäßig stark. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wurde zusätzlich auf Basis der normierten Verbesserungen die Danish-Methode als M-Schätzer angewendet. Dieser Schätzer sorgt dafür, dass der Einfluss der normierten Verbesserungen etwas abgeschwächt wird, da seine Maximalwerte typischerweise bei etwa 0,8 liegen. Das Verhalten der einzelnen Ausreißer-Indikatoren zeigte, dass die LMS-Gewichtung gut zur Erkennung eindeutiger Ausreißer geeignet ist, während die normierten Verbesserungen in späteren Iterationen oder in ausreißerfreien Netzen eine feinere Einschätzung liefern. Der Codeausschnitt in Abbildung 4.2 zeigt, wie die Gewichtungsfaktoren eingestellt sind und sich mit zunehmender Iterations- oder Ausreißeranzahl verändern. Nach jeder Eliminierung wird der Schleifenzähler wieder auf 1 zurückgesetzt, wobei gleichzeitig die Gewichtungsfaktoren ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ), sowie der Robustheitsfaktor  $k$  bei jeder Eliminierung automatisch angepasst werden.

Die Redundanz einer Beobachtung wird nicht direkt in den Score einbezogen. Sie dient lediglich als erster Indikator, um festzustellen, ob eine Beobachtung überhaupt als potenzieller Ausreißer erkannt werden kann. Liegt ihr Redundanzanteil unter 15 Prozent, so gilt die Beobachtung als nicht ausreichend kontrolliert, da sie nur unzureichend durch die übrigen Messungen abgesichert wird.

```

% count beginnt nach einer Eliminierung immer wieder bei 1
if count == 1      % LMS      v_norm      danish
    k = 1.5;      alpha = 0.95;  beta = 0.01;  gamma = 0.04;
elseif count == 2
    k = 1.6;      alpha = 0.93;  beta = 0.02;  gamma = 0.05;
elseif count == 3
    k = 1.7;      alpha = 0.91;  beta = 0.03;  gamma = 0.06;
elseif count == 4
    k = 1.8;      alpha = 0.89;  beta = 0.04;  gamma = 0.07;
elseif count == 5
    k = 1.9;      alpha = 0.87;  beta = 0.05;  gamma = 0.08;
else
    k = 2.0;      alpha = 0.85;  beta = 0.06;  gamma = 0.09;
end
if outlier_count > 5
    outlier_count = 5; % ab 5 bleiben Einstellungen unverändert
end
% 5 ---> alpha = 0.50; beta = 0.26; gamma = 0.24;
alpha = alpha - (0.09 * outlier_count);
beta = beta + (0.05 * outlier_count);
gamma = gamma + (0.04 * outlier_count);

% Abzug (als Multiplikator) falls bereits gewichtet
score_abzug = zeros(size(L_status,1),1);
score_abzug(L_status == "std") = 1.00;
score_abzug(L_status == "B1") = 0.98;
score_abzug(L_status == "B2") = 0.96;
score_abzug(L_status == "B3") = 0.94;
score_abzug(L_status == "B4") = 0.92;

```

Abb. 4.2: Codeausschnitt: Einstellungen für die Berechnung der Ausreißer-Scores

Am Ende jeder Score-Analyse wird zusätzlich überprüft, ob es sich bei der auffälligsten Beobachtung tatsächlich um einen klar isolierten Ausreißer handelt oder ob mehrere Beobachtungen ähnlich hohe Scorewerte aufweisen. Für diese Entscheidung wurde ein dynamischer Grenzwert eingeführt, der auf Basis des zweitauffälligsten Scores bestimmt wird. Dazu wird dieser Score mit einem festgelegten Faktor von 0,15 multipliziert und vom Score der auffälligsten Beobachtung abgezogen, wie Formel 4.6 zeigt.

$$S_{\text{grenz}} = S_{\text{max}} - (S_2 \cdot 0,15) \quad (4.6)$$

Liegt der zweithöchste Scorewert unterhalb dieses Grenzwertes, wird die auffälligste Beobachtung als isolierter Ausreißer betrachtet. Beispielhaft sei ein Fall genannt, in dem die beiden höchsten Scorewerte  $S_{\text{max}} = 0,70$  und  $S_2 = 0,60$  betragen, und somit  $S_{\text{grenz}} = 0,61$  gilt. Da der zweithöchste Scorewert unterhalb dieses Grenzwertes liegt,

wird die Beobachtung mit  $S_{\max}$  als eindeutig isoliert eingestuft. Wäre hingegen der höchste Scorewert nur  $S_{\max} = 0,69$ , so läge  $S_2$  nicht mehr unterhalb des Grenzwertes  $S_{\text{grenz}} = 0,60$ . In diesem Fall wird mit jeder Beobachtung, deren Scorewert größer oder gleich dem Grenzwert ist (maximal jedoch nur mit den fünf auffälligsten Beobachtungen), ein temporärer Ausgleich durchgeführt. In diesem wird die entsprechende Beobachtungen mit der Standardabweichung der höchsten Herabstufung berücksichtigt.

```
(S) Score-Analyse für Winkel-Beobachtung von 'PP3' nach 'PP2' (Index 28)
-----
→ Robustheitsfaktor k      = 1.80
→ Score-Gewichtung LMS    = 0.71
→ Score-Gewichtung v_norm = 0.14
→ Score-Gewichtung Danish = 0.13
-----
→ Inverses LMS-Gewicht    = 0.71
→ Max Normierte Verb.     = 0.81
→ Inverses Danish-Gewicht = 0.74
→ Redundanzanteil         = 0.96
-----
→ Ausreißer-Score         = 0.68
→ weiche Ausreißer-Grenze = 0.54 → 0.68 > 0.54
→ harte Ausreißer-Grenze  = 0.73 → 0.68 < 0.73
-----
Entscheidung:
→ Beobachtung muss nicht zwingend gewichtet werden.
→ Beobachtung wird gewichtet, sofern sich der Ausgleich dadurch verbessert.
```

Abb. 4.3: Protokollausschnitt: Score-Analyse im Iterationsschritt zur Beurteilung der auffälligsten Beobachtung des letzten Ausgleichsergebnis

Nach jedem der temporären Ausgleichs erfolgt eine eigene Score-Analyse, bei der die resultierenden Scores der Beobachtungen in absteigender Reihenfolge sortiert und entsprechend ihrer Position gerankt werden. Anschließend werden die Rangwerte aller Beobachtungen über sämtliche temporäre Ausgleichs hinweg aufsummiert, wodurch sich für jede Beobachtung ein kombinierter Rangscore ergibt. Jene Beobachtung, die insgesamt den höchsten kombinierten Rangscore aufweist, wird im anschließenden Hauptausgleichsschritt tatsächlich als auffälligste Beobachtung behandelt. Der originale Score der Beobachtung wird dann mit Grenzwerten verglichen. Die Startwerte dieser Grenzen können im Hauptskript definiert werden und werden repetitiv nach jeder eliminierten Beobachtung optimiert. Anhand dieser Grenzwerte und des Scores wird festgestellt, ob die Beobachtung zwingend gewichtet werden muss, nur gewichtet wird, wenn sich der Ausgleich verbessert oder keine weitere Gewichtung mehr notwendig ist, falls der Score geringer ist als die unterste Grenze. Abbildung 4.3 zeigt einen Protokollausschnitt einer Score-Analyse aus einem Ausgleichsbeispiel.

### 4.3.4 Qualitätsbeurteilung des Ausgleichsergebnis

Der iterative Ausgleichsprozess läuft so lange, bis eine vordefinierte maximale Anzahl an Iterationen erreicht oder eine festgelegte Höchstanzahl an Beobachtungen (Ausreißern) eliminiert wurde. Am Ende jeder Iteration erfolgt zusätzlich eine Qualitätsbeurteilung des aktuellen Ausgleichsergebnisses, welche ebenfalls zum Abbruch der Iteration führen kann. Diese Beurteilung liefert Informationen darüber, ob der Ausgleich als erfüllt angesehen werden kann und ob sich das Ergebnis durch die letzte Iteration noch verbessert, unverändert geblieben ist oder sogar verschlechtert hat. Standardmäßig wird die Erfüllung des Ausgleichs anhand der Hauptprobe geprüft sowie durch die Kontrolle, ob keine weiteren ausreißerverdächtigen Beobachtungen in den Messdaten vorhanden sind. Ist beides gegeben, wird zusätzlich der Median aller mittleren Halbmesser der Konfidenzellipsen als Kriterium für eine mögliche Verbesserung herangezogen. Zeigt sich anhand dieser Kriterien kaum noch eine Änderung, wird die Iteration beendet. Optional können über die Einstellungen im Hauptskript weitere Indikatoren für die Qualitätsbeurteilung aktiviert werden. Abbildung 4.4 zeigt beispielhaft einen Protokollausschnitt der Qualitätsbeurteilung am Ende einer Iteration. Wenn mindestens eines der aktiven Kriterien sich gegenüber der letzten Iteration verbessert hat, ohne dass ein anderes sich verschlechtert hat, so gilt der gesamte Ausgleich als verbessert und die Iteration wird fortgesetzt. Hat sich eines der Kriterien verschlechtert, so wird die Iteration abgebrochen, und das Ausgleichsergebnis wird auf das vorherige zurückgesetzt.

(B) Beurteilung ob aktuelle Gewichtsanzpassung das Ausgleichsergebnis verbessert:  
 Welche grundlegenden Bedingungen wurden erfüllt?

- Die Hauptprobe wurde erfüllt.
- Der Globaltest wurde nicht erfüllt.
- Es gibt keine weitere stark verdächtige Ausreißer. ( $0.65 < 0.77$ )
- Es gibt noch weitere leicht verdächtige Ausreißer. ( $0.65 > 0.52$ )

Verbessert sich das Ausgleichsergebnis weiterhin? [mm]					
Kriterium	✓	Grenzwert	Wert Neu	Wert Alt	Delta
Hauptprobe:	—	4e-07	9e-09	2.6e-11	9e-09
Globaltest:	✓	[0.29, 3.49]	85.69	101.67	-15.98
v <sup>2</sup> -Summe:	✓	~140	3780	4485	-705
v max:	✗	~6	42	34	7
mpyx mean:	—	~6	12	13	-1
mpyx max:	✓	~10	16	18	-1
mpyx95 mean:	✓	~8	32	35	-3
mpyx95 max:	✓	~16	43	47	-4

→ Der Ausgleich wurde durch die aktuelle Gewichtungsanzpassung verbessert.  
 → Das neue Ausgleichsergebnis wird übernommen.

Abb. 4.4: Protokollausschnitt: Qualitätsbeurteilung mit den Standardkriterien Hauptprobe, Ausreißerdetektion und Konfidenzellipsen ( $S = 95\%$ )

Nach Abschluss des iterativen Ausgleichs werden nochmals final alle Genauigkeiten a posteriori berechnet. Aufbauend wird ein Globaltest nach Fisher-Verteilung, ein Globaltest nach Fisher-Dichteverteilungsfunktion, sowie ein getrennter Globaltest nach Fisher-Verteilung für Strecken- und Richtungsbeobachtungen durchgeführt. Weiters werden noch für jeden Standpunkt die Helmertschen Fehler,- und Konfidenzellipsen, sowie die mittleren Punktlagefehler bestimmt. Es wird eine Redundanzanalyse durchgeführt und die minimal aufdeckbaren Fehler in den Beobachtungen berechnet. Abschließend erfolgt die Ausgabe einer ausgeglichenen Punktliste, sowie ein Netzplot welcher alle Punkte, Beobachtungen und Konfidenzellipsen beinhaltet. Der vollständig entwickelte, robuste Netzausgleich, einschließlich aller Funktionen zur Iterationssteuerung, Ausreißerererkennung, Gewichtungsanpassung, Visualisierung sowie zur Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanalyse, umfasst ohne Kommentaranalysen insgesamt rund 2 700 programmierte MATLAB-Codezeilen.

### 4.3.5 Beispielnetz

Zur Veranschaulichung soll das entwickelte Ausgleichsprogramm nachfolgend an einem synthetisch erstellten Netz – bestehend aus vier Festpunkten und fünf Standpunkten – mit einer in rmGEO durchgeführten Netzberechnung verglichen werden. Für die Standpunkte gilt es, im Rahmen des Netzausgleichs deren zehn unbekanntes Koordinaten sowie deren fünf Orientierungsunbekannte zu schätzen. Insgesamt wurden 19 Messungen zwischen den Netzpunkten durchgeführt, wodurch sich 38 Beobachtungen und 23 Freiheitsgrade ergeben. Vier Messungen, jeweils bestehend aus einer Distanz- und einer Richtungsbeobachtung, wurden systematisch verwechselt. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die eingeführten Fehler, die sich bei den Strecken auf 5 cm und bei den Richtungswinkeln auf 100 mgon belaufen.

Von	Nach	Ri original	Ri verfälscht	Dh original	Dh verfälscht
PP1	P6001	171.95282	171.85282	25.3817	25.4317
HP1	PP1	257.88464	257.98464	37.1196	37.1696
PP3	PP2	222.86589	222.76589	34.3041	34.2541
PP4	EP20	94.66742	94.76742	68.1520	68.1020

Tabelle 4.1: Originale und systematisch verwechselt Messdaten

Die Standardabweichung der Beobachtungen wurden sowohl im rmGEO als auch im MATLAB auf 2 mm für die Distanzen und auf 25 mgon für die Richtungen geschätzt. Abbildung 4.8 zeigt das gesamte Netz, bestehend aus den Netzpunkten, sowie den zugehörigen Beobachtungen. Es sei jedoch angemerkt, dass die im MATLAB-Ausgleich eliminierten Beobachtungen in der Darstellung nicht mehr enthalten sind, da es sich um den Netzplot nach der Ausgleichung handelt.

In beiden Programmen wurde ein gezwängter Ausgleich anhand der Festpunkte durchgeführt. Hierfür mussten zunächst die Näherungskordinaten der fünf Standpunkte in beiden Programmen berechnet werden. Im eigenen Programm erfolgt dies automatisiert, wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben, während in rmGEO die Näherungskordinaten mithilfe einer iterativen Kreisrechnung ermittelt werden. Tabelle 4.2 zeigt die Koordinatendifferenzen  $\Delta_{yx}$  der im rmGEO und im MATLAB-Programm bestimmten Näherungen zu den wahren Werten der Netzknoten. Es darf hier von wahren Werten gesprochen werden, da das Netz synthetisch erstellt wurde und die Koordinaten mit ihren zugehörigen Messdaten somit fehlerfrei sind.

Pkt	Wahre Werte [m]		rmGEO Näherungen [m]			MATLAB Näherungen [m]		
	Y	X	Y	X	$\Delta_{yx}$	Y	X	$\Delta_{yx}$
PP1	-315.187	679.694	-315.274	679.708	0.088	-315.275	679.668	0.092
PP2	-327.888	703.807	-327.991	703.812	0.103	-327.858	703.849	0.052
PP3	-315.830	735.922	-315.950	735.880	0.120	-315.826	736.067	0.145
PP4	-284.765	747.381	-284.902	747.382	0.137	-284.728	747.437	0.067
HP1	-285.898	702.498	-286.046	702.671	0.148	-285.989	702.558	0.109
$\Sigma$					0,683			0,465

Tabelle 4.2: Vergleich der berechneten Näherungskordinaten

Nach Erhalt der Näherungskordinaten kann in rmGEO eine Grobfehlersuche durchgeführt und ein erster Ausgleich gestartet werden. Dabei öffnet sich ein Fenster, welches die größten Absolutglieder für die Richtungs- und Distanzverbesserungen anzeigt. Es besteht anschließend die Möglichkeit, die entsprechenden Beobachtungen manuell zu eliminieren oder im Ausgleich zu belassen. Abbildung 4.6 zeigt die Absolutglieder der Richtungsmessungen des Beispielnetzes nach der Grobfehlersuche. Dabei fällt sofort auf, dass gerade Richtungsmessungen, die eigentlich fehlerfrei sein sollten, die höchsten Absolutglieder aufweisen und somit in einer möglichen Ausgleichung am stärksten verbessert werden würden.

Abbildung 4.5 zeigt dasselbe für die Distanzmessung. Eliminiert man im rmGEO eine der Richtungs- oder Streckenbeobachtungen, besteht die Möglichkeit, das Verfahren zu wiederholen und die Absolutglieder erneut zu bestimmen.

Distanzen 2D						
Standpunkt	Satz	Zielpunkt	Messung	Verb.	gewählte Aktion	
PP3	1	P6002	62.435	119.3 mm	nicht eliminieren	
PP4	1	EP20	68.102	-186.1 mm	nicht eliminieren	
HP1	1	PP3	44.867	177.5 mm	nicht eliminieren	
HP1	1	PP4	44.897	171.0 mm	nicht eliminieren	

Abb. 4.5: Protokollausschnitt rmGEO: Absolutglieder für Distanzen

		Richtungen					
Standpunkt	Satz	Zielpunkt	Messung	Abs.	Dist.h.ger.	Perp	gewählte Aktion
PP1	1	P6001	171.7410	-296.73 cc	25	-11.9 mm	nicht eliminieren
PP1	1	P6002	321.0174	-296.71 cc	52	-24.1 mm	nicht eliminieren
PP1	1	PP2	369.1248	321.50 cc	27	13.8 mm	nicht eliminieren
PP1	1	PP3	399.2602	271.93 cc	56	24.0 mm	nicht eliminieren
PP2	1	P6001	170.4456	601.90 cc	53	49.8 mm	nicht eliminieren
PP2	1	PP3	22.8168	-499.44 cc	34	-26.9 mm	nicht eliminieren
PP3	1	PP1	199.2780	449.66 cc	56	39.7 mm	nicht eliminieren
PP3	1	PP2	222.7719	-948.98 cc	34	-51.1 mm	nicht eliminieren
PP3	1	PP4	77.5086	943.68 cc	33	49.1 mm	nicht eliminieren
PP3	1	P6002	256.5309	504.57 cc	62	49.4 mm	nicht eliminieren
PP3	1	P6003	5.4276	-948.93 cc	73	-109.3 mm	nicht eliminieren
PP4	1	EP20	94.7488	697.92 cc	68	74.9 mm	nicht eliminieren
PP4	1	P6003	375.5702	-1395.83 cc	66	-145.4 mm	nicht eliminieren
PP4	1	PP3	277.4841	697.91 cc	33	36.3 mm	nicht eliminieren
HP1	1	PP1	257.5407	-656.65 cc	37	-38.3 mm	nicht eliminieren
HP1	1	PP3	353.4614	1313.27 cc	45	92.2 mm	nicht eliminieren
HP1	1	PP4	1.5627	-656.62 cc	45	-46.1 mm	nicht eliminieren

Abb. 4.6: Protokollausschnitt rmGEO: Absolutglieder für Richtungen

Tabelle 4.3 zeigt in absteigender Reihenfolge, welche Beobachtungen im rmGEO nacheinander eliminiert würden, wenn die Beurteilung ausschließlich anhand der maximalen Absolutglieder erfolgt. Dabei zeigt sich sehr deutlich, dass kaum fehlerbehaftete Messungen eliminiert werden, fälschlicherweise aber korrekte Beobachtungen aus dem Ausgleich entfernt werden. Dieses Verhalten führt dazu, dass der Ausgleich in eine falsche Richtung konvergieren würde. Natürlich gibt es im rmGEO auch andere Möglichkeiten zur Aufdeckung von Ausreißern. Diese erfordern jedoch meist vertiefende Anwenderkenntnisse und sind im Gegensatz zu einem vollständig automatisierten Ablauf mit einem höheren manuellen Zeitaufwand verbunden.

Eli	Art	von	nach
1	Ri	PP4	P6003
2	Ri	HP1	PP3
3	Dh	PP4	EP20
4	Ri	PP3	PP2
5	Ri	PP3	P6003
6	Ri	PP2	P6001

Tabelle 4.3: Eliminierungen rmGEO

Eli	Art	von	nach
1	Ri	HP1	PP1
2	Ri	PP1	P6001
3	Ri	PP3	PP2
4	Dh	PP1	P6001
5	Dh	PP3	PP2
6	Ri	PP4	EP20
7	Dh	PP4	EP20

Tabelle 4.4: Eliminierungen MATLAB

Betrachtet man nun Tabelle 4.4, so ist sofort erkennbar, dass das eigene Programm sieben der acht fehlerbehafteten Beobachtungen korrekt eliminiert hat, bevor der iterative Ausgleich aufgrund keiner weiteren zu hohen Score-Werte abgebrochen

wurde. Da nach jeder Eliminierung alle aktuellen Gewichtungen wieder zurückgesetzt werden, benötigte das Programm insgesamt 55 Iterationen und etwa acht Minuten Rechenzeit, um das finale Ergebnis zu liefern.

Da es sich bei den eingeführten Beobachtungsfehlern um systematische Abweichungen mittlerer Größe und nicht um extreme Ausreißer handelt, lässt sich der Ausgleich sowohl in rmGEO als auch im MATLAB-Programm auch ohne Eliminierung von Beobachtungen durchführen. Die Fehlergrößen wurden bewusst so gewählt, um die Fähigkeit des MATLAB-Skripts zur feinen Ausreißerdetektion zu demonstrieren. Während die in rmGEO vorgestellte Fehlersuche auf Basis der Absolutglieder sukzessive falsche Eliminierungen empfiehlt, kann das MATLAB-Programm alle eingebrachten Systematiken korrekt identifizieren. Entsprechend liefert die Berechnung ohne diese Ausreißer im MATLAB-Ausgleich das bestmögliche Ergebnis. In rmGEO zeigt sich hingegen das gegenteilige Verhalten. Die Eliminierung der durch die Absolutglieder vorgeschlagenen Beobachtungen führt zu einer kontinuierlichen Verschlechterung des Ausgleichs, sodass die Differenz zu den synthetisch erzeugten, wahren Referenzkoordinaten stetig zunehmen. Bereits nach der ersten Fehlersuche weist eine eigentlich korrekte Beobachtung das größte Absolutglied auf und würde fälschlicherweise entfernt werden. Das rmGEO-Ergebnis ohne jegliche Eliminierung liegt daher deutlich näher an den wahren Werten als ein Ausgleich mit Eliminierung auf Basis der Absolutglieder. Zur Vollständigkeit zeigt Tabelle 4.5 daher die ausgeglichenen Koordinaten des MATLAB-Programms auf Basis der bereinigten Messdaten, sowie das rmGEO-Ausgleichs ohne jegliche Eliminierungen. Zusätzlich wird auch die jeweilige lagemäßige Abweichung  $\Delta_{yx}$  zu den wahren Referenzkoordinaten dargestellt.

Aus Redundanzgründen kann die freie Station HP1 generell etwas schlechter als die anderen Netzpunkte bestimmt werden. Abgesehen davon liegen trotz der acht fehlerhaften Beobachtungen beide Ausgleichsergebnisse in einem insgesamt guten Abweichungsbereich. Die Summen der Differenzabstände zu den wahren Werten machen jedoch deutlich, dass das eigene Programm insgesamt fast doppelt so nah an den wahren Werten liegt wie das rmGEO-Ausgleichsergebnis. Betrachtet man die einzelnen Punktabweichungen im Detail, zeigt sich außerdem, dass die Schätzgenauigkeit beim MATLAB-Programm deutlich gleichmäßiger ausfällt als beim rmGEO-Ausgleich. Es sei jedoch nochmals betont, dass man vermutlich mit mehr Aufwand und Anwenderkenntnis auch im rmGEO ähnlich gute Ergebnisse erzielen kann.

Pkt	Wahre Werte [m]		rmGEO Ausgleich [m]			MATLAB Ausgleich [m]		
	Y	X	Y	X	$\Delta_{yx}$	Y	X	$\Delta_{yx}$
PP1	-315,187	679,694	-315,212	679,680	0,029	-315,194	679,686	0,011
PP2	-327,888	703,807	-327,884	703,810	0,005	-327,887	703,804	0,003
PP3	-315,830	735,922	-315,832	735,929	0,007	-315,817	735,915	0,015
PP4	-284,765	747,381	-284,746	747,407	0,032	-284,757	747,389	0,011
HP1	-285,898	702,498	-285,959	702,528	0,068	-285,860	702,509	0,040
$\Sigma$					0,141			0,079

Tabelle 4.5: Vergleich der Ausgleiche anhand der Lagedifferenzen  $\Delta_{yx}$

Auch die Fehler- und Konfidenzellipsen der ausgeglichenen Standpunkte weisen nach dem MATLAB-Ausgleich trotz der fehlerbehafteten Messdaten ein sehr hohes Genauigkeitsniveau auf. Bei den rmGEO-Punktschätzungen sind die Halbachsen hingegen deutlich größer und die Ellipsen insgesamt eher rund, wie im Netzplot aus Abbildung 4.7 erkennbar ist. Letzteres fiel auch in weiteren Beispielnetzen auf, bei denen im rmGEO alleinstehende Messungen zu Punkten außerhalb des eigentlichen Netzbereichs dennoch ähnlich runde Ellipsen zeigten wie zentrale Netzpunkte.

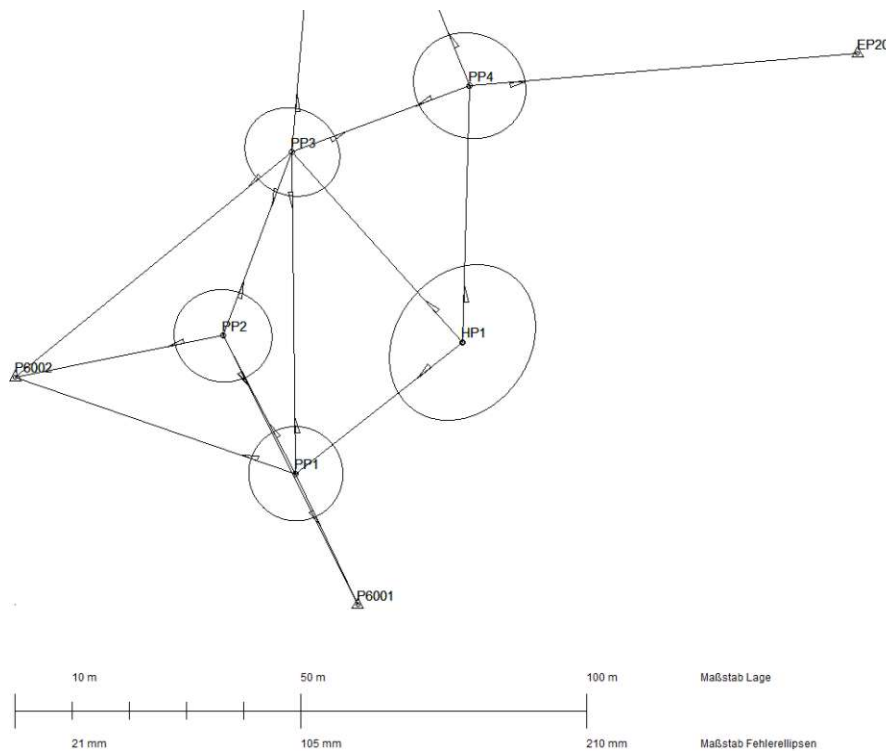


Abb. 4.7: Netzplot nach dem Ausgleich in rmGEO inklusive Fehlerellipsen

Im Gegensatz dazu bilden die Ellipsen des MATLAB-Programms, welche im Netzplot aus Abbildung 4.8 zu sehen sind, die Unsicherheiten solcher Messungen deutlich realistischer ab, was sich in stark elongierten Halbachsen quer zur Messrichtung ausdrückt. Auch dies unterstreicht den Vorteil eines robusten, automatisierten Ausgleichs zur zuverlässigen Behandlung fehlerbehafteter Messdaten, und zeigt, wie wichtig eine realistische Abbildung der Messunsicherheiten für die Qualitätsbeurteilung des Ausgleichsergebnis ist. Dennoch sei betont, dass jeder Netzausgleich ein gewisses Maß an Feinabstimmung erfordert. Auch das entwickelte Ausgleichsprogramm liefert nur dann optimale Ergebnisse, wenn die Beobachtungsgenauigkeiten realistisch geschätzt und die Einstellungen für die Strenge der Ausreißerdetektion auf das jeweilige Netz sinnvoll abgestimmt werden.

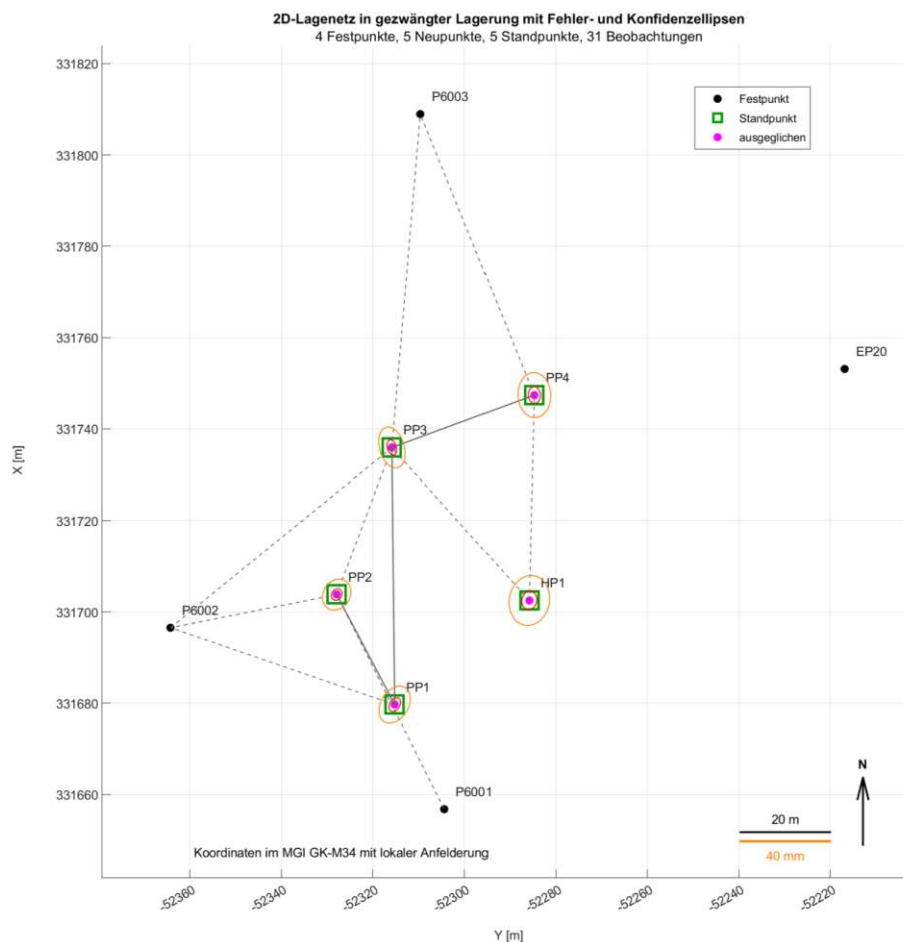


Abb. 4.8: Netzplot nach dem Ausgleich in MATLAB inklusive Konfidenzellipsen

## 4.4 Bündelblockausgleich

Der Bündelblockausgleich ist eine zentrale Berechnungsmethode in der Photogrammetrie und damit auch für die Auswertung von UAV-Befliegungen von großer Bedeutung. Dabei werden alle Bildaufnahmen, ihre Orientierungsparameter sowie die Pass- und Bildpunkte gemeinsam in einem überbestimmten Ausgleich berechnet. Ziel ist es, die äußeren Orientierungen der Bildaufnahmen sowie die dreidimensionalen Koordinaten der Passpunkte bestmöglich zu bestimmen. Durch die Integration von Bodenpasspunkten kann die Genauigkeit zusätzlich gesteigert werden. Der Bündelblockausgleich bildet somit die Grundlage für eine präzise, flächenhafte Punktbestimmung zur Erstellung von Orthophotos und Geländemodellen.

Alle photogrammetrischen Berechnungen dieser Arbeit wurden mit der Software Agisoft Metashape durchgeführt. Zu Beginn werden die Kamerapositionen der entsprechenden Befliegung in das Programm eingelesen. Folgend können die Bilddaten der einzelnen Aufnahmen anhand ihrer Qualität beurteilt und gegebenenfalls gefiltert werden. Mit den verbleibenden, qualitativ hochwertigen Bildern wird anschließend auf Grundlage automatisch detektierter Verknüpfungspunkte (*Tie Points*) ein erster inertialer Bündelblockausgleich berechnet. Dieser Schritt dient nicht der endgültigen Georeferenzierung, sondern der internen Konsistenzprüfung und Optimierung der Blockgeometrie. Es kann eine erste Anpassung der Kalibrierparameter der Kamera und eine Qualitätsfilterung der *Tie Points* durchgeführt werden. Erst im Anschluss erfolgt die Transformation in das gewünschte Koordinatensystem sowie ein finaler Bündelblockausgleich – optional auch gezwängt unter Einbeziehung von Bodenpasspunkten (*Ground control points*, GCP). Die weiterführende Berechnung nach dem inertialen Ausgleich wird in den jeweiligen Auswertungsabschnitten der Testgebiete detailliert erläutert.

Die Beurteilung einer Bündelblockausgleichung kann anhand mehrerer Qualitätsindikatoren erfolgen, von denen nahezu alle durch einen Root Mean Square (RMS) beschrieben werden. Diese statistische Kennzahl wird als Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung  $d$  zwischen gemessenen und ihren berechneten (oder bekannten) Referenzwerten definiert. Formel 4.7 zeigt die allgemeine Form des RMS für  $n$  Wertepaare.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (4.7)$$

Für den inertialen Bündelblockausgleich ist das wichtigste Qualitätsmaß der Reprojektionsfehler, welcher in Pixel angegeben wird. Er berechnet sich aus der Wurzel der mittleren gewichteten Quadratsumme der Bildresiduen, über alle Aufnahmen

und Beobachtungen (Formel 4.8) und entspricht damit der Standardabweichung der Gewichtseinheit  $\sigma_0$  eines klassischen Ausgleichs. Dabei beschreibt  $v$  den Vektor der Residuen,  $P$  die Gewichtsmatrix der Beobachtungen und  $f$  die Freiheitsgrade des Ausgleichs. Der Reprojektionsfehler  $\sigma_0$  misst, wie gut alle Bildmessungen  $(x_i, y_i)$  zu den berechneten (projizierten) Bildkoordinaten  $(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$  passen und stellt somit einen internen Präzisionsparameter für die Modellstabilität dar. Werte von 0.3–0.5 px stehen für eine sehr stabile innere Orientierung und eine ausgezeichnete Blockgeometrie, während Werte über 1.0 px auf eine unzureichende Bildorientierung oder fehlerhafte Verknüpfungspunkte hinweisen.

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2]} \approx \sqrt{\frac{v^T P v}{f}} \quad (4.8)$$

Ein weiterer Qualitätsparameter ist der RMS der Kamerapositionen (Formel 4.9), also die mittlere Abweichung der berechneten Kamerakoordinaten  $(\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i)$  von ihren ursprünglichen GNSS Positionen  $(X_i, Y_i, Z_i)$ . Dieser Parameter bewertet die Stabilität der Trajektorie, sagt jedoch nichts über die Bildgeometrie oder die Objektgenauigkeit aus. Er wird in der Regel in Metern angegeben, kann in Agisoft aber auch in Pixel ausgewiesen werden. Niedrige RMS-Werte ( $< 0.02$ – $0.05$  m bei RTK) weisen auf eine stabile Trajektorie und eine gute GNSS/IMU-Synchronisation hin, während hohe Werte ( $> 0.10$  m) auf Fehler in der Kamerakalibrierung, IMU-Offsets oder zeitliche Verschiebungen zwischen GNSS und Kameraauslösung hindeuten.

$$RMS_{\text{cam}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(X_i - \hat{X}_i)^2 + (Y_i - \hat{Y}_i)^2 + (Z_i - \hat{Z}_i)^2]} \quad (4.9)$$

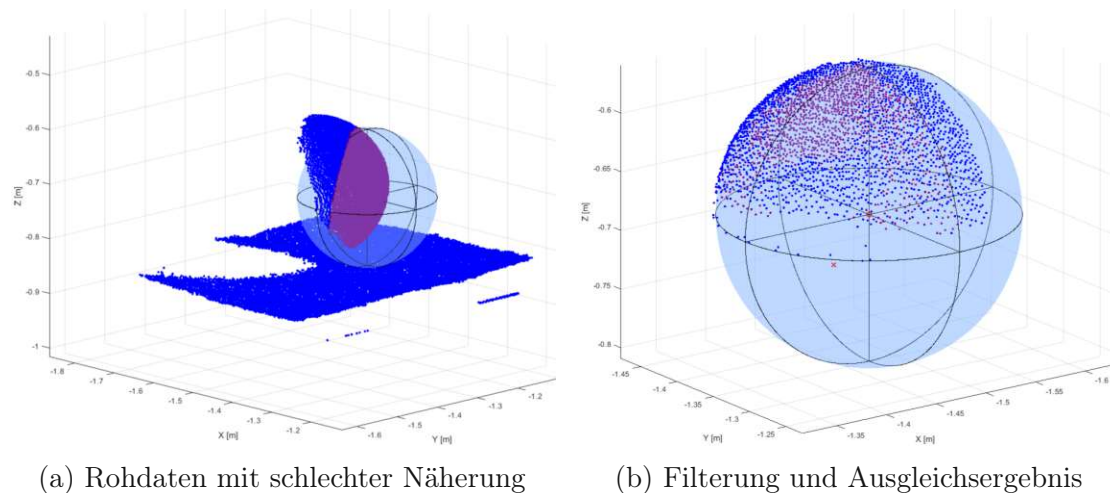
Stehen für den Bündelblockausgleich Bodenpasspunkte (GCP) oder unabhängige Kontrollpunkte (*Check Points*, CP) zur Verfügung, so können am Ende der Ausgleichung auch externe Genauigkeitsparameter angegeben werden. Über die gleiche RMS-Formel wie bei den Kamerapositionen (Formel 4.9) wird hierbei die mittlere Abweichung der am Boden gemessenen Punktkoordinaten  $(X_i, Y_i, Z_i)$  von den im Modell berechneten Koordinaten  $(\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i)$  bestimmt. Im Falle von GCPs beschreibt der RMS, wie gut die Modell-Georeferenzierung im Objektkoordinatensystem realisiert wurde. Im Falle von Check Points bewertet er die externe Modellgenauigkeit, also wie präzise das Modell unabhängig bekannte Punkte im Raum reproduzieren kann. In Agisoft kann dieser Parameter sowohl in Pixel (bezogen auf das Bild) als auch in Metern (bezogen auf das Objektkoordinatensystem) angezeigt werden. Eine sehr gute Georeferenzierung zeichnet sich dabei durch RMS-Werte unter 2 cm aus. Werte die größer als 5 cm sind, deuten auf Fehler bei den Passpunkten, einem GNSS-Versatz oder einer unzureichenden Blockgeometrie hin.

## 4.5 Kugelausgleich (MATLAB-Programmierung)

Ein Kugelausgleich wird im Bereich des Laserscanning eingesetzt, um die exakten Mittelpunkte runder Laser-Targets, wie zum Beispiel reflektierender Kugeln, zu bestimmen. Dabei wird die erfasste Punktwolke, welche die Kugeloberfläche abbildet, mathematisch an ein Kugelmodell angepasst. Als funktionaler Zusammenhang zwischen den unbekanntem Mittelpunktkoordinaten und den beobachteten Oberflächenpunkten dient dabei die allgemeine Kugelgleichung (Formel 4.10). Durch die Ausgleichung wird der Summe der quadratischen Abstände aller Punkte zur Kugeloberfläche minimiert und der Mittelpunkt der Kugel geschätzt.

$$r^2 = (\Delta x_i - \Delta x_M)^2 + (\Delta y_i - \Delta y_M)^2 + (\Delta z_i - \Delta z_M)^2 \quad (4.10)$$

Zur Bestimmung solcher Kugel-Targets wurde im Rahmen dieser Arbeit ein eigenes Ausgleichsprogramm entwickelt. Als Eingabedaten benötigt das Programm Näherungskordinaten des Kugelmittelpunkts sowie eine Punktwolken-datei des vermessenen Targets, bestehend aus den 3D-Koordinaten der Punkte und den zugehörigen Intensitätswerten. Bei den UAV-Befliegungen kamen weiße Kugeln auf schwarzen Platten zum Einsatz (siehe Kapitel 5.1.2), wodurch bereits eine erste effektive Filterung der Punktwolke anhand der Intensitätsrückstreuung möglich ist. Zusätzlich erfolgt, ausgehend vom angenäherten Mittelpunkt, eine geometrische Filterung unter Berücksichtigung der bekannten Abmessungen der verwendeten Kugel-Targets. In einem ersten Durchlauf wird diese Filterung bewusst großzügiger gewählt, sodass das Programm auch bei ungenauen Näherungswerten stabile Ergebnisse liefert. Abbildung 4.9a zeigt die Punktwolke eines Kugel-Targets, das mit einem statischen Laserscanner unter Laborbedingungen eingemessen wurde.



(a) Rohdaten mit schlechter Näherung

(b) Filterung und Ausgleichsergebnis

Abb. 4.9: Kugel-Ausgleichsprozess mit einer hochauflösenden Punktwolke

Ausgehend von den groben Mittelpunktnäherungen erfolgt ein iterativer Ausgleichsprozess. In jedem Iterationsschritt wird die geometrische Filterung sukzessive verschärft und ein erneuter Kugelausgleich zur Bestimmung verbesserter Näherungswerte durchgeführt. Ab der dritten Iteration kommt zusätzlich ein robustes LMS-RANSAC-Verfahren zum Einsatz: Es werden zufällig 20 Punkte aus der Punktwolke ausgewählt und ein Kugelausgleich berechnet. Dieser Vorgang wird 50-mal wiederholt. Die Variante mit dem geringsten Median der Verbesserungsquadrate liefert die Mittelpunktkoordinaten, welche als neue Näherungswerte übernommen werden. Auf Basis dieser robusten Näherungen erfolgt eine besonders strenge Filterung der Punktwolke, um auch kleinere Ausreißer zu eliminieren. Abschließend wird ein finaler Kugelausgleich durchgeführt.

Zur quantitativen Beurteilung der internen Präzision des geometrischen Kugelmodells wurde ein entsprechender Parameter eingeführt. Aus der Kovarianzmatrix der ausgeglichenen Kugelkoordinaten werden die Varianzen und Kovarianzen entnommen, aus denen anschließend die Präzision der Punktlage nach Helmert berechnet wird. Durch Einbeziehung der Z-Komponente wird zusätzlich ein räumliches Präzisionsmaß ausgegeben. Das Programm gibt zudem einen Plot aus, der die ausgeglichene Kugel mit ihrem Mittelpunkt und der zugeschnittenen Punktwolke visualisiert. Ohne Beschreibung und Kommentare umfasst der Kugelausgleich rund 400 effektive Codezeilen.

Abbildung 4.9b zeigt das Ergebnis der in Abbildung 4.9a dargestellten Punktwolke. Es wurde bewusst eine Mittelpunktnäherung gewählt, die einen 3D-Abstand von etwa 12 cm zur bekannten Position des Kugelmittelpunktes aufweist. Das Beispiel verdeutlicht, dass das Ausgleichsprogramm selbst bei ungünstigen Näherungswerten dennoch eine stabile LMS-RANSAC-Lösung findet.

Zur weiteren Veranschaulichung soll an dieser Stelle bereits ein Beispiel aus den praktischen Messungen vorgestellt werden. Abbildung 4.10a zeigt das Ergebnis einer Punktwolke, die im Rahmen der Messungen aus Kapitel 5 aufgenommen und für einen Kugelausgleich herangezogen wurde. Dargestellt ist die Punktwolke nach der ersten Intensitätsfilterung. Deutlich erkennbar ist, dass nahezu alle Punkte der schwarzen Grundplatte aufgrund ihrer geringen Rückstreuwerte aus der Punktwolke entfernt wurden. Lediglich die Punkte der weißen Kugeloberfläche sowie Punkte der umgebenden Vegetation bleiben erhalten. Auch das charakteristische lineare Abtastmuster des Scanners ist in der Punktwolke gut sichtbar. Die Vegetationspunkte werden anschließend im Zuge der geometrischen Filterung eliminiert, die direkt auf die Intensitätsfilterung folgt. Das Ergebnis ist eine bereinigte Punktwolke, welche als Ausgangsbasis für den iterativen Kugelausgleich dient. Abbildung 4.10b zeigt das gefilterte Kugel-Target, das aus der Punktwolke der UAV-Messung extrahiert

wurde. Die verwendeten Näherungskoodinaten weichen auch hier um mehrere Zentimeter vom später berechneten Mittelpunkt ab. Trotz dieser Abweichung konnte durch den LMS-RANSAC-Ausgleich eine stabile Lösung ermittelt werden. Etwa 80 Punkte, die mit einer Streuung von rund  $\pm 1.5$  cm um die Kugeloberfläche liegen, trugen nach allen Filterstufen letztlich zu der Lösung bei. Die hohe interne Qualität des Ausgleichsprogramms zeigt sich in der Punktlagepräzision des bestimmten Kugelmittelpunktes, welche weniger als 2 mm beträgt. Die Genauigkeit der Punktbestimmung im übergeordneten Koordinatensystem wird in den entsprechenden Kapiteln zu den Messgebieten näher erläutert.

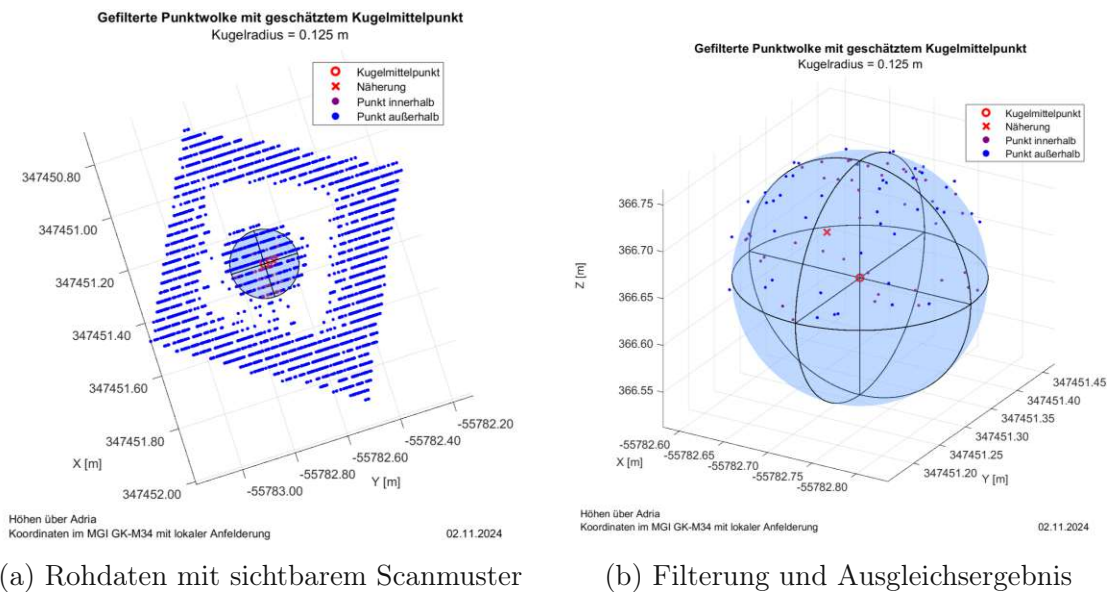


Abb. 4.10: Kugel-Ausgleichsprozess mit einer UAV-Punktwolke

## 4.6 Pyramidenausgleich (MATLAB-Programmierung)

Neben den Kugel-Targets wurden im Rahmen dieser Arbeit auch weiße, gleichschenkelige Dreieckspyramiden als 3D-Lasertargets entwickelt. Diese wurden, ebenfalls wie die Kugeln, auf schwarzen Grundplatten montiert. Zur Bestimmung ihrer Ausrichtung, Verkippung und räumlichen Lage wurde wiederum ein eigenes Ausgleichsprogramm realisiert, das anfangs ähnlich wie der Kugelausgleich arbeitet. Ausgehend von den bekannten Geometrieinformationen der Pyramide, den Näherungskoodinaten der Spitze und einem genäherten Richtungspunkt einer beliebigen Kante werden zunächst Näherungskoodinaten aller Eckpunkte bestimmt. Abbildung 4.11a zeigt eine genäherte Pyramide für eine Punktwolke, die unter Laborbedingungen mit einem statischen Laserscanner aufgenommen wurde.

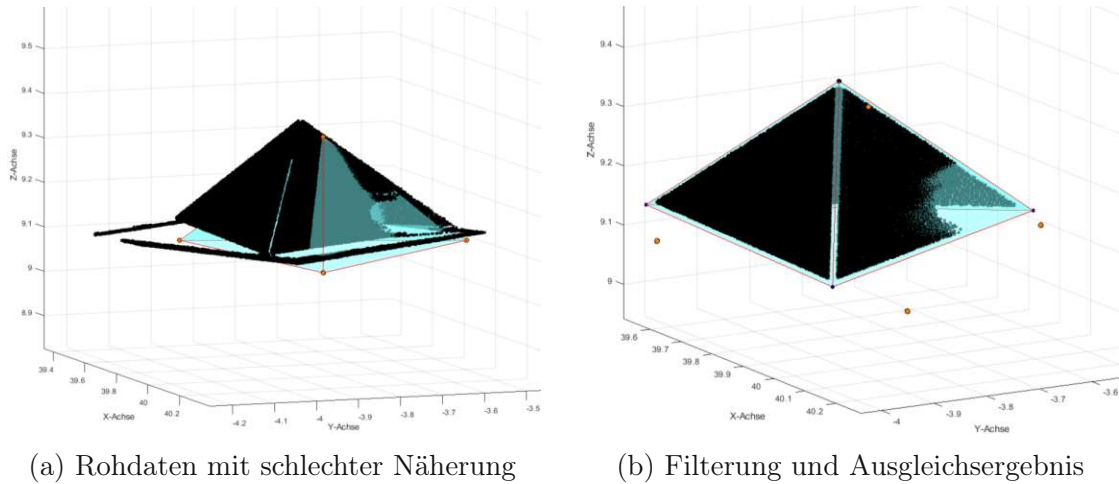


Abb. 4.11: Pyramiden-Ausgleichsprozess mit einer hochauflösenden Punktwolke

Nach der Näherungsberechnung erfolgt, analog zum Kugelausgleich, zunächst eine Intensitätsfilterung anhand der Rückstreuwerte der gemessenen Punkte. Die in der Abbildung dargestellte Punktwolke zeigt den Zustand nach dieser Filterung. Deutlich ist zu erkennen, dass bereits ein großer Teil der Punkte der schwarzen Grundplatte entfernt wurde. Für die Demonstration wurde erneut eine ungenaue Näherung zur bekannten Referenzgeometrie gewählt. Im nächsten Schritt erfolgt eine erste grobe geometrische Filterung der Punktwolke anhand der genäherten Eckpunkte. Ein direkter Gesamtausgleich der Pyramidengeometrie – mit simultaner Schätzung aller Ebenen- und Spitzenparameter – erwies sich aufgrund der komplexen Geometrie als unverhältnismäßig aufwendig. Daher wurde ein alternatives, robustes Optimierungsverfahren entwickelt. Die gefilterte Punktwolke wird mithilfe der Näherungskordinaten in drei Teilwolken unterteilt, die jeweils einer Seitenfläche der Pyramide entsprechen. Für jede Seite soll anschließend eine orientierte Ebene im Raum bestimmt werden, deren Schnittpunkte die gesuchten Koordinaten der Pyramidenspitze liefern. Grundlage bildet die allgemeine Ebenengleichung 4.11:

$$a x_i + b y_i + c z_i + d = 0 \quad (4.11)$$

Da bei der Verwendung dieser Gleichung für eine nahezu koplanare Punktmenge die Normalgleichungsmatrix singulär wird, und somit nicht eindeutig invertierbar ist, wurde zunächst die in der Literatur empfohlene Singulärwertzerlegung (SVD) getestet. Damit konnten zwar Ebenenparameter bestimmt werden, jedoch nicht mit der gewünschten Genauigkeit. Deshalb wurde die Ausgleichsfunktion für die Seitenflächen auf ein robustes LS-RANSAC-Optimierungsverfahren umprogrammiert. Für jede Seitenflächen-Punktwolke werden aus allen möglichen Punkttripeln

Ebenenparameter  $(a, b, c, d)$  geschätzt. Um den Rechenaufwand zu begrenzen, kann die maximale Punktzahl pro Seitenfläche über einen Parameter limitiert werden. Standardmäßig liegt dieser bei 60. Hat eine Seitenfläche mehr Punkte, wird die Punktwolke zunächst ausgedünnt und anschließend auf 60 zufällige Punkte reduziert. Aus diesen 60 Punkten lassen sich 34 220 Tripel bilden, wodurch entsprechend viele Ebenenlösungen theoretisch berechnet werden. Über zusätzliche, frei definierbare Begrenzungskriterien kann die Anzahl der zu berechnenden Tripel weiter reduziert werden: Ein minimal zulässiger Dreiecksumfang schließt zu kleinräumige Punkt-konstellationen aus, während ein minimaler Abstand eines Punktes zur Verbindungslinie der beiden anderen Punkte kollineare Tripel verhindert. Diese Filterung reduziert den Rechenaufwand und erhöht zugleich die Stabilität der Ergebnisse. Für alle gültigen Tripel werden Ebenenparameter berechnet und anschließend normalisiert. Für jede Ebene wird der Neigungswinkel gegenüber der Horizontalen bestimmt und mit der Neigung der aktuellen Näherung verglichen. Liegt die Abweichung über einem Grenzwert, wird die Ebene verworfen. Dieser Neigungsfilter liegt bei der ersten RANSAC-Iteration standardmäßig bei  $35^\circ$  und entfernt eindeutig fehlerhafte Ebenen. Gleichzeitig definiert dieser Wert ungefähr die mögliche Verkippung einer Pyramide im Feld, da bei zu großer Verkippung mindestens eine der Seitenfläche vom UAV-LiDAR nicht mehr vollständig erfasst werden könnte.

Für jeden gültigen durch RANSAC erzeugten Parametersatz werden anschließend die Orthogonalabstände aller Punkte zur jeweiligen Ebene berechnet und die Quadratsumme dieser Abstände gebildet. Der Parametersatz mit der kleinsten Quadratsumme stellt die gesuchte Least-Squares-Lösung dar. Für jede Seitenfläche wird somit ein optimaler Ebenenparametersatz bestimmt. Über den Schnitt dieser Ebenen ergibt sich die 3D-Koordinate der Pyramidenspitze. Da dieses Verfahren keinem klassischen geodätischen Ausgleich mit Beobachtungsgleichungen und Normalgleichungen entspricht, sondern einem geometrischen Least-Squares-Fit der Ebenenparameter, entsteht dabei keine Kovarianzmatrix der geschätzten Größen. Parallel zu jedem LS-Fit werden auch alle Punkte, die zu keinem gültigen Punkt-tripel gehören, markiert und aus der aktuellen Seitenflächen-Punktwolke entfernt. Diese Markierung wird bei späteren RANSAC-Durchläufen berücksichtigt, indem markierte Punkte von der zufälligen Auswahl ausgeschlossen werden, es sei denn, die Punktzahl der Fläche liegt unter 20.

Der gesamte LS-RANSAC-Vorgang wird standardmäßig 30 Mal wiederholt, was insbesondere bei Punktwolken mit hoher Dichte zu stabileren Ergebnissen führt. Wenn eine Seitenfläche weniger als 60 Punkte enthält, könnte auf diese Iteration verzichtet werden. In solchen Fällen empfiehlt es sich jedoch, den Grenzwert der zufälligen Punktauswahl kleiner als die vorhandene Punktzahl zu wählen und den gesamten Durchlauf dennoch mehrfach zu wiederholen. Dies erhöht die Robustheit der Punktwolkenfilterung und stabilisiert den Ausgleich. Aus allen Wiederholungen

liegen dann mehrere Schätzungen der Spitzkoordinaten vor, aus denen die finale Lösung über einfache Medianbildung ermittelt wird. Zusätzlich werden jene drei Seiten-Parametersätze gespeichert, deren berechnete Spitze am nächsten zur Medianlösung liegt. Mithilfe dieser drei Ebenen und der bekannten Pyramidengeometrie werden anschließend die Eckpunkte berechnet. Dazu werden zunächst die Richtungen der Schnittgeraden der Ebenennormalen bestimmt. Anschließend wird ein gewichtetes Kabsch-Verfahren angewendet, um die bekannte Pyramidengeometrie bestmöglich an die berechneten Ebenen anzupassen. Dieses Verfahren bestimmt jene Rotationsmatrix, welche die gemessenen Richtungsvektoren so auf die idealen Richtungsvektoren abbildet, dass die Summe der quadrierten Abstände zwischen beiden Vektoren minimiert wird. Die Gewichtung erfolgt auf Basis der Punktzahl pro Seitenfläche, wodurch Seiten mit höherer Punktdichte einen größeren Einfluss auf die berechnete Orientierung erhalten. Ausgehend von der Spitze und den orientierten Richtungsvektoren, werden dann die Eckkoordinaten der Pyramide bestimmt.

Anhand der Ecken und der Spitze wird dann für jede Seitenfläche ein entsprechender Ebenen-Parametersatz berechnet. Die vier berechneten Punkte, sowie die drei zugehörigen Parametersätze stellen aber noch nicht die finalen Ergebnisse dar – sie dienen nach diesem ersten Durchlauf nur als robuste Näherungen für einen erneuten Ausgleich mit einer strengeren geometrischen Filterung. Zusätzlich wird auch der Toleranzwert für die erlaubte Neigungsänderung der Ebenen verringert. Nach dem neuen Ausgleich, werden die Näherungen nochmals aktualisiert und die Filterwerte ein letztes mal verschärft. Der dritte und letzte LS-RANSAC-Durchlauf liefert dann die finalen Koordinaten der Pyramide. Ausgehend von diesen wird der Lotfußpunkt der Spitze auf die Grundplatte abgeleitet, der die tatsächlich gesuchte Bodenkoordinate darstellt.

Ebenso wie beim Kugelausgleich wurde auch beim Pyramidenmodell versucht, einen internen Präzisionsparameter zu definieren. Wie bereits erwähnt, liefert das LS-Fit-Verfahren jedoch keine Kovarianzmatrix, wodurch kein Präzisionsmaß nach Helmert'schem Vorbild implementiert werden kann. Daher wurde in einem weiteren Schritt geprüft, ob die Ebenenparameter der bereits sehr fein gefilterten Seitenflächen mittels Singulärwertzerlegung (SVD) in vergleichbarer Genauigkeit neu bestimmt werden können, um daraus eine Kovarianzmatrix der Unbekannten abzuleiten. Dieser Ansatz erwies sich jedoch als deutlich instabil. Im Gegensatz zum robusten LS-RANSAC-Verfahren führten bereits kleinste verbleibende Ausreißer in den gefilterten Punktwolken zu einer wesentlich größeren Streuung der Ebenenparameter und damit zu einer erheblich geringeren Genauigkeit der daraus abgeleiteten Spitzenkoordinaten. Die SVD-Implementierung wurde daher verworfen. Für die Modellbewertung wurde daher ein maßgeschneidertes, internes Präzisionsmaß ein-

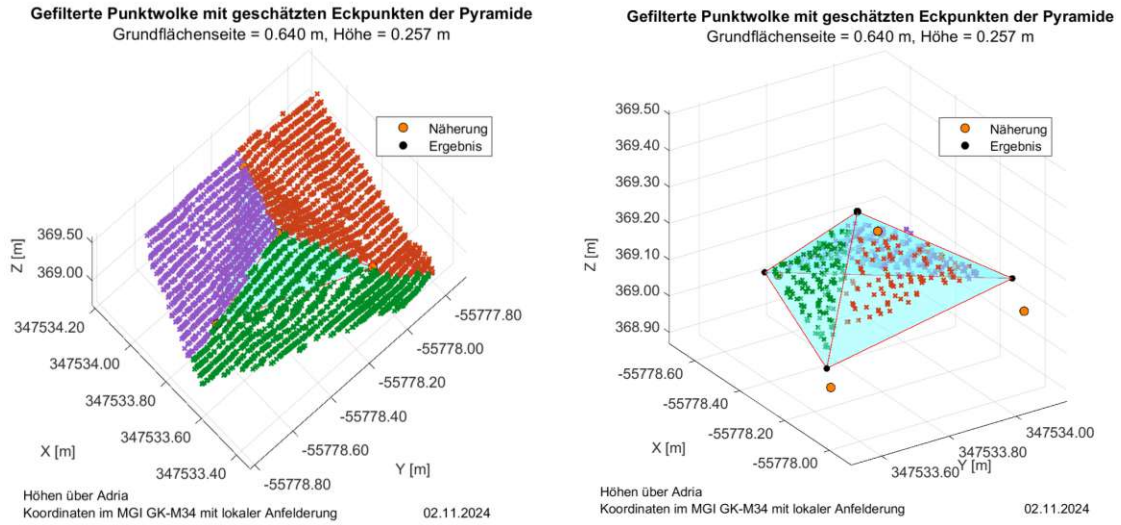
führt, welches die Konsistenz der Flächenanpassung beschreibt. Aus den finalen Eck- und Spitzkoordinaten aus dem LS-RANSAC-Verfahren werden zugehörige, finale Ebenenparameter für die drei Seitenflächen bestimmt. Anschließend werden die orthogonalen Abstände  $d$  zu den drei gefilterten Seiten-Punktwolken, welche zur Berechnung der finalen Pyramidenkoordinaten dienen. Unter Einbeziehung der Punktzahl  $n_i$  der jeweiligen Seitenflächen, wird dann mit Formel 4.7 für jede Seite ein RMS-Wert bestimmt. Unter erneuter Einbeziehung der jeweiligen Punktzahl wird zusätzlich ein flächengewichteter Gesamtwert berechnet:

$$RMS_{\text{ges}} = \frac{\sqrt{n_1 \cdot RMS_1^2 + n_2 \cdot RMS_2^2 + n_3 \cdot RMS_3^2}}{n_{\text{ges}}} \quad (4.12)$$

Die eingeführten RMS-Parameter der Pyramide beschreiben die interne Präzision der Flächenanpassung und beschreiben, wie stabil die berechnete Pyramidengeometrie in der gefilterten LiDAR-Punktwolke liegt. Da der LS-RANSAC-Ansatz bei wiederholter Durchführung äußerst konstant zu nahezu identischen Filterungen und Ebenenlösungen führt, können diese Maße repräsentativ für die Reproduzierbarkeit des Modells angesehen werden.

Abschließend erzeugt das Programm nach jedem Ausgleich einen Plot mit der gefilterten Punktwolke, den Startwerten der Näherungskordinaten, sowie den finalen Ausgleichsergebnissen. Zusätzlich werden alle Resultate mit den zugehörigen Geometrieinformationen der Pyramide tabellarisch protokolliert. Insgesamt wurden etwa 1650 Zeilen MATLAB-Code zur Umsetzung des Programms geschrieben. Abbildung 4.11b zeigt den finalen Plot des Ausgleichsergebnis der Punktwolke aus Abbildung 4.11a.

Abbildung 4.12a zeigt eine grob zugeschnittenen Target-Punktwolke aus realen UAV-Messungen des Testgebiets aus Kapitel 5. Neben der Punktwolke wurden dem Programm auch Näherungswerte für die Spitze und den Richtungspunkt einer Kante übergeben. Auf Grundlage dieser Eingabedaten berechnete das Programm die Näherungskordinaten der weiteren Eckpunkte und teilte die Punktwolke anschließend in drei Teilwolken auf, was durch die farbliche Kennzeichnung der Punkte veranschaulicht wird. Zudem ist in der Abbildung deutlich das charakteristische Abtastmuster des Scanners zu erkennen.



(a) Rohdaten mit sichtbarem Scanmuster (b) Filterung und Ausgleichsergebnis

Abb. 4.12: Pyramiden-Ausgleichsprozess mit einer UAV-Punktwolke

Abbildung 4.12b stellt das finale Ausgleichsergebnis nach allen drei LS-RANSAC-Durchläufen dar. Auf den Seitenflächen verbleiben ausschließlich jene Punkte, die tatsächlich in die letzte Ebenenberechnung eingingen. Punkte in Kantenbereichen oder der Umgebung der Pyramide wurden zuvor durch die geometrische Filterung entfernt. Anhand der dargestellten Näherungspunkte ist die Veränderung der Koordinaten durch den Ausgleich deutlich zu erkennen: Die tatsächliche Position des Targets liegt mehrere Zentimeter von der Näherung entfernt und weist zudem eine merklich stärkere Verkippung der Pyramide auf.

# 5 Testgebiet: Schottergrube

## 5.1 Datenerfassung

### 5.1.1 Testgebiet und Referenzmessung

Das erste im Rahmen dieser Arbeit beflogene Messgebiet, war eine Schottergrube, die im Raum St. Pölten von einer ortsnahen Firma bereitgestellt wurde. Abbildung 6.6 zeigt die Grube mit den umliegenden, zu bestimmenden Punkten. Bei diesen handelt es sich um die tatsächlichen Grenzpunkte des Grundstücks, weshalb diese zunächst mittels GNSS abgesteckt und anschließend mit Eisenrohren dauerhaft vermarkt wurden. Zusätzlich sind die Position der freien Stationierung und die terrestrischen Visuren zu den Punkten dargestellt. Diese Messungen wurden unmittelbar nach der GNSS-Absteckung durchgeführt und dienten der ausgleichenden Bestimmung präziser Referenzkoordinaten. Nach Abschluss der Referenzmessung wurden die UAV-Targets, auf welche sich die Punktbezeichnungen in der Abbildung beziehen, an den Grenzpunkten angebracht und die Befliegung durchgeführt. Die Messungen fanden am 02.11.2024 bei sonnigem, windstillem Herbstwetter statt.

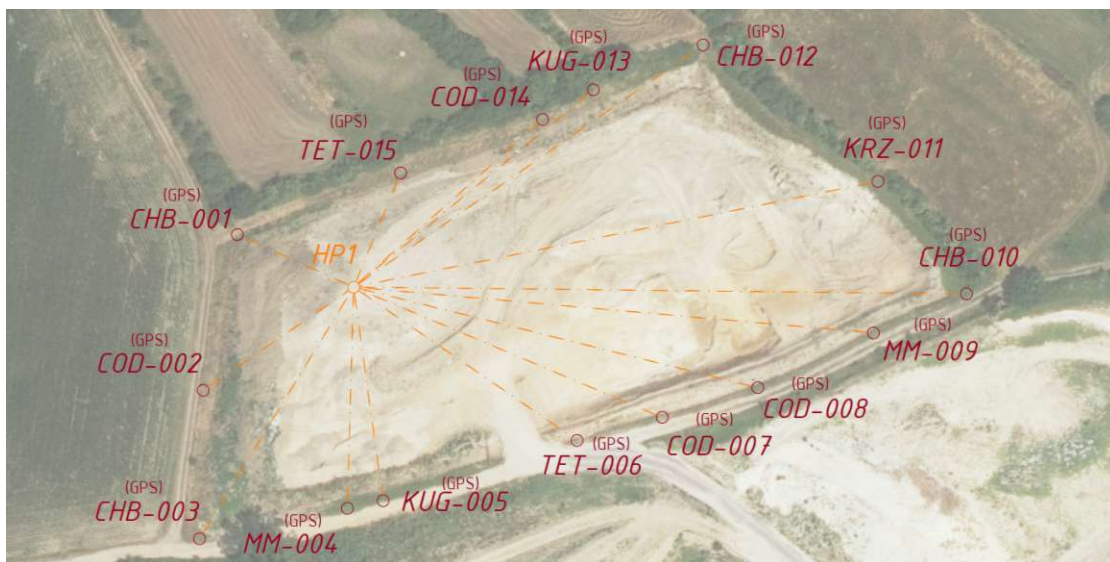


Abb. 5.1: Schottergrube und UAV-Targetbezeichnungen

### 5.1.2 UAV-Targets

Um die Genauigkeit von UAV-Messungen sowohl für LiDAR- als auch für photogrammetrische Aufnahmen umfassend zu prüfen, wurden verschiedene Targets entwickelt und getestet. Diese zielen speziell darauf ab, die Präzision einer Einzelpunktbestimmung mittels UAV zu erhöhen. Zur besseren Kontrolle der Messungen wurden an den Eckpunkten der Schottergrube klassische photogrammetrische Schachbrett-Targets (Abbildung 5.2a) angebracht. Die Punkte wurden fortlaufend nummeriert und mit einem Kürzel für den Target-Typ versehen. Die Checkersboards erhielten beispielsweise die Bezeichnung „CHB“. Abbildung 5.2b zeigt das Target KRZ-011, ein weißes Kreuz auf schwarzem Untergrund, das ebenfalls für die photogrammetrische Auswertung getestet wurde. Um die Targets exakt über den vermarkten Punkten zu positionieren, wurde in jedem Eisenrohr ein Hohlraumdübel (Abbildung 5.3a) gespreizt. Durch ein zentrales, kleines Loch in ihrer Plattenmitte konnten die Targets mithilfe der zugehörigen Dübel-Schraube exakt über den Rohren befestigt werden.

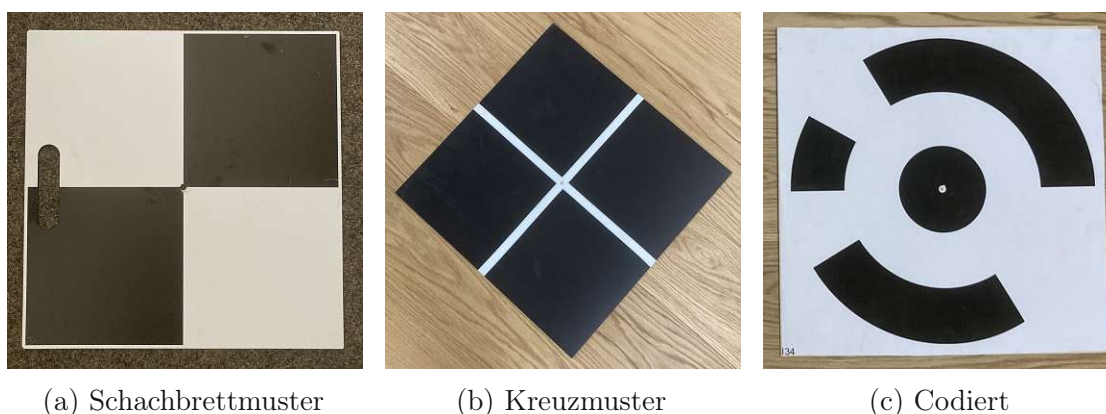


Abb. 5.2: Photogrammetrische Targets

Für die photogrammetrische Auswertung wurden außerdem codierte Targets (COD) getestet. Die Software Agisoft Metashape stellt hierfür eine ganze Reihe solcher vordefinierten Marker zur Verfügung, die während der Auswertung automatisch erkannt werden können. Die entsprechenden PDF-Vorlagen lassen sich ausdrucken, wobei auf eine exakte Skalierung zu achten ist, da die Marker auf den Bildern eine ausreichende Pixelanzahl einnehmen müssen, um zuverlässig erkannt zu werden. Der Radius des schwarzen Mittelpunkts eines COD-Targets sollte in einem Foto daher zwischen 10 und 30 Pixel betragen. Eine einfache Umrechnung ergibt, dass der Durchmesser des schwarzen Zentrums etwa dem 10-Fachen der Ground Sampling Distance (GSD) entsprechen sollte, während das gesamte Target idealerweise etwa das 3,5-Fache der GSD aufweisen sollte.

Die Berechnung der GSD erfolgt anhand Formel 5.1. Sie ergibt sich aus der Sensorbreite, der Brennweite der Kamera, der Bildauflösung und der Flughöhe. Sie gibt an, welche reale Bodenfläche von einem einzelnen Pixel abgedeckt wird.

$$GSD = \frac{\text{Sensorbreite} \times \text{Flughöhe}}{\text{Bildbreite} \times \text{Brennweite}} \quad (5.1)$$

Um geeignete Druckmaße für die COD-Targets festzulegen, wurde eine durchschnittliche GSD für die Messflüge abgeschätzt. Dafür wurden die Sensordaten der Zenmuse P1 herangezogen und eine Flughöhe von 40 m über Grund angenommen. Das Einsetzen in die Formel liefert eine GSD von rund 5 mm pro Pixel:

$$GSD = \frac{35,9 \text{ mm} \times 40\,000 \text{ mm}}{35 \text{ mm} \times 8160} = \frac{1\,436\,000}{285\,600} \approx 5,03 \text{ mm/Pixel}$$

Für die ersten Messversuche wurden vier COD-Targets in zwei unterschiedlichen Größen getestet. Ein Target wurde so dimensioniert, dass der Radius des Mittelpunkts 16 Pixel in den Bilder betragen sollte, der andere 20 Pixel. Durch Multiplikation mit der berechneten GSD ergaben sich für die Radien der ausgedruckten Targets dann 8 cm bzw. 10 cm. Die Gesamtgröße der Targets betragen dadurch etwa 56 cm bzw. 70 cm. Bei den Druckeinstellungen für die Targets kann in Agisoft Metashape die gewünschte Pixelgröße für den Radius direkt eingegeben werden. Das Programm generiert daraufhin ein PDF mit 161 A4-Seiten, wobei jede Seite ein anderes codiertes Target enthält. Die PDF der beiden ausgewählten Targets wurden dann auf das Format A0 skaliert, um die gewünschten Targetgrößen beim Plotten zu erhalten. Abbildung 5.2c zeigt exemplarisch eines der insgesamt vier COD-Targets, die auf zugeschnittene Holzplatten geleimt wurden.



(a) Eisenrohr mit Dübel



(b) Exakte Positionierung der Kugel über dem Rohr

Abb. 5.3: Gesamter Aufbau eines Kugel-Target

Für die LiDAR-Aufwertung wurden zwei Kugeltargets (KUG) getestet, wie sie in ähnlicher Form auch zur Orientierung bei Laserscans in der Gebäudevermessung zum Einsatz kommen. Die beiden Kugeln aus Hartplastik haben einen Durchmesser von 25 cm und verfügen über einen offenen Hals, der genutzt wurde, um sie direkt über den Eisenrohren zu montieren. Hierfür wurden die Schrauben der Hohlraumdübel mit einem passenden Holzstück verlängert (Abbildung 5.3a), sodass sich die Kugeln einfach und präzise auf das Holzstück aufstecken lassen. Die Abbildung 5.3b zeigt den gesamten Targetaufbau, bestehend aus Kugel, Eisenrohr und schwarzer Grundplatte. Letztere ist notwendig, um eine bessere Filterung der Scanpunkte anhand der LiDAR-Rückstreuung (Intensitätswerte) zu ermöglichen.

Zwei weitere 3D-Targets, die speziell für die LiDAR-Scans entwickelt wurden, waren gleichschenkelige Pyramiden. Hierfür wurden aus einer großen Massivholzplatte drei identische Dreiecke mit den Seitenlängen 65 cm  $\times$  37 cm  $\times$  37 cm herausgeschnitten und deren Kanten im 45°-Winkel abgeschrägt, sodass sie exakt miteinander verleimt werden konnten. Zur zusätzlichen Stabilisierung wurden die Verbindungen mit dünnen Schrauben fixiert. Anschließend wurden die Pyramiden weiß angestrichen, die Kanten jedoch in schwarz. Dies erleichtert die spätere Filterung anhand der Intensitätswerte und unterstützt das präzise Zuschneiden der Seiten-Punktwolken, da die Ränder so deutlicher abgegrenzt sind und die Übergänge der Seitenflächen klarer bleiben. Da der erste Entwurf eigentlich gleichseitige, gleichschenkelige Pyramiden, sprich Tetraeder (TET), waren, zog sich der Begriff auch weiterhin durch die Programmierung und die Punktbezeichnungen.



(a) Draufsicht



(b) Querschnitt

Abb. 5.4: Pyramiden-Target mit schwarzer Bodenplatte

Damit die Pyramiden stabil auf den Grundplatten stehen und die Spitze exakt über dem Eisenrohr zentriert ist, wurde ein kleiner Holzrahmen auf jede Grundplatte montiert, sodass die Pyramiden nur in der vorgesehenen Position aufgesetzt werden können und nicht mehr verrutschen. Dadurch liegt der Lotfußpunkt der Pyramidenspitze auf der Grundplatte exakt über dem Eisenrohr.

Zusätzlich zu den bereits erwähnten Targets wurden zwei Punkte direkt mit Metallmarken (MM) anstelle von Eisenrohren vermarktet. Diese Marken wurden mit einem hellblauen Markierspray besprüht, um in den photogrammetrischen Aufnahmen besser erkennbar zu sein und gleichzeitig die Intensität der LiDAR-Rückstreuung im Vergleich zur Umgebung zu erhöhen.

### 5.1.3 UAV-Konfigurationen

Vor der Befliegung wurden sowohl die DJI Matrice 350 RTK als auch die IMU- und LiDAR-Einheit der DJI Zenmuse L2 kalibriert. Dabei ergab sich ein Kalibrierungsfehler von 0,027 m, der die erwartete Standardabweichung der Punktpositionen unter optimalen Bedingungen beschreibt. Der anschließende UAV-Flug erfolgte mit einer sehr niedrigen Geschwindigkeit von etwa 2 m/s sowie einer mittleren Flughöhe von etwa 40 m über Grund. Diese Parameter wurden bewusst gewählt, um eine besonders präzise Objekterfassung mit hoher Punktdichte zu erzielen. Aufgrund der geringen Flughöhe und der engen Divergenz des Lasers betrug der Bodenschwellendurchmesser lediglich  $36 \times 12$  mm, was eine sehr feine Abbildung kleinräumiger Strukturen ermöglicht. Die Kombination aus niedriger Fluggeschwindigkeit, hoher Pulsrate und dichter Abtastung führte zu einer außergewöhnlich hohen durchschnittlichen Punktwolkendichte von 10.930 Punkten/m<sup>2</sup>. Der gesamte Scanvorgang des Gebiets dauerte rund 34 Minuten, wobei ein kurzer Akkuwechsel erforderlich war.

## 5.2 Datenauswertung

### 5.2.1 GNSS

Wie bereits in Kapitel 2 erläutert, berechnen terrestrische GNSS-Systeme ihre Positionskordinaten zunächst im globalen Bezugssystem ITRS, welche mithilfe von Korrekturdaten von einer Navigationslösung auf Zentimetergenauigkeit reduziert werden. Zusätzlich werden die ITRS-Koordinaten vom Korrekturservice – hier APOS – in den europäischen Bezugsrahmen ETRS89 transformiert und können in einer XCF-Datei als Längen- und Breitengrade ausgegeben werden. Da aufgrund der Klaffungen im österreichischen Festpunktfeld eine lokale Anfelderung

für Katastervermessungen unerlässlich ist, müssen diese ellipsoidischen Koordinaten dann nochmals einer lokalen Transformation ins österreichische Landeskoordinatensystem unterzogen werden. Im Zuge dieser Arbeit wurde hierfür die geodätischen Software rmGEO verwendet. Um Restverzerrungen zu minimieren, erfolgt diese zweite Transformation bewusst nur über einen kleinräumigen Bereich, welcher das Messgebiet umschließen muss. Abbildung 5.5a zeigt die Festpunkte, welche die Schottergrube umschließen und als Grundlage für die lokale Transformation dienen. Abbildung 5.5b veranschaulicht die 2-stufige Datumstransformation: In Stufe 1 erfolgt die globale 7-Parameter-Transformation, die bereits durch APOS automatisch bei der GNSS-Messung berücksichtigt wird. Die anschließende lokale Transformation wird in rmGEO mithilfe der bekannten ETRS89- und MGI-Koordinaten der ausgewählten Festpunkte berechnet. Als Ergebnis erhält man die lokalen Transformationsparameter, mit denen die gemessenen Punkte lage- und höhenmäßig präzise an das bestehende Festpunktfeld angepasst werden können.



(a) Verwendete Festpunkte

2 - Stufen Datumstransformation			
Verwendeter Referenzdienst:	APOS		
<b>Stufe 1: 7-Parameter Transformation Helmert 3D</b>			
<b>Globale Parameter:</b>			
Drehpunkt im alten System (X, Y, Z) (m)	0.000	0.000	0.000
Verschiebung (X, Y, Z) (m)	-577.326	-90.129	-463.919
Drehung (X, Y, Z) (cc)	15.85	4.55	16.35
Maßstab (ppm)	-2.4232		
<b>Stufe 2: lokale Transformation Helmert 2d + 1d Ebene</b>			
<b>Berechnete Parameter:</b>			
<b>Lage</b>			
Drehpunkt	-55756.344	347493.535	
Verschiebung (Y, X) (m)	0.132	0.104	
Drehung (cc)	-27.43		
Maßstab (ppm)	-0.99		
<b>Höhe</b>			
Ebenen-Neigung (cc)	-20.00	18.31	
Verschiebung (m)	-0.911		
Mittlerer Fehler einer Lage-Koordinate (m)	0.01		
Mittlerer Punktlagefehler (m)	0.02		

(b) Berechnete Transformationsparameter

Abb. 5.5: Datumstransformation zur lokalen Anfelderung

## 5.2.2 Netzausgleich

Um das Netz aus GNSS-Punkten zu optimieren, wurde sich mit der Totalstation auf einer Erhöhung in der Schottergrube stationiert und zu allen Punkten gemessen. Die Berechnung der freien Station, sowie die Verbesserung der umliegenden Netzpunkte wurde mit dem entwickelten MATLAB-Programm als freier Netzausgleich durchgeführt. Zusätzlich erfolgte auch eine Kontrolle mit rmGEO. Insgesamt trugen

32 Beobachtungen zur Bestimmung der Standpunktkoordinaten bei. Gleichzeitig konnte durch den Ausgleich die mittleren Lagegenauigkeiten der Messpunkte von mehreren Zentimetern auf wenige Millimeter gesteigert werden. Dadurch wurden geeignete Referenzkoordinaten für die Vergleiche mit den UAV-Messungen geschaffen. Der Netzplot in Abbildung 5.6 zeigt die Visuren der freien Station HP1 zu den Messpunkten.

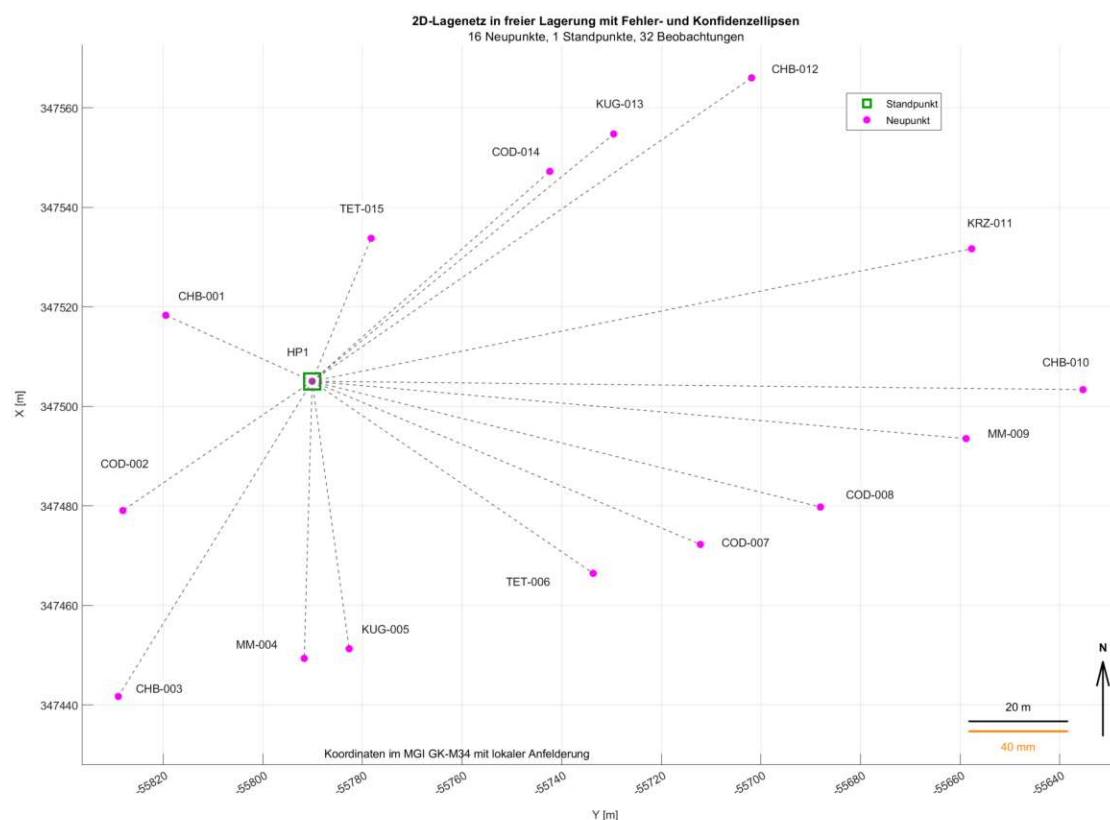


Abb. 5.6: Netzplot der Schottergrube nach dem Netzausgleich

### 5.2.3 UAV-LiDAR

Die Auswertung der UAV-basierten LiDAR-Daten erfolgte auf zwei unterschiedlichen Wegen, jeweils in mehreren strukturierten Arbeitsschritten unter Verwendung verschiedener Softwarelösungen. Da die Messungen mit einem UAV des Herstellers DJI stattfanden, wurde die Punktwolkenverarbeitung mit in der herstellereigenen Software DJI Terra durchgeführt. Für die RTK-Korrekturen der Drohnenplattform wurde, wie schon bei der terrestrischen GNSS-Messung im Feld, der Referenzdienst APOS verwendet. Dadurch lagen die GNSS-Positionsdaten bereits in korrigierter

Form im Bezugssystem ETRS89 mit ellipsoidischen Koordinaten (EPSG:4937) vor. Für die Referenzierung des Basispunktes ist daher in den Einstellungen von DJI Terra zwingend dieses Koordinatensystem zu wählen. Für die Punktwolke selbst kann hingegen ein beliebiges Ziel-Koordinatensystem über die entsprechende EPSG-Definition ausgewählt werden. Die Software führt in diesem Fall automatisch eine passende Koordinatentransformation durch. Alternativ besteht die Möglichkeit, auf Grundlage identischer Passpunktkoordinaten im Ausgangs- und Zielsystem eine benutzerdefinierte 7-Parameter-Transformation zu erstellen. Diese Methode wurde auch im Zuge dieses Auswertevorgangs verwendet, um eine direkte Transformation vom ETRS89 (EPSG:4937) in das Landeskoordinatensystem MGI mit lokaler Anfoderung durchzuführen. Hierfür wurden dieselben Festpunkte wie bereits zuvor im Abschnitt 5.2.1 verwendet. Wie Abbildung 5.7 zeigt, unterscheiden sich die in DJI Terra berechneten Transformationsparameter, bedingt durch die mathematische Umsetzung, von jenen in rmGEO, da in Terra eine vollständige 3D-Transformation, in rmGEO hingegen eine 2D-Helmert-Transformation mit separater Höhenverschiebung (2D+1D) angewendet wird.

Sieben-Parameter-Transformation								
Daten von Sieben Parameter berechnen								
Translation DX	-55756.1994512...	m	DY	347493.6177828...	m	DZ	-45.9833873031...	m
Eulerscher... WX	179.9987300002...	°	WY	-179.997633306...	°	WZ	179.4389790829...	°
Maßstabsf... K	1.000040955477...							

Abb. 5.7: Berechnete Transformationsparameter im DJI Terra

Abbildung 5.8 zeigt die in Terra prozessierte Punktwolke anhand ihrer Intensitätswerte. Diese wurde anschließend als LAS-File exportiert und in Leica Cyclone 3DR eingelesen. Dort wurden die relevanten Bereiche um die 3D-Targets extrahiert und als separate LAS-Dateien abgespeichert. Um diese zugeschnittenen Target-Punktwolken in den MATLAB-Ausgleichsprogrammen weiterverarbeiten und filtern zu können, mussten sie in Form von Koordinatenlisten mit Rückstreuintensitätswerten vorliegen. Da die Software CloudCompare einen Export im gewünschten ASCII-Format (Y, X, Z, Intensität) unterstützt, erfolgte die Konvertierung der LAS-Dateien mit diesem Programm. Auf Basis dieser Punktwolken konnten mithilfe der entwickelten Ausgleichsprogramme die gesuchten Koordinaten der 3D-Targets bestimmt werden. Die Punktkoordinaten der übrigen Targets wurden hingegen direkt in DJI Terra bestmöglich durch manuelle Auswahl in der Punktwolke bestimmt.

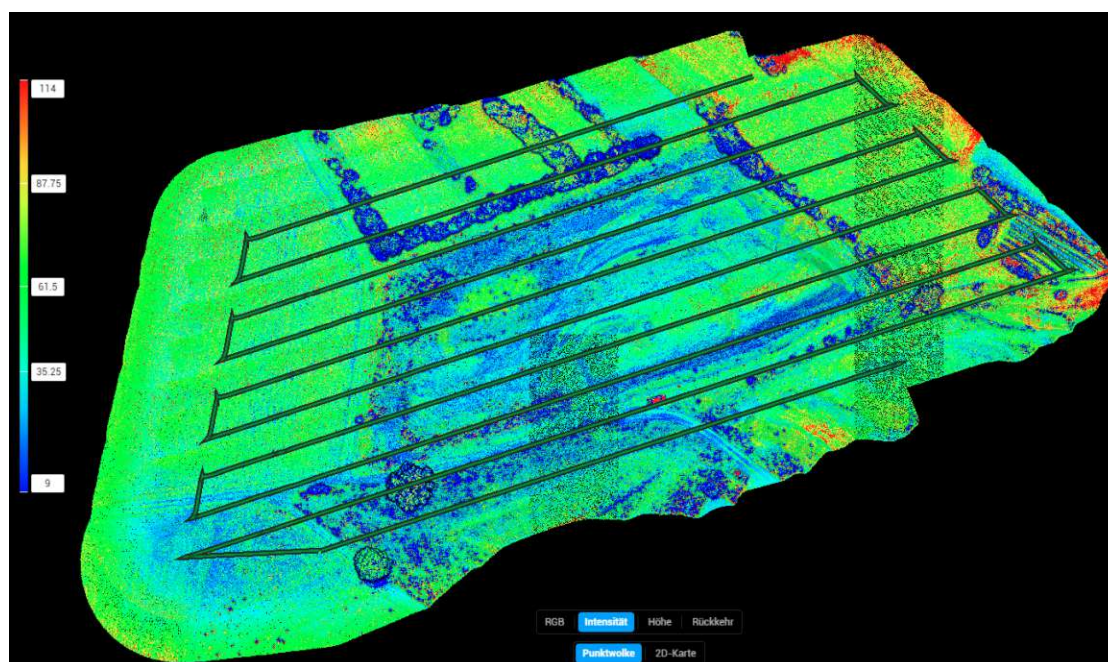


Abb. 5.8: LiDAR-Punktwolke der Schottergrube mit Intensitätsinformation

In einem zweiten Auswertungsvorgang wurde gezielt versucht, die in Abbildung 5.5b dargestellte ETRS89-zu-MGI-Transformation aus rmGEO für die Bestimmung der Grenzpunkte anzuwenden. Als Ausgabe-Koordinatensystem wurde in DJI Terra daher diesmal ETRS89 (EPSG:4937) gewählt, wodurch die erzeugten Punktkoordinaten in geografischer Form (Länge, Breite, ellipsoidische Höhe) vorlagen. Das exportierte LAS-File wurde anschließend in DJI Modify weiterverarbeitet, wo die relevanten Punktwolkenbereiche um die 3D-Targets mittels Klassifizierung separiert und als eigene LAS-Dateien abgespeichert wurden. Da beim Einlesen in CloudCompare Probleme mit der Dezimalgenauigkeit auftraten, musste ein kurzes MATLAB-Skript programmiert werden, das die LAS-Dateien ins von rmGEO lesbare ASCII-Format (Länge, Breite, Höhe, Intensität) überführt. Zusätzlich wurde das Skript um eine Funktion zur Intensitätsfilterung erweitert. Dies war notwendig, um die Punktzahl zu reduzieren, da die vollständigen Punktwolken für eine stabile Verarbeitung in rmGEO zu groß waren. Schlussendlich wurden etwa 1.000 Punkte pro Target im rmGEO eingelesen und mit der identen 2D + 1D Transformation vom elliptischen in den lokalen MGI-Rahmen überführt. Die transformierten Punktwolken der 3D-Targets wurden anschließend in den MATLAB-Ausgleichsprogrammen verarbeitet, wodurch erneut die gesuchten Grenzpunktkoordinaten bestimmt werden konnten. Die übrigen Targets wurden, wie bereits zuvor, durch manuelles Auswählen in DJI Terra bestimmt.

### 5.2.4 UAV-Photogrammetrie

Wie bereits in Kapitel 4.4 erwähnt, erfolgte die photogrammetrische Auswertung in Agisoft Metashape, in welcher nach dem Einlesen der L2-Bildaufnahmen zunächst ein inertialer Bündelblockausgleich berechnet wurde. Da es die Software nicht ermöglicht, lokale Transformationen für die Kamerapositionen zu importieren oder zu berechnen, wurde in einem ersten Auswertevorgang auf eine direkte Georeferenzierung im Rahmen des Bündelblockausgleichs verzichtet. Die Kamerakoordinaten konnten somit nur über die EPSG-Codes vom ETRS89 in das allgemeine MGI-GK-East (EPSG:31253) konvertiert werden. Um dennoch eine Georeferenzierung im lokal definierten MGI-System zu erhalten, wurden Bodenpasspunkte bei der Berechnung des Bündelblockausgleichs einbezogen. Gewählt wurden hierfür die vier Targets mit den Schachbrettmustern, da diese, wie Abbildung 5.9 anhand der Verknüpfungspunktswolke zeigt, das Gebiet räumlich gut abdecken. Die entsprechenden MGI-Koordinaten der Passpunkte wurden aus dem Netzausgleich übernommen. Über die automatisierte Mustererkennung konnten die Targets in den Bildern erkannt und korrekt mit den externen Koordinaten verknüpft werden.

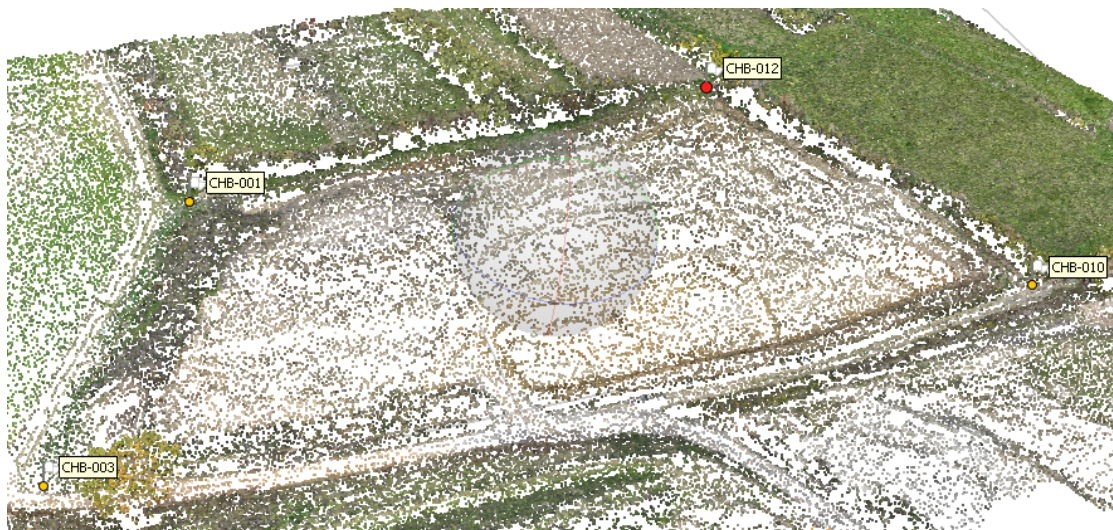


Abb. 5.9: Darstellung der Schottergrube anhand verwendeter Verknüpfungspunkte

Mithilfe der zugeordneten CHB-Targets als Bodenpasspunkte wurde anschließend der gezwängte Ausgleich durchgeführt. Im Anschluss des Bündelblockausgleichs wurde eine dichte Punktswolke berechnet und mithilfe der automatischen Markierung auch die codierten Targets im Bildmaterial identifiziert. Dies funktionierte bei den kleineren COD-Targets überraschend zuverlässig, während die Größeren nicht erkannt wurden, was womöglich am fehlenden weißen Rand dieser

Targets lag. Die Grenzpunktkoordinaten der 3D-Targets konnten, wie bereits bei der LiDAR-Auswertung, mithilfe der erstellten Punktwolke und den MATLAB-Ausgleichsprogrammen bestimmt werden. Alle anderen Targets wurden wieder manuell in der Punktwolke identifiziert und ausgewählt.

In einem zweiten Auswertevorgang konnte eine Methode umgesetzt werden, mit der der Bündelblockausgleich direkt georeferenziert im lokalen MGI-System berechnet werden konnte – ohne Verwendung zusätzlicher Passpunkte. Dies gelang, indem die Kamerapositionen zunächst im Agisoft von WGS84 nach ETRS89 konvertiert und als CSV-Datei exportiert wurden. Anschließend wurden die ETRS-Koordinaten im rmGEO mit der bereits bekannten ETRS-zu-MGI Transformation aus Abbildung 5.5b in das gewünschte Zielsystem überführt. Die ETRS-Kamerapositionen im Agisoft wurden dann wieder ins allgemeine MGI konvertiert und durch die im rmGEO lokal angepassten Kamerapositionen ersetzt. Nach einem ersten inertialen Ausgleich, konnte der anschließende Bündelblockausgleich, ohne Einbindung von Bodenpasspunkten, direkt im angefelderten MGI-Koordinatensystem durchgeführt werden. Die automatisierte Suche und Bestimmung der Tragetkoordinaten erfolgte analog zur vorherigen Vorgehensweise.

Target	RMS [px]		Projektionen	
	GCPs ✓	GCPs ✗	GCPs ✓	GCPs ✗
CHB-001	0.579	0.687	57	57
CHB-003	0.568	0.715	67	67
CHB-010	0.891	0.632	27	27
CHB-012	0.574	0.632	37	37
COD-002	0.364	0.607	44	44
COD-014	0.396	0.638	29	29

Tabelle 5.1: RMS und Projektionsanzahl der Passpunkte nach der Auswertung

Tabelle 5.1 zeigt für beide Auswerteverfahren die RMS-Werte der sechs automatisiert gefundenen Targets, also die durchschnittliche Abweichung zwischen der tatsächlichen Markierung und der rückprojizierten Position im Bild. Erstaunlicherweise sind die Werte auch bei ausschließlich direkter Georeferenzierung (Punkte also nur Kontrollpunkte) im Subpixelbereich, was auf eine hohe Übereinstimmung zwischen den Bildmarkierungen und den berechneten 3D-Positionen hinweist. Für die beiden gefundenen codierten Targets ist der Fehler bei beiden Auswerteverfahren ebenfalls überraschend geringer als bei den Schachbrett-Targets. Wie erwartet lieferte die automatische Suche für beide Verfahren dieselbe Anzahl an Projektionen, also die Anzahl, wie oft ein Target in unterschiedlichen Bildern erkannt und markiert wurde.

## 5.3 Ergebnisse und Vergleich

### 5.3.1 Koordinatendifferenzen

Tabelle 5.2 zeigt für alle Targets die lagemäßige Differenz  $\Delta_{yx}$  zu den Referenzkoordinaten, basierend auf den unterschiedlichen Mess- und Auswertemethoden. Die Abweichungen zur Netzmessung in der zweiten Spalte werden daher lediglich symbolisch dargestellt, da sie per Definition null sind. In der ersten Spalte sind die Lagedifferenzen zu den Ausgangskordinaten der GNSS-Messung angeführt. Diese Koordinaten wurden, wie bereits erwähnt, als Näherungswerte für den Netzausgleich verwendet, zeigen jedoch die größten Abweichungen gegenüber der Referenzlösung.

Pkt.-Nr.	GNSS	Netz MATLAB	UAV-LiDAR		UAV-Photo	
	rmGEO		rmGEO	Terra	GCPs ✓	GCPs ✗
CHB-001	20	0	23	26	0	<b>18</b>
COD-002	39	0	40	22	<b>13</b>	<b>33</b>
CHB-003	28	0	15	18	0	<b>21</b>
MM-004	38	0	34	11	23	39
KUG-005	36	0	<b>46</b>	<b>35</b>	<b>85</b>	<b>76</b>
TET-006	89	0	<b>44</b>	<b>33</b>	<b>24</b>	<b>36</b>
COD-007	16	0	20	34	19	27
COD-008	32	0	31	29	24	33
MM-009	50	0	48	59	12	41
CHB-010	58	0	53	58	0	<b>47</b>
KRZ-011	93	0	61	56	26	25
CHB-012	33	0	33	27	0	<b>16</b>
KUG-013	58	0	<b>40</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>44</b>
COD-014	35	0	36	33	<b>11</b>	<b>34</b>
TET-015	11	0	<b>2</b>	<b>9</b>	<b>36</b>	<b>39</b>

Tabelle 5.2: Koordinatendifferenzen  $\Delta_{yx}$  in *mm* nach der Auswertung

Etwas geringere Lagedifferenzen weisen hingegen die mittels UAV ermittelten Koordinaten auf. In der Tabelle wurden die vier 3D-Targets (KUG und TET), deren Koordinaten aus den LiDAR-Daten durch die mathematische Modellierung und Ausgleichung berechnet wurden, entsprechend hervorgehoben. Interessanterweise zeigen die Abweichungen dieser vier Targets bei der Auswertung mit der direkt in DJI Terra berechneten Transformation geringfügig bessere Ergebnisse als jene, die auf Basis der rmGEO-Transformation berechnet wurden. Dafür lassen sich zwei plausible Gründe nennen. Zum einen mussten im Fall der rmGEO-Transformation

die Punktwolken bereits vor dem Einlesen in das MATLAB-Ausgleichsprogramm aufgrund der Datengröße gefiltert werden. Die Target-Punktwolken welche aus der Terra-Transformation hervorgingen, konnten dagegen mit der kompletten Anzahl an Punkten in die Ausgleiche der Targets einfließen. Zum anderen könnten Rundungsdifferenzen eine Rolle gespielt haben. Beim Einlesen in rmGEO sind lediglich neun Nachkommastellen zulässig, wodurch die ellipsoidischen Koordinaten (Länge und Breite) entsprechend abgeschnitten wurden. Auch wenn diese Reduktion rechnerisch nur Abweichungen im Millimeterbereich bewirkt, kann sie dennoch die Präzision der daraus resultierenden Punktwolke leicht beeinträchtigen.

Für die photogrammetrische Auswertung wurden die vier 3D-Targets in den letzten beiden Spalte von Tabelle 5.2 ebenfalls hervorgehoben, da ihre Koordinaten, analog zur LiDAR-Auswertung, nach dem Bündelblockausgleich aus der erzeugten Punktwolke mithilfe der MATLAB-Ausgleichsprogramme berechnet wurden. Zusätzlich wurde die beiden kleineren codierten Targets auch für die erste Bündelblockausgleichung hervorgehoben, da diese Koordinaten automatisiert durch Agisoft Metashape ermittelt wurden. Beide weisen eine sehr geringe Differenz zu den Referenzkoordinaten auf, was vor allem auf die Einbindung der Bodenpasspunkte im Bündelblockausgleich zurückzuführen ist. Da die Schachbrett-Targets als Passpunkte verwendet wurden, weisen diese per Definition eine symbolische Abweichung von null auf. Die Lagedifferenzen der vier CHB-Targets, welche aus der direkt georeferenzierten Bündelblockausgleichung stammen, wurden dann ebenfalls hervorgehoben. Die Ergebnisse belegen, dass die automatisch erkannten COD-Targets ein mit den etablierten Checkerboards vergleichbares Präzisionsniveau erreichen.

Im Vergleich zu den LiDAR-Punktwolken zeigten die photogrammetrisch erzeugten Punktwolken eine deutlich höhere Punktstreuung und wirkten insgesamt verrauschter. Dennoch lieferten die anschließenden Ausgleichsergebnisse brauchbare Resultate. Dennoch zeigt die Koordinatendifferenz von KUG-005, dass die Auswertung der 3D-Targets bevorzugt auf Basis echter LiDAR-Punktwolken erfolgen sollte.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass alle vier UAV-Auswertungen insgesamt zufriedenstellende Ergebnisse lieferten. Besonders die 3D-Targets aus der LiDAR-Auswertung sowie die codierten Targets aus der photogrammetrischen Auswertung konnten mit Differenzen unterhalb der katasterrechtlich relevanten 5 cm-Grenze bestimmt werden – unabhängig von der Wahl der Georeferenzierung.

### 5.3.2 Erkenntnisse und Schwierigkeiten

Trotz der insgesamt zufriedenstellenden Ergebnisse traten im Auswerteprozess verschiedene Hindernisse auf, wodurch manche Arbeitsschritte aufwendig und umständlich durchgeführt werden mussten. Ein zentrales Problem zeigte sich im Umgang mit den notwendigen Koordinatentransformationen. Zwar lässt sich in Agisoft Metashape das Projekt-Koordinatensystem sehr einfach über EPSG-Codes wechseln, jedoch ist es nicht möglich, eine eigene Transformation für die Kamerapositionen zu berechnen oder zu importieren. Um eine direkte Georeferenzierung nach Katastervorgaben zu ermöglichen, ist der Weg über das Transformieren der Positionsdaten in einer anderen Software unumgänglich. Ein vergleichbares Problem zeigte sich bei der Auswertung der LiDAR-Punktwolken. Zwar bietet DJI Terra die Möglichkeit, auf Basis bekannter Festpunkte eine 7-Parameter-Transformation durchzuführen, jedoch können dort ebenfalls benutzerdefinierte Transformationen aus anderen Programmen nicht exakt übernommen oder nachgebildet werden. Da zum Beispiel das Transformationstool von rmGEO auf einem für Österreich optimierten Landesgrid basiert, wird dieses deutlich geeigneter für die Katastervermessungen sein, als jenes im DJI Terra. Umso überraschender ist daher, dass die Lagedifferenzen nach Anwendung der in Terra berechneten Transformation teils geringfügig besser ausfielen als jene aus der rmGEO-basierten Variante.

Eine weitere Quelle möglicher Fehler liegt in der Behandlung der Kamerapositionen selbst. Diese werden zu Beginn in das Agisoft-Projekt eingelesen und liegen aufgrund der RTK-Korrekturen über den österreichischen Referenzdienst APOS im europäischen Bezugssystem ETRS89 mit ellipsoidischen Koordinaten vor. DJI-Plattformen – ebenso wie viele andere UAV-Systeme – verwenden den von der RTK-Basis gelieferten Referenzrahmen zwar korrekt, kennzeichnen die Kamerapositionen in den EXIF-Bildmetadaten jedoch irreführend als WGS84. Beim Einlesen der Bilddaten in Metashape entsteht dadurch ein Labeling-Problem, da die Software die tatsächlich ETRS89-basierten Koordinaten fälschlicherweise als WGS84 interpretiert. Dieser Fehler kann in den Referenzeinstellungen zwar korrigiert werden, indem das Koordinatensystem über den passenden EPSG-Code gesetzt wird, es ist jedoch unbedingt darauf zu achten, diese Zuweisung nicht über das Konvertierungstool vorzunehmen, da sonst eine unerwünschte numerische Transformation ausgeführt würde, die zu systematischen Positionsverschiebungen führt.

Einen generellen Aufwand stellte die Notwendigkeit der vielen, unterschiedlichen Softwarelösungen dar, welche dennoch sehr oft durch eigene kleine Programmierungen ersetzt werden mussten. So war beispielsweise CloudCompare eine der wenigen verfügbaren Anwendungen, die es ermöglicht, Punktwolken inklusive Intensitätswerte im ASCII-Format zu exportieren. Allerdings rundet die Software beim Einlesen

von LAS-Dateien die Koordinaten automatisch auf eine begrenzte Anzahl von Dezimalstellen oder verlangt aus Datenspeichergründen eine Transformation in ein lokales System. Um diesen Effekten zu entgehen, wurde ein eigenes MATLAB-Skript entwickelt, welches die LAS-Punktwolken verlustfrei ein- und verlustfrei als ASCII-File ausliest. DJI Terra wiederum stellt die prozessierte Punktwolke sehr gut dar, sowohl mit kartesischen als auch ellipsoidischen Koordinaten, bietet jedoch keine Möglichkeit, einzelne Bereiche gezielt zuzuschneiden oder zu exportieren. Aus diesem Grund wurde zusätzlich die Software Leica Cyclone 3DR herangezogen, die über entsprechende Snipping-Werkzeuge verfügt. Diese kann jedoch nur mit kartesischen Koordinaten arbeiten und hatte Schwierigkeiten, größere Punktwolken vollständig zu laden. Daher wurden die LAS-Dateien meist nur in einzelnen Blöcken in 3DR eingelesen. Auch eine Testversion von DJI Modify wurde evaluiert. Diese unterstützt ellipsoidische Koordinaten, allerdings ist das Zuschneiden einzelner Bereiche ausschließlich über Klassifizierungsfiler realisierbar. Weitere getestete Softwarelösungen, darunter LasLook, QGIS und 3Dsurvey, konnten ebenfalls nur Teilfunktionen abdecken. Eine Software, die alle benötigten Funktionen vereint konnte nicht gefunden werden. Eine Anwendung zur ganzheitlichen Verarbeitung von LiDAR-Punktwolken wäre daher ein erheblicher Mehrwert und würde den zeitlichen Aufwand im Auswerteprozess deutlich reduzieren.

Auch bei den entwickelten 3D-Targets traten einige Schwierigkeiten auf. Die Kugel konnte bislang nur unter der Annahme ausgewertet werden, dass sie exakt horizontal montiert ist, eine Voraussetzung, die sich in der Praxis kaum verlässlich einhalten lässt. Bei den Pyramiden konnte die Verkippung über die Ebenennormalen der Seitenflächen gelöst werden. Für eine präzisere Auswertung soll für die nächsten Versuche dennoch die Erfassung der Neigung der Montagefläche mitgemessen werden. Darüber hinaus erwies sich die Herstellung der Pyramiden aus Massivholz als sehr aufwendig. Flachere Konstruktionen wären hinsichtlich der Rückstreuung vorteilhafter, ließen sich mit den vorhandenen Materialien jedoch nicht stabil genug umsetzen.

Ein weiteres Problem betraf die Farbwahl des Markierungsspray. Die in hellblau gefärbten Metallmarken waren auf den Bildern zwar gut sichtbar, reflektierten aber nur unzureichend Laserstrahlen, was die Rückstreuintensität negativ beeinflusste. Diese Daten, ebenso wie jene des Kreuz-Target, waren daher für die Auswertung kaum brauchbar. Für die weiteren Messversuche in den nachfolgenden Testgebieten wurde daher ein weißer Bodenmarkierungsspray angeschafft, der sowohl für die visuelle Erkennung als auch für die LiDAR-Rückstreuung geeigneter ist.

Die codierten Targets wurden in Agisoft Metashape insgesamt überraschend zuverlässig erkannt, obwohl sie laut Herstellerangaben eigentlich nur für kleinräumige

Anwendungen vorgesehen sind. Es zeigte sich jedoch, dass ein weißer Rand rund um die Marker für die automatische Erkennung durch die Software entscheidend ist. Targets ohne diesen kontraststärkenden Rand konnten nicht automatisiert detektiert werden. Logischerweise stellte sich auch die geringe Langlebigkeit dieser Targets als Nachteil heraus, da sich die aufgeklebten Papiermarker mit der Zeit von den Holzplatten lösten. Aus diesem Grund, und um die Herstellung der 3D-Targets zu verbessern, wurde ein 3D-Drucker angeschafft, mit dem die Targets robuster, präziser und langlebiger produziert wurden (siehe Kapitel 6.1.2).

# 6 Testgebiet: Güterweg

## 6.1 Datenerfassung

### 6.1.1 Testgebiet und Referenzmessung



Abb. 6.1: Güterweg und UAV-Targetbezeichnungen

Das zweite Messgebiet dieser Arbeit war ein Güterweg (Abbildung 6.1), der direkt an die im vorigen Kapitel beschriebene Schottergrube anschließt. Entlang des etwa 780 Meter langen Wegabschnitts wurden die UAV-Targets in regelmäßigen Abständen aufgelegt. Ziel war es, in mehreren Versuchsreihen mehrfach einen einheitlichen, linearen Flug über den gesamten Güterweg mit unterschiedliche UAV-Konfigurationen durchzuführen und deren Einfluss auf die Einzelpunktbestimmungen zu analysieren. Im Gegensatz zum ersten Testgebiet erfolgte keine dauerhafte Vermarkung der Targets, sondern eine temporäre Auslegung für den Messzweck. Die Befliegungen fanden am 18. 09. 2025 bei sonnigem, jedoch stark windigem Wetter statt. Windböen bis zu 23 km/h stellten dabei insbesondere für die Stabilisierung der UAV-Plattform eine zusätzliche Herausforderung dar.

### 6.1.2 UAV-Targets

Wie bereits in Kapitel 5.3.2 erwähnt, wurden die UAV-Targets weiter optimiert und im 3D-Druckverfahren gefertigt. Dies betraf sowohl die photogrammetrischen COD-Targets als auch die Kugel- und Pyramiden-Targets. Der Druck erfolgte mit weißem und schwarzem ABS-Filament (Acrylnitril-Butadien-Styrol), einem witterungsbeständigen, thermoplastischen Kunststoff. Dadurch sind die Targets exakt reproduzierbar, langlebig und ideal für den Außeneinsatz angepasst.

Abbildung 6.2 zeigt eines der codierten Targets, welches im 3D-Druck hergestellt wurde. Es besteht aus vier Einzelementen, die über ein präzises Stecksystem passgenau zusammengesetzt werden können. Bei der Konstruktion wurde außerdem darauf geachtet, dass die weißen Ränder der Targets ausreichend breit ausgeführt sind, um eine zuverlässige automatische Erkennung in Agisoft Metashape zu gewährleisten.

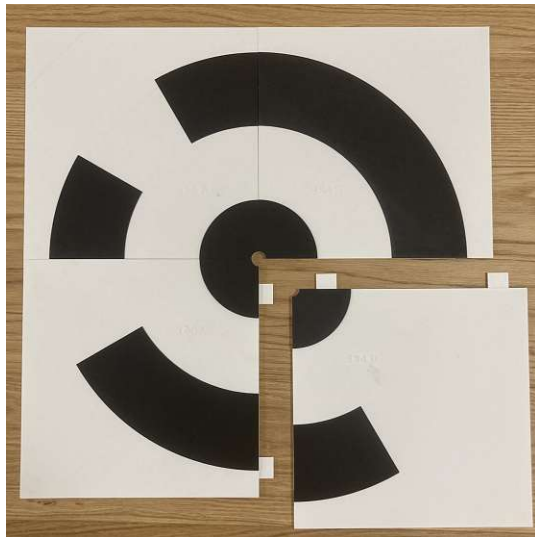


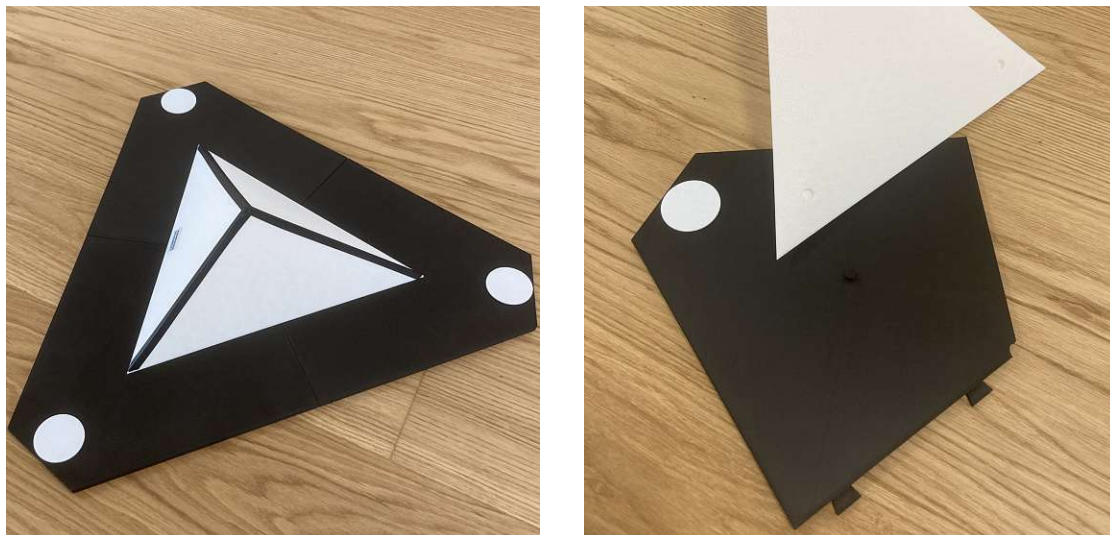
Abb. 6.2: COD-Target aus 3D-Druck



Abb. 6.3: Kugel-Target aus 3D-Druck

Bei den Kugel-Targets galt es, das Problem der möglichen Verkippung zu lösen, die bei Nicht-Horizontierung der Vollkugeln auftreten kann. Daher wurde eine Halbkugel mit einem Durchmesser von 30 cm im 3D-Druckverfahren gefertigt. Über passende Noppen lässt sich die Halbkugel präzise auf der schwarzen Grundplatte zentrieren und fixieren. Der wesentliche Vorteil dieser Bauform liegt in der direkten Verbindung zwischen Halbkugel und Bodenplatte, wodurch eine Verkippung vollständig ausgeschlossen wird. Der berechnete Kugelmittelpunkt entspricht somit stets exakt dem gesuchten Punkt über der Vermarkung. Abbildung 6.3 zeigt die Halbkugel mit der schwarzen Grundplatte.

Weiters wurden auch neue Pyramiden-Targets im 3D-Druckverfahren hergestellt. Da der verwendete 3D-Drucker eine maximale Druckgröße von  $35 \times 32 \times 32$  cm erlaubt, wurde für den ersten Modellversuch eine Pyramide mit der größtmöglichen Grundseitenlänge von 35 cm und einer Höhe von 8,75 cm konstruiert. Dies entspricht einem Verhältnis von 4 : 1, wodurch jede Seitenfläche der Pyramide einen Steigungswinkel von etwa  $41^\circ$  aufweist. Die schwarze, dreiteilige Grundplatte kann über ein Stecksystem verbunden werden und die Pyramide mithilfe eines Noppensystems auf der Grundplatte fixiert werden, wodurch stets eine stabile Positionierung gewährleistet ist (Abbildung 6.4b). Über ein kleines Loch in der Mitte der Grundplatte, kann das Target gegebenenfalls wieder exakt über vermarkten Punkten montiert werden. An den Ecken der dreiecksförmigen Grundplatte wurden zusätzlich kleine weiße Punkte mitgedruckt, welche zur Kontrolle einer möglichen Verkipfung dienen. Zusätzlich sollen die weißen Punkte die manuelle Bestimmung der Kanten-Richtungspunkte in der LiDAR-Punktwolke erleichtern, welche für die MATLAB-Ausgleichung benötigt werden. Es wurden zwei Pyramiden-Targets dieser Bauart gefertigt, wobei eines davon in Abbildung 6.4a zu sehen ist.



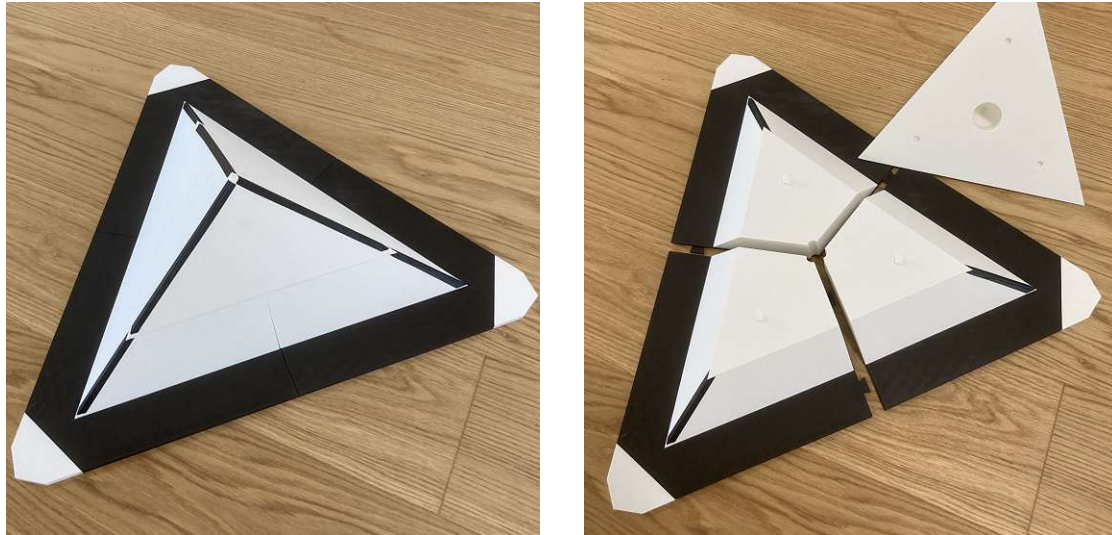
(a) Zusammengesetztes Target

(b) Steck,- und Noppensystem

Abb. 6.4: 4-teiliges Pyramiden-Target aus dem 3D-Drucker

Da die 3D-Druck-Pyramiden mit der Grundseitenlänge von 35 cm gegenüber den hölzernen Modellen relativ klein sind, wurde eine erweiterte Version entwickelt. Das Pyramidenmodell wurde auf eine Seitenlänge von 49,5 cm und eine Höhe von 16,5 cm vergrößert, was einem Verhältnis von 3 : 1 entspricht und den Steigungswinkel der Seitenflächen auf etwa  $49^\circ$  erhöht. Da diese Abmessungen die maximal mögliche Druckgröße des 3D-Druckers überschreiten, wurde das Modell in vier Segmente

unterteilt. Die obere Hälfte der Pyramide, also die Spitze, wurde separat gedruckt, während die untere Hälfte in drei Abschnitte geteilt und gemeinsam mit den Grundplattenteilen gefertigt wurde. Das Steck- und Noppensystem blieb dabei unverändert. Durch die Vergrößerung der Pyramide wurden anstelle der weißen Punkte auf der schwarzen Grundplatte, einfach die Ecken der Platte mit weißem Filament gedruckt. Abbildung 6.4 zeigt in (a) das vollständige Target und in (b) die Einzelteile bestehend aus erweiterter Grundplatte und Pyramidenspitze.



(a) Zusammengesetztes Target

(b) Steck,- und Noppensystem

Abb. 6.5: Erweitertes 4-teiliges Pyramiden-Target aus dem 3D-Drucker

Neben den im 3D-Druck gefertigten Modellen wurden auch die bereits bestehenden UAV-Targets weiterverwendet. Zusätzlich wurden jeweils eine der beiden Vollkugeln sowie eine der hölzernen Pyramiden vollständig mit weißem Bodenmarkierungsspray beschichtet. Dieser Versuch diente dem späteren Vergleich, welches der Targets – mit oder ohne Beschichtung – eine höhere Rückstreuintensität aufweist.

### 6.1.3 UAV-Konfigurationen

Für die Messversuche entlang des rund 780 m langen Güterwegs wurden drei verschiedene Flughöhen (47 m, 62 m und 77 m) mit drei unterschiedlichen Flugeschwindigkeiten (3 m/s, 6 m/s und 9 m/s) kombiniert. Es ergaben sich somit neun verschiedene Flugkonfigurationen beziehungsweise Messversuche, die allesamt mit der Zenmuse L2 durchgeführt wurden. Für die photogrammetrischen Messungen mit der Zenmuse P1 wurden anschließend nur die Flüge VII bis IX wiederholt, also jene mit der höchsten Flugeschwindigkeit von 9 m/s. Der Grund dafür lag einerseits

in der begrenzten Akkukapazität, andererseits wurde vorweg angenommen, dass bei photogrammetrischen Aufnahmen die Flughöhe einen stärkeren Einfluss auf die Genauigkeit hat als die Fluggeschwindigkeit. Tabelle 6.1 fasst die verwendeten Parameter der einzelnen Befliegungen einschließlich der jeweiligen Flugnummern übersichtlich zusammen.

Flug-Konfigurationen		Flugnummer								
Definition	Einheit	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Länge	[m]	780	780	780	780	780	780	780	780	780
Geschw.	[m/s]	3	3	3	6	6	6	9	9	9
Höhe	[m]	47	62	77	47	62	77	47	62	77
Dauer	[min:sek]	06:20	06:20	06:20	04:25	04:25	04:25	03:45	03:45	03:45
Pkt/m <sup>2</sup>	Anzahl	1200	900	700	780	560	440	620	450	160
Fotos	Anzahl	174	131	113	193	149	121	221	170	137

Tabelle 6.1: Flugkonfigurationen und Kennwerte der einzelnen Flüge

Tabelle 6.1 enthält zusätzlich auch die ungefähre Flugdauer in Minuten und Sekunden sowie den jeweiligen Flugpfad. Darüber hinaus wird hier bereits ein Ausblick auf die Datenauswertung gegeben. Neben den Flugdaten sind auch die durchschnittliche Punktdichte der LiDAR-Aufnahmen (in Punkten pro Quadratmeter) sowie die Anzahl der verfügbaren Fotos aus der photogrammetrischen Befliegung angeführt, wobei für die Flüge I bis VI die Fotoanzahl der L2-Kamera angegeben wurde. Es zeigt sich deutlich, dass mit zunehmender Flughöhe und höherer Fluggeschwindigkeit die Punktdichte in der LiDAR-Punktswolke abnimmt. Die Anzahl der aufgenommenen Fotos hingegen steigt mit höherer Geschwindigkeit, sinkt aber mit zunehmender Flughöhe.

## 6.2 Datenauswertung

### 6.2.1 GNSS

Da der Güterweg unmittelbar an das Messgebiet aus Kapitel 5 angrenzt, konnten die berechneten Parameter der rmGEO-Transformation aus Abbildung 5.5b auch für dieses Messgebiet zur lokalen Anfelderung an das Festpunktnetz verwendet werden. Da bei der GNSS-Messung der 16 vermarkten Punkte auf eine möglichst lange Messdauer mit stabilen PDOP-Werten geachtet wurde, lagen die mittleren Lagegenauigkeiten der Punkte bereits im Bereich von etwa 1–2 cm.

## 6.2.2 Netzausgleich

Auf Grundlage der berechneten GNSS-Näherungskoodinaten wurde mit den insgesamt 46 Beobachtungen der terrestrischen Netzmessung ein freier Netzausgleich (Abbildung 6.6) unter Verwendung des eigens entwickelten MATLAB-Programms durchgeführt. Durch den Ausgleich wurden die beiden Standpunktkoordinaten inklusive ihrer Orientierung bestimmt, sowie die mittleren Punktlagegenauigkeiten der Messpunkte auf wenige Millimeter reduziert. Diese präzisen Koordinaten dienen wiederum als Referenzgrundlage für den Vergleich mit den UAV-Messungen.

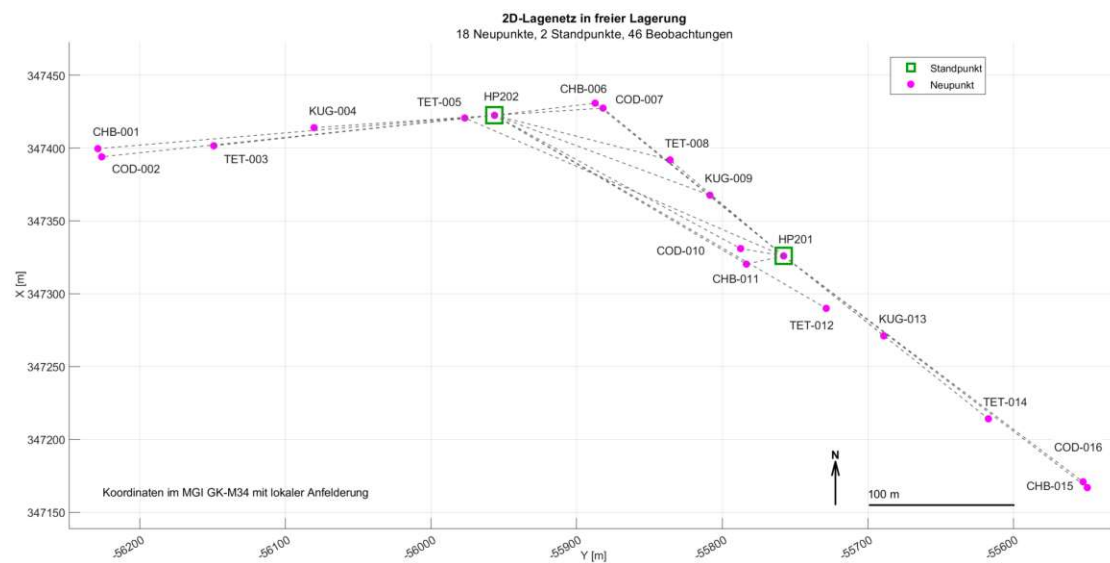


Abb. 6.6: Netzplot des Güterweges nach dem Netzausgleich

## 6.2.3 UAV-LiDAR

Die Auswertung der LiDAR-Messungen erfolgte, wie bereits in Kapitel 5.2.3 beschrieben, auf zwei unterschiedlichen Wegen. Einerseits wurde direkt in DJI Terra eine 7-Parameter-Transformation angewendet, um die Punktwolke in den lokalen MGI-Rahmen zu überführen. Andererseits erfolgte eine zweite Auswertung mithilfe der bereits bekannten ETRS-zu-MGI-Transformation (Abbildung 5.5b). Dazu wurden die zugeschnittenen ETRS-Target-Punktwolken in rmGEO eingelesen und in das lokale MGI-Koordinatensystem transformiert. Da die LiDAR-Daten der neun Flüge auf beiden Wegen verarbeitet wurden, ergaben sich insgesamt 18 prozessierte Punktwolken. Aus diesen wurden die einzelnen Target-Punktwolken ausgeschnitten und anschließend mit den eigens entwickelten MATLAB-Ausgleichsprogrammen ausgewertet.

Für die Berechnung der Targetkoordinaten kamen zusätzlich sechs verschiedene Intensitätsfilterstufen zum Einsatz, um den Einfluss der LiDAR-Rückstreuwerte auf die Bestimmung der Targets zu analysieren. Insgesamt resultierten daraus 108 berechnete Koordinatenpaare pro Target, die anschließend mit den Referenzmessungen verglichen wurden.

Abbildung 6.7 zeigt den ausgewerteten linearen Flug mit der Flugnummer I, der mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s und einer Flughöhe von 47 m durchgeführt wurde. Die Darstellung basiert auf den RGB-Informationen der integrierten 2-Megapixel-Kamera der Zennuse L2 und verdeutlicht das gleichmäßige Abtastmuster entlang des Flugpfads.



Abb. 6.7: Prozessierte LiDAR-Punktwolke des Güterweges mit RGB-Information

#### 6.2.4 UAV-Photogrammetrie

Auch die photogrammetrische Auswertung wurde auf den zwei bereits vorgestellten Wegen durchgeführt. Grundlage beider Varianten war wieder ein inertialer Bündelblockausgleich. Anschließend erfolgte ein Ausgleich unter Einbezug von Bodenpasspunkten, wobei die Referenzlösungen aus dem terrestrischen Netzausgleich herangezogen wurden. Zur Bestimmung der COD-Targets wurden dabei die CHB-Targets als Zwangspunkte verwendet und umgekehrt. In der zweiten Variante wurde die direkte Georeferenzierung, also eine Berechnung ohne Bodenpasspunkte, angewendet. Der Ablauf entsprach dabei jenem, der bereits in Kapitel 5.2.4 beschrieben wurde. Da die Flüge ausschließlich mit einer Geschwindigkeit von 9 m/s durchgeführt wurden, mussten insgesamt deutlich weniger Koordinatendifferenzen pro Target berechnet werden. In Kombination mit den beiden unterschiedlichen Berechnungsarten, einmal mit und einmal ohne Bodenpasspunkte, ergaben sich insgesamt 24 Koordinatenbestimmungen pro Target.

Abbildung 6.8 zeigt eine Darstellung der rund 230.000 automatisch erkannten Verknüpfungspunkten, welche zuvor anhand ihrer Qualität gefiltert wurden und speziell der Berechnung des inertialen Bündelblockausgleichs dienen. Ebenfalls sichtbar sind die acht Positionen der photogrammetrischen Targets, die in dieser Messreihe jedoch nur fünf bis acht Projektionen pro Target aufweisen. Ursache dafür ist der rein lineare Flugpfad, bei dem keine Querüberlappung der Bildaufnahmen vorlag. Dadurch konnten die Targets nur in wenigen Einzelbildern gleichzeitig erfasst werden, was die Stabilität und Qualität der Ausgleichungen deutlich reduziert.



Abb. 6.8: Darstellung des Güterwegs anhand verwendeter Verknüpfungspunkte

## 6.3 Ergebnisse und Vergleich

### 6.3.1 Koordinatendifferenzen: UAV-LiDAR

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die lagemäßigen Differenzen zwischen den insgesamt 108 berechneten Koordinatenpaaren und den jeweiligen Referenzkoordinaten des zugehörigen LiDAR-Targets. Die Abweichungen ergeben sich dabei in Abhängigkeit von der jeweiligen Höhe eines Fluges, der in der Berechnung verwendeten Transformationsmethode sowie den gewählten Intensitätsfiltern bei der Ausgleichung. Zur besseren Übersicht wurden die Tabellenzellen farblich codiert. Lagedifferenzen unter 35 mm sind grün markiert, Werte bis 45 mm erscheinen gelb und deuten auf geringfügige Unsicherheiten hin, während Differenzen bis 55 mm orange eingefärbt sind und bereits als kritisch einzustufen sind. Ergebnisse, die den katasterteknischen Grenzwert von 5 cm klar überschreiten beziehungsweise größer als 55 mm sind, werden rot dargestellt. Konnte für eine bestimmte Flugkonfiguration oder Filterstufe keine Koordinate berechnet werden, wurde die entsprechende Tabellenzelle grau eingefärbt.

Tabelle 6.2 zeigt die lagemäßigen Differenzen  $\Delta_{yx}$  des Pyramiden-Targets TET-003 gegenüber den Referenzkoordinaten. Es handelt sich um eine der hölzernen Pyramiden, welche vollständig mit weißem Bodenmarkierungsspray besprüht wurde. Die berechneten Koordinatenabweichungen liegen bei nahezu allen Auswertungen unter 5 cm und zeigen damit eine hohe Übereinstimmung mit der Referenzmessung. Erst bei sehr hoher Intensitätsfilterung, Fluggeschwindigkeit und Flughöhe konnte das Target nicht mehr berechnet werden, da zu wenige gültige Punkte auf der Targetoberfläche verblieben.

TET-003 (64 x 26 cm)				Differenz $\Delta_{yx}$ [mm] zu den Referenzkoordinaten					
Trafo	Flug	[m/s]	H[m]	I>2000	I>4000	I>6000	I>8000	I>10000	I>12000
rmGeo	I	3	47	22	19	21	21	21	18
Terra	I	3	47	25	23	21	23	23	24
rmGeo	II	3	62	11	12	11	12	9	8
Terra	II	3	62	12	11	12	9	9	8
rmGeo	III	3	77	12	12	9	11	16	1
Terra	III	3	77	11	9	8	10	8	18
rmGeo	IV	6	47	23	24	29	19	16	6
Terra	IV	6	47	25	26	25	23	17	15
rmGeo	V	6	62	20	15	19	17	16	23
Terra	V	6	62	17	17	21	20	13	19
rmGeo	VI	6	77	2	2	6	6	18	6
Terra	VI	6	77	5	8	5	13	9	12
rmGeo	VII	9	47	8	9	10	12	13	13
Terra	VII	9	47	8	8	11	12	9	12
rmGeo	VIII	9	62	30	31	33	33	32	31
Terra	VIII	9	62	30	29	33	42	29	30
rmGeo	IX	9	77	22	22	31	11		
Terra	IX	9	77	28	28	46	4		

Tabelle 6.2: Lagedifferenz  $\Delta_{yx}$  in mm zur Referenzmessung für Punkt TET-003 in Abhängigkeit von Flug, Transformation und Intensität-Filter

Die Tabellen 6.3 und 6.4 zeigen die lagemäßigen Differenzen zu den entsprechenden Referenzkoordinaten der Pyramiden-Targets TET-005 und TET-008. Dabei handelt es sich um die kleineren, im 3D-Druck hergestellten Pyramiden-Targets. Wie aus den Tabellen deutlich hervorgeht, konnten diese Targets generell nur bei sehr geringer Flughöhe bestimmt werden. Bei größeren Flughöhen und stark gefilterten Punktwolken gingen zu viele Messpunkte verloren, wodurch keine stabile Berechnung der Targetposition mehr möglich war.

TET-005 (35 x 9 cm)				Differenz $\Delta_{yx}$ [mm] zu den Referenzkoordinaten					
Trafo	Flug	[m/s]	H[m]	I>2000	I>4000	I>6000	I>8000	I>10000	I>12000
rmGeo	I	3	47	54	49	57	45		
Terra	I	3	47	66	69	53	39		
rmGeo	II	3	62						
Terra	II	3	62	34	54	55			
rmGeo	III	3	77	16	16	11	20		
Terra	III	3	77	17	17	11	20		
rmGeo	IV	6	47	31	17	14	13		
Terra	IV	6	47	27	13	27	30		
rmGeo	V	6	62	34	32	57			
Terra	V	6	62	38	42	50			
rmGeo	VI	6	77	29	34	8	28		
Terra	VI	6	77	30	36	31	33		
rmGeo	VII	9	47	76	82	81	70		
Terra	VII	9	47	81	83	84	78		
rmGeo	VIII	9	62						
Terra	VIII	9	62						
rmGeo	IX	9	77						
Terra	IX	9	77						

Tabelle 6.3: Lagedifferenz  $\Delta_{yx}$  in *mm* zur Referenzmessung für Punkt TET-005 in Abhängigkeit von Flug, Transformation und Intensität-Filter

TET-008 (35 x 9 cm)				Differenz $\Delta_{yx}$ [mm] zu den Referenzkoordinaten					
Trafo	Flug	[m/s]	H[m]	I>2000	I>4000	I>6000	I>8000	I>10000	I>12000
rmGeo	I	3	47	1	1	2	2		
Terra	I	3	47	13	13	12	20		
rmGeo	II	3	62	174	174				
Terra	II	3	62	187	187	163			
rmGeo	III	3	77						
Terra	III	3	77						
rmGeo	IV	6	47	27	27	22	23		
Terra	IV	6	47	16	16	28	24		
rmGeo	V	6	62	312	312				
Terra	V	6	62	33	33				
rmGeo	VI	6	77	34	34	33	153		
Terra	VI	6	77	71	71	34	172		
rmGeo	VII	9	47	551	551	383	469		
Terra	VII	9	47						
rmGeo	VIII	9	62	153	153				
Terra	VIII	9	62						
rmGeo	IX	9	77						
Terra	IX	9	77						

Tabelle 6.4: Lagedifferenz  $\Delta_{yx}$  in *mm* zur Referenzmessung für Punkt TET-008 in Abhängigkeit von Flug, Transformation und Intensität-Filter

Tabelle 6.5 zeigt die Differenzen zum größeren, im 3D-Druck gefertigten Pyramiden-Target TET-012. Die Abweichungen zu den Referenzkoordinaten fallen hierbei bereits deutlich geringer aus als bei den kleineren Targets. Für die ersten sechs Flüge mit Fluggeschwindigkeiten von 3 m/s und 6 m/s konnten in allen Flughöhen lagemäßige Abweichungen unter 5 cm erzielt werden. Erst bei den Flügen mit der höchsten Geschwindigkeit traten größere Probleme in der Berechnung auf. Bei maximaler Flughöhe und Geschwindigkeit konnte für keine Intensitätsfilterstufe mehr eine stabile Koordinatenlösung bestimmt werden.

TET-012 (50 x 17 cm)				Differenz $\Delta_{yx}$ [mm] zu den Referenzkoordinaten					
Trafo	Flug	[m/s]	H[m]	I>2000	I>4000	I>6000	I>8000	I>10000	I>12000
rmGeo	I	3	47	11	10	9	9	14	13
Terra	I	3	47	18	21	17	21	21	22
rmGeo	II	3	62	25	18	23	29	33	28
Terra	II	3	62	19	20	28	34	30	35
rmGeo	III	3	77	18	20	29	22	21	47
Terra	III	3	77	15	21	15	17	11	45
rmGeo	IV	6	47	17	20	18	19	21	23
Terra	IV	6	47	14	19	14	14	19	23
rmGeo	V	6	62	15	15	15	3	25	27
Terra	V	6	62	10	9	4	11	15	29
rmGeo	VI	6	77	31	37	38	45	24	40
Terra	VI	6	77	27	26	44	45	24	38
rmGeo	VII	9	47	49	73	51	34	37	29
Terra	VII	9	47	40	31	59	30	33	32
rmGeo	VIII	9	62	55	77	49	84	51	91
Terra	VIII	9	62	55	68	76	88	49	72
rmGeo	IX	9	77						
Terra	IX	9	77						

Tabelle 6.5: Lagedifferenz  $\Delta_{yx}$  in mm zur Referenzmessung für Punkt TET-012 in Abhängigkeit von Flug, Transformation und Intensität-Filter

Das letzte im Zuge der Messungen erfasste Pyramiden-Target war TET-014, die zweite aus Holz gefertigte Pyramide mit einer Seitenlänge von 64 cm. Tabelle 6.6 zeigt die lagemäßigen Differenzen dieses Targets, die im Vergleich zur gleich großen Pyramide TET-003 aus Tabelle 6.2 etwas schlechter ausfallen. Dies ist sehr eindeutig auf den weißen Markierspray rückzuführen, mit dem das TET-003 besprüht wurde. Der Spray hatte zu einer deutlichen Verbesserung der Rückstreuung beigetragen, wodurch auch insgesamt die Differenzen zur Referenzkoordinate deutlich geringer ausfielen. Dennoch sind auch diese Ergebnisse weitestgehend zufriedenstellend, da bei allen Messungen mit niedriger Fluggeschwindigkeit die Abweichungen wieder unter der 5 cm-Grenze liegen. Erst bei höheren Geschwindigkeiten traten, ähnlich wie bei TET-012, deutlich größere Abweichungen auf.

TET-014 (64 x 26 cm)				Differenz $\Delta_{yx}$ [mm] zu den Referenzkoordinaten					
Trafo	Flug	[m/s]	H[m]	I>2000	I>4000	I>6000	I>8000	I>10000	I>12000
rmGeo	I	3	47	19	20	20	22	20	21
Terra	I	3	47	27	28	28	28	30	28
rmGeo	II	3	62	18	20	19	19	18	17
Terra	II	3	62	19	18	20	18	30	16
rmGeo	III	3	77	38	38	37	38	36	40
Terra	III	3	77	41	44	37	33	38	36
rmGeo	IV	6	47	19	21	22	22	22	21
Terra	IV	6	47	21	22	21	21	21	19
rmGeo	V	6	62	34	34	34	31	33	26
Terra	V	6	62	34	34	35	32	21	29
rmGeo	VI	6	77	39	39	40	33	36	45
Terra	VI	6	77	35	35	37	34	42	43
rmGeo	VII	9	47	19	19	21	21	22	21
Terra	VII	9	47	19	21	21	21	21	23
rmGeo	VIII	9	62	64	64	60	58	58	80
Terra	VIII	9	62	61	61	63	54	76	83
rmGeo	IX	9	77	45	45	55	60		
Terra	IX	9	77	54	54	36			

Tabelle 6.6: Lagedifferenz  $\Delta_{yx}$  in mm zur Referenzmessung für Punkt TET-014 in Abhängigkeit von Flug, Transformation und Intensität-Filter

Mithilfe der Abbildung 6.9 wurden die Ergebnisse der Pyramiden-Targets zusammengeführt und vergleichend dargestellt. Dazu wurden die berechneten Lagedifferenzen der drei größeren Pyramiden-Targets gemittelt und in einem Liniendiagramm visualisiert. Die Darstellung zeigt klar den Trend zunehmender Abweichungen mit steigender Flughöhe und Fluggeschwindigkeit – wobei die Geschwindigkeit etwas stärkeren Einfluss hat. Bei den Berechnungen der Targets bei der niedrigsten Flughöhenstufe von 47 m liegen die Differenzen unabhängig von der Fluggeschwindigkeit durchschnittlich stets unter drei Zentimetern. Bei der mittleren Flughöhe von 62 m wird der Einfluss der Fluggeschwindigkeit deutlicher. Nur bei einer Geschwindigkeit von 9 m/s konnten die Targets nicht mehr stabil unterhalb der 5 cm-Grenze bestimmt werden. Diese Tendenz zeigt sich bei der größten Flughöhe von 77 m noch ausgeprägter. Dennoch wurden selbst in dieser Höhe bei geringeren Geschwindigkeiten von 3 m/s und 6 m/s noch sehr gute Ergebnisse mit durchschnittlichen Lagedifferenzen von maximal 3 Zentimetern erzielt. Die Intensitätsfilterung hatte im Vergleich dazu einen geringeren Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Wichtig ist jedoch, dass der Filterwert weder zu niedrig noch zu hoch gewählt wird. Ist die Grenze zu niedrig, könnten störende Ausreißer in der Punktwolke erhalten bleiben. Wird die Grenze hingegen zu streng gesetzt, stehen zu wenige Punkte für den Ausgleich zur Verfügung, wodurch eine Koordinatenbestimmung nicht mehr möglich ist.

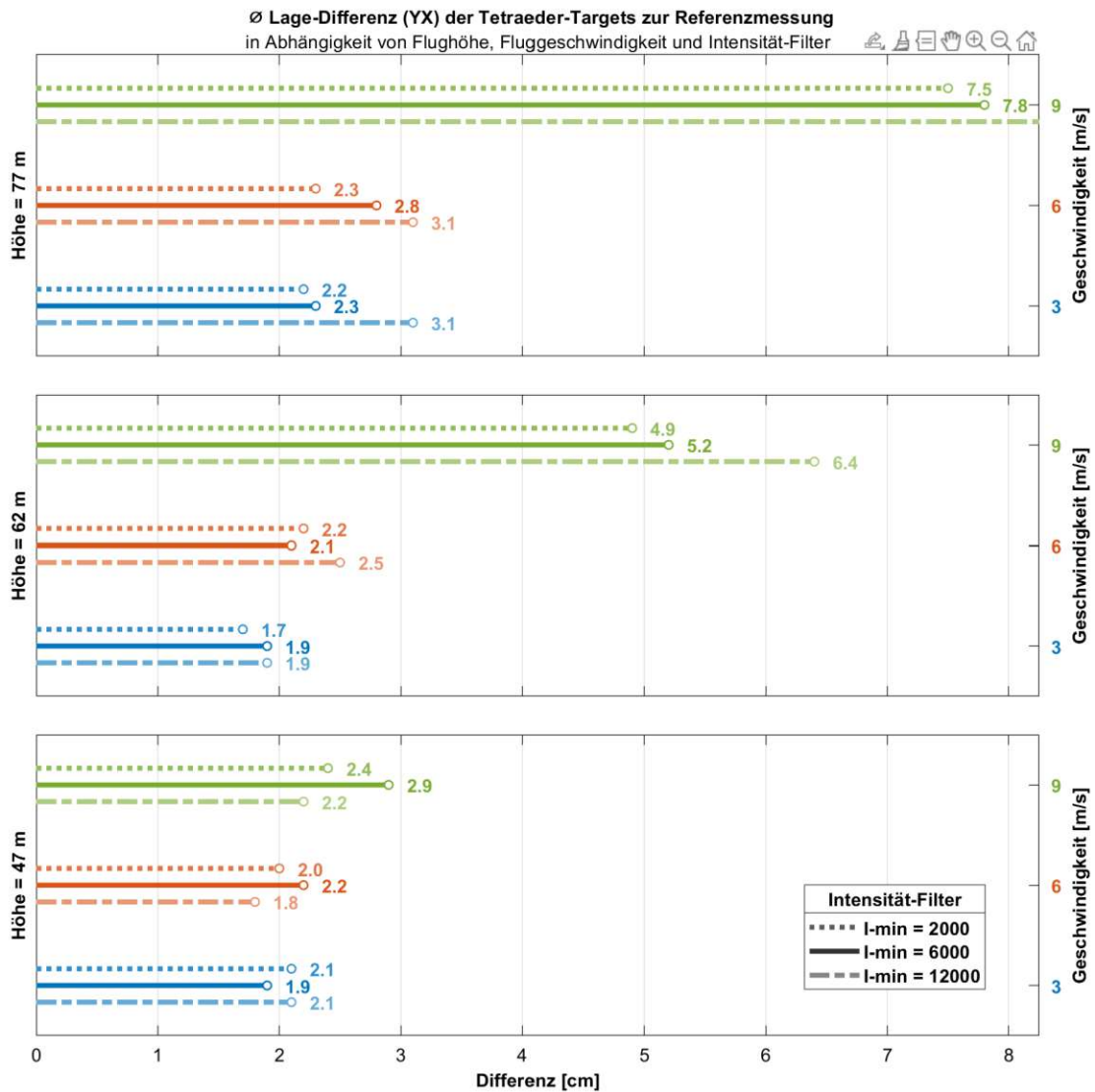


Abb. 6.9: Durchschnittliche Lagedifferenz  $\Delta_{yx}$  in *cm* der Pyramiden-Targets in Abhängigkeit von Flug, Transformation und Intensität-Filter

Für die Auswertung der Kugel-Targets wurde auf die höchste Intensitätsfilterstufe verzichtet, da sich bereits früh zeigte, dass bei einem Filterwert von 12000 kaum mehr genügend Punkte für eine Koordinatenberechnung vorhanden waren. Für jede Kugel wurden daher maximal 90 Koordinatendifferenzen zu den jeweiligen Referenzkoordinaten des entsprechenden Targets berechnet.

Tabelle 6.7 zeigt die lagemäßigen Abweichungen des Kugel-Targets KUG-004 zu den Referenzkoordinaten. Bei diesem Target handelt es sich um eine der kleine-

ren Hartplastik-Kugeln mit einem Durchmesser von 25 cm. Die Ergebnisse weisen gegenüber jenen der Pyramiden eine deutlich stufenförmige Struktur auf. Mit zunehmender Flughöhe und Geschwindigkeit steigt der Einfluss der Intensitätsfilterung. Eine zu strenge Filterung führte dazu, dass zu viele Punkte aus der Punktwolke ausgeschlossen wurden und keine Ausgleichslösungen mehr erzielt werden konnten. Die übrigen Ergebnisse zeigen hingegen eine hohe Stabilität und liegen überwiegend deutlich unter der 5 cm-Grenze. Lediglich der erste Flug fällt etwas aus dem Rahmen. Eine temporär verschlechterte RTK-Lösung der M350 zum Zeitpunkt der Messung könnte hierfür die Ursache sein, besonders weil diese Erscheinung auch in der Tabelle 6.3 des benachbarten Target TET-005 erkennbar ist.

KUG-004 ( $\phi = 25$ cm)				Differenz $\Delta_{yx}$ [mm] zu den Referenzkoordinaten				
Trafo	Flug	[m/s]	H[m]	I>2000	I>4000	I>6000	I>8000	I>10000
rmGeo	I	3	47	48	45	39	31	37
Terra	I	3	47	53	51	53	49	41
rmGeo	II	3	62	25	24	30	9	16
Terra	II	3	62	35	29	14	28	24
rmGeo	III	3	77	15	27	31	20	
Terra	III	3	77	25	15	30	20	
rmGeo	IV	6	47	15	28	3	9	10
Terra	IV	6	47	19	8	25	30	32
rmGeo	V	6	62	30	14	14		
Terra	V	6	62	7	13	13		
rmGeo	VI	6	77	16	16	40	28	
Terra	VI	6	77	39	21	19	26	
rmGeo	VII	9	47	24	25	22	26	28
Terra	VII	9	47	25	25	11	26	43
rmGeo	VIII	9	62	54	52			
Terra	VIII	9	62	46	48			
rmGeo	IX	9	77	24	24			
Terra	IX	9	77					

Tabelle 6.7: Lagedifferenz  $\Delta_{yx}$  in mm zur Referenzmessung für Punkt KUG-004 in Abhängigkeit von Flug, Transformation und Intensität-Filter

Tabelle 6.8 zeigt die Ergebnisse für das Kugel-Target KUG-009, das im Gegensatz zu KUG-004 mit dem weißen Bodenmarkierungsspray besprüht wurde. Die Tabelle ist nahezu vollständig grün eingefärbt, was bedeutet, dass die Lagedifferenzen in fast allen Fällen unterhalb von 35 mm liegen. Lediglich bei hoher Fluggeschwindigkeit in Kombination mit großer Flughöhe und strenger Intensitätsfilterung konnten keine stabilen Koordinaten berechnet werden. Der direkte Vergleich mit dem unbehandelten Target KUG-004 verdeutlicht den positiven Einfluss des Bodenmarkierungssprays auf die Rückstreuintensität und damit auf die Stabilität der Ausgleichsergebnisse.

KUG-009 ( $\varnothing = 25$ cm)				Differenz $\Delta_{yx}$ [mm] zu den Referenzkoordinaten				
Trafo	Flug	[m/s]	H[m]	I>2000	I>4000	I>6000	I>8000	I>10000
rmGeo	I	3	47	5	4	12	6	10
Terra	I	3	47	16	19	18	24	11
rmGeo	II	3	62	12	14	22	19	22
Terra	II	3	62	13	12	14	15	10
rmGeo	III	3	77	13	11	12	24	10
Terra	III	3	77	4	16	13	12	12
rmGeo	IV	6	47	34	30	34	28	35
Terra	IV	6	47	29	25	28	24	30
rmGeo	V	6	62	23	30	33	28	36
Terra	V	6	62	40	27	32	39	37
rmGeo	VI	6	77	36	31	17	24	32
Terra	VI	6	77	29	25	26	25	29
rmGeo	VII	9	47	20	33	18	20	16
Terra	VII	9	47	18	19	16	23	15
rmGeo	VIII	9	62	26	32	31	30	30
Terra	VIII	9	62	29	29	32	32	32
rmGeo	IX	9	77	23	23	23		
Terra	IX	9	77	32	32	29		

Tabelle 6.8: Lagedifferenz  $\Delta_{yx}$  in mm zur Referenzmessung für Punkt KUG-009 in Abhängigkeit von Flughöhe, Geschwindigkeit und Intensität-Filter

KUG-013 ( $\varnothing = 30$ cm)				Differenz $\Delta_{yx}$ [mm] zu den Referenzkoordinaten				
Trafo	Flug	[m/s]	H[m]	I>2000	I>4000	I>6000	I>8000	I>10000
rmGeo	I	3	47	36	29	25	25	21
Terra	I	3	47	12	15	11	9	12
rmGeo	II	3	62	25	39	37	31	37
Terra	II	3	62	29	12	33	35	32
rmGeo	III	3	77	21	38	41	38	48
Terra	III	3	77	24	40	25	22	23
rmGeo	IV	6	47	18	20	20	23	18
Terra	IV	6	47	19	17	28	28	27
rmGeo	V	6	62	28	16	10	12	6
Terra	V	6	62	20	14	10	9	4
rmGeo	VI	6	77	47	45	45	40	46
Terra	VI	6	77	41	43	40	44	46
rmGeo	VII	9	47	18	16	18	20	24
Terra	VII	9	47	26	23	26	26	19
rmGeo	VIII	9	62	29	25	27	28	29
Terra	VIII	9	62	17	33	28	39	11
rmGeo	IX	9	77	20	20	20	20	20
Terra	IX	9	77	20	20			

Tabelle 6.9: Lagedifferenz  $\Delta_{yx}$  in mm zur Referenzmessung für Punkt KUG-013 in Abhängigkeit von Flug, Transformation und Intensität-Filter

Tabelle 6.9 zeigt die Lagedifferenzen der im 3D-Druck gefertigten Halbkugel mit einem Durchmesser von 30 cm. Auch diese Ergebnisse fallen sehr positiv aus. Lediglich drei Koordinaten konnten nicht berechnet werden, während sämtliche übrigen Differenzen unterhalb der 5 cm-Grenze liegen.

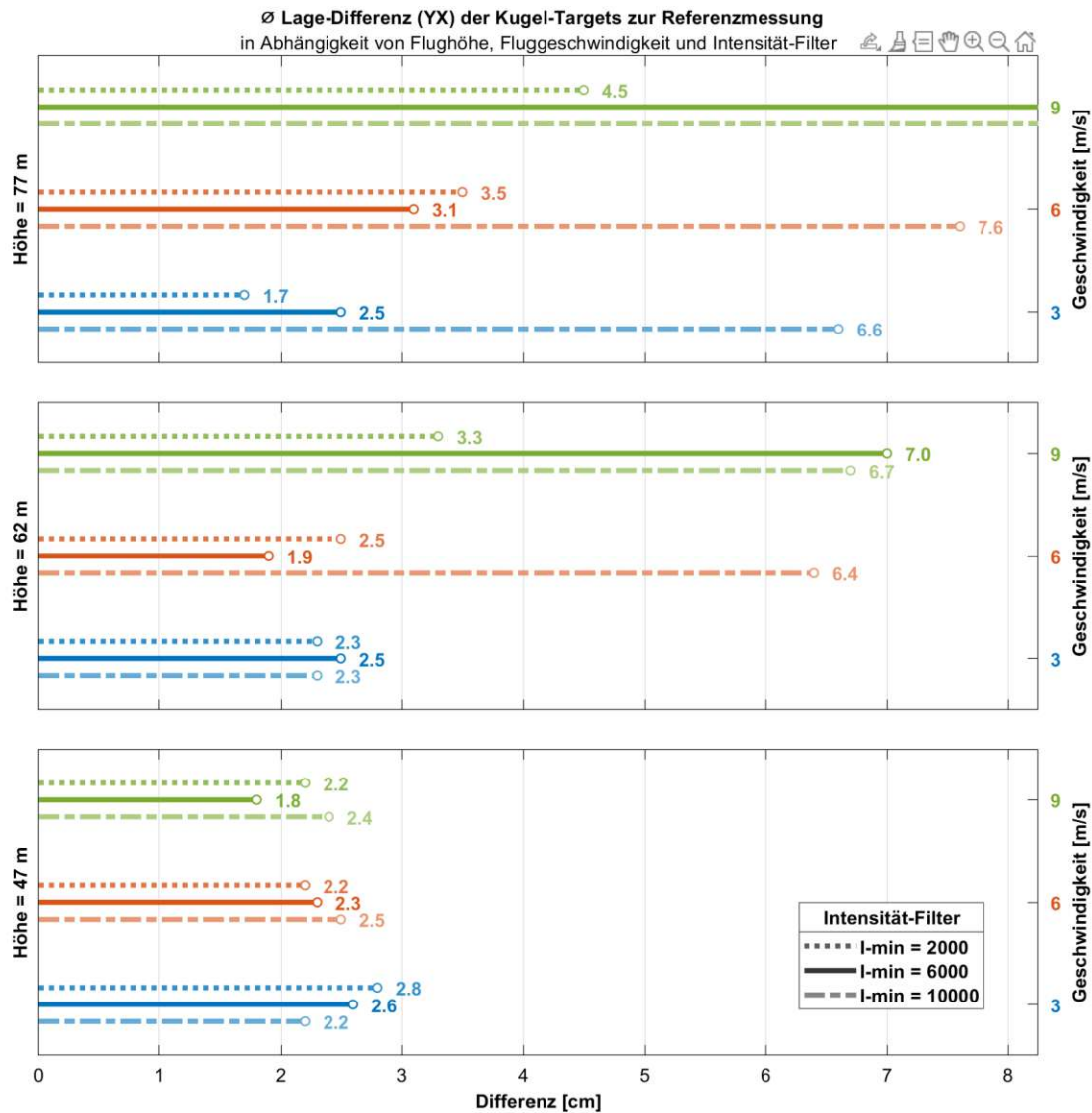


Abb. 6.10: Durchschnittliche Lagedifferenz  $\Delta_{yx}$  in *cm* der Kugel-Targets in Abhängigkeit von Flughöhe, Geschwindigkeit und Intensität-Filter

Zur besseren Einschätzung der Ergebnisse wurde auch für die Kugel-Targets ein gemittelter Linienplot erstellt, der in Abbildung 6.10 dargestellt ist. Wie bereits bei den Pyramiden-Targets zeigen auch die Kugel-Targets bei der geringsten Flughöhe

von 47 m in allen Geschwindigkeits- und Intensitätsstufen hervorragende Ergebnisse mit Lagedifferenzen unterhalb von 3 cm. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Flughöhe von 62 m, wobei hier der Einfluss der Intensitätsfilterung deutlicher erkennbar wird. Wird der Filterwert zu hoch angesetzt, verschlechtern sich die berechneten Koordinaten deutlich, da auf der Kugeloberfläche vermutlich zu wenige stabile Punkte verbleiben. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt bei der größten Flughöhe von 77 m. Bei einem Intensitätsfilter von 10 000 konnte selbst bei geringster Geschwindigkeit ein Ergebnis unter 5 cm erreicht werden, während bei geringeren Filterwerten weiterhin präzise Ergebnisse erzielt wurden.

### 6.3.2 Koordinatendifferenzen: UAV-Photogrammetrie

Die nachfolgenden Tabellen liefern die Lagedifferenzen zwischen den insgesamt 24 berechneten Koordinatenpaaren und den jeweiligen Referenzkoordinaten des zugehörigen photogrammetrischen Targets. Für die jeweiligen 12 gezwängten Ausgleichsergebnisse, wurden die paarweise angeordnete Schachbrett- und codierten Targets gegensätzlich als Bodenpasspunkte verwendet.

Für die photogrammetrischen Aufnahmen mit der Zenmuse P1, werden die CHB-Ergebnisse in der Tabelle 6.10 und jene der COD-Targets in 6.11 gezeigt. Bei der Auswertung mit den jeweiligen vier Bodenpasspunkten lagen die Abweichungen in fast allen Fällen unter zwei Zentimeter. Dies zeigt, wie stabil Bündelbockausgleiche mit Hinzunahme von Passpunkten fungieren. Bei der direkten Georeferenzierung zeigt sich hingegen ein deutliches Muster. Die zentral gelegenen Targets entlang des linearen Flugpfads konnten mit geringen Differenzen berechnet werden, da in diesen Bereichen trotz des linearen Fluges eine ausreichende Bildüberlappung vorlag. Bei den am Rand des Flugstreifens platzierten Targets verschlechterten sich die Ergebnisse deutlich, was zu größeren Abweichungen gegenüber den Referenzkoordinaten führte. Dieses Ergebnis verdeutlicht den entscheidenden Einfluss einer ausreichenden Bildüberlappung bei der direkten Georeferenzierung ohne Bodenpasspunkte.

Für dieselben Flüge (VII - IX) wurde zusätzlich auch die Auswertung mit der integrierten 2-Megapixel-Kamera der Zenmuse L2 durchgeführt (Tabelle 6.12 und 6.13). Die Anzahl der aufgenommenen Fotos entsprach dabei annähernd jener der P1-Messungen. Die Ergebnisse mit Bodenpasspunkten zeigten vergleichbare Genauigkeiten wie bei der P1-Kamera. Lediglich bei der höchsten Flughöhe von 77 m konnten nicht mehr genügend Projektionen für die automatische Erkennung der Targets identifiziert werden. Bei der Auswertung mittels direkter Georeferenzierung hingegen konnten keine Differenzen unterhalb von 5 cm erzielt werden. Ursache dafür ist die geringere Bildauflösung der L2-Kamera, die zu einem instabilen Bündelblockausgleich und damit zu deutlich unpräziseren Ergebnissen führt.

Schachbrett-Targets					Differenz $\Delta_{yx}$ [mm] zu den Referenzkoordinaten			
Cam	GCP	Flug	[m/s]	H[m]	CHB-001	CHB-006	CHB-011	CHB-015
P1	ohne	VII	9	47	113	12	21	81
P1	ohne	VIII	9	62	136	27	26	22
P1	ohne	IX	9	77	85	29	13	45
P1	mit	VII	9	47	7	14	7	11
P1	mit	VIII	9	62	3	22	16	8
P1	mit	IX	9	77	3	21	14	9

Tabelle 6.10: Lagedifferenz  $\Delta_{yx}$  in *mm* zur Referenzmessung für CHB-Targets

Codierte Targets					Differenz $\Delta_{yx}$ [mm] zu den Referenzkoordinaten			
Cam	GCP	Flug	[m/s]	H[m]	COD-002	COD-007	COD-010	COD-016
P1	ohne	VII	9	47	113	19	17	88
P1	ohne	VIII	9	62	135	27	21	31
P1	ohne	IX	9	77	85	21	9	52
P1	mit	VII	9	47	5	16	9	7
P1	mit	VIII	9	62	3	12	8	7
P1	mit	IX	9	77	2	13	9	6

Tabelle 6.11: Lagedifferenz  $\Delta_{yx}$  in *mm* zur Referenzmessung für COD-Targets

Schachbrett-Targets					Differenz $\Delta_{yx}$ [mm] zu den Referenzkoordinaten			
Cam	GCP	Flug	[m/s]	H[m]	CHB-001	CHB-006	CHB-011	CHB-015
L2	ohne	VII	9	47	113	106	121	141
L2	ohne	VIII	9	62	127	98	130	159
L2	ohne	IX	9	77				
L2	mit	VII	9	47	8	22	9	5
L2	mit	VIII	9	62	7	22	5	8
L2	mit	IX	9	77				

Tabelle 6.12: Lagedifferenz  $\Delta_{yx}$  in *mm* zur Referenzmessung für CHB-Targets

Codierte Targets					Differenz $\Delta_{yx}$ [mm] zu den Referenzkoordinaten			
Cam	GCP	Flug	[m/s]	H[m]	COD-002	COD-007	COD-010	COD-016
L2	ohne	VII	9	47	121	119	107	130
L2	ohne	VIII	9	62	134	117	123	151
L2	ohne	IX	9	77				
L2	mit	VII	9	47	12	18	12	19
L2	mit	VIII	9	62	6	20	11	11
L2	mit	IX	9	77				

Tabelle 6.13: Lagedifferenz  $\Delta_{yx}$  in *mm* zur Referenzmessung für COD-Targets

### 6.3.3 Erkenntnisse und Schwierigkeiten

Wie zu erwarten, lieferten größere LiDAR-Targets deutlich stabilere Ergebnisse als kleinere. Zudem zeigte sich, dass die Fluggeschwindigkeit einen stärkeren Einfluss auf die Genauigkeit hat als die Flughöhe. Da die Ausgleichsprogramme sehr robust funktionieren, darf der Intensitätsgrenzwert etwas niedriger gewählt werden, um auch bei geringerer Punktdichte eine stabile Koordinatenberechnung zu erzielen. Der Einsatz des weißen Bodenmarkierungsspray führte zu einer deutlichen Verbesserung der LiDAR-Rückstreuung und damit zu besseren Ausgleichsergebnissen. Tabelle 6.14 zeigt zum Vergleich nochmals die Differenzen bei einem Intensitätsfilter von 10000 für die beiden Hartplastikkugeln sowie die beiden hölzernen Pyramiden. Zusätzlich ist die Anzahl der Punkte angegeben, die nach der Filterung tatsächlich in die Ausgleichung eingingen. Diese Punktzahl ist bei den besprühten Targets deutlich höher, was sich in kleineren und stabileren Differenzen widerspiegelt.

Vergleich der Rückstreuung mit (+) und ohne (-) Spray				$\Delta_{yx}$ [mm] zur Referenz und Punktzahl bei $I > 10000$							
				TET-003 (+)		TET-014 (-)		KUG-009 (+)		KUG-004 (-)	
Trafo	Flug	[m/s]	H[m]	$\Delta_{yx}$	Anz.	$\Delta_{yx}$	Anz.	$\Delta_{yx}$	Anz.	$\Delta_{yx}$	Anz.
rmGeo	I	3	47	21	612	20	398	10	57	37	31
Terra	I	3	47	23	615	30	395	11	57	41	30
rmGeo	II	3	62	9	394	18	302	22	40	16	20
Terra	II	3	62	9	398	30	301	10	31	24	18
rmGeo	III	3	77	16	309	36	127	10	26		
Terra	III	3	77	8	305	36	127	12	26		
rmGeo	IV	6	47	16	199	22	186	35	38	10	16
Terra	IV	6	47	17	199	21	187	30	43	32	16
rmGeo	V	6	62	16	190	33	134	36	28		
Terra	V	6	62	13	189	21	136	37	29		
rmGeo	VI	6	77	18	186	36	80	32	18		
Terra	VI	6	77	9	184	42	82	29	21		
rmGeo	VII	9	47	13	159	22	193	16	17	28	10
Terra	VII	9	47	9	161	21	192	15	20	43	10
rmGeo	VIII	9	62	32	99	58	71	30	20		
Terra	VIII	9	62	29	98	76	72	32	18		
rmGeo	IX	9	77		30						
Terra	IX	9	77		30						

Tabelle 6.14: Vergleich der Ergebnisse bei Intensitätsfilterung  $I > 10000$  für idente Targets mit Besprühung des weißen Markierspray und ohne

Bei der photogrammetrischen Auswertung erwies sich die direkte Georeferenzierung nur dann als zuverlässig, wenn eine ausreichende Bildüberlappung und somit ein stabiler inertialer Bündelblockausgleich gegeben sind. Die Variante mit Bodenpasspunkten lieferte durchgehend präzise Ergebnisse, und auch die codierten Targets zeigten eine sehr gute automatische Erkennbarkeit.

# 7 Testgebiet: Forststraße

## 7.1 Datenerfassung

### 7.1.1 Testgebiet und Referenzmessung

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Untersuchung von Katastervermessungen mittels UAV im bewaldeten Gelände liegt, wurde als drittes Testgebiet eine geeignete Forststraße in der Nähe von St. Pölten ausgewählt. Abbildung 7.1 zeigt das Gebiet in einer Luftbildaufnahme mit den Positionen der UAV-Targets, die in regelmäßigen Abständen entlang eines etwa 350 Meter langen Abschnitts der Forststraße ausgelegt wurden.

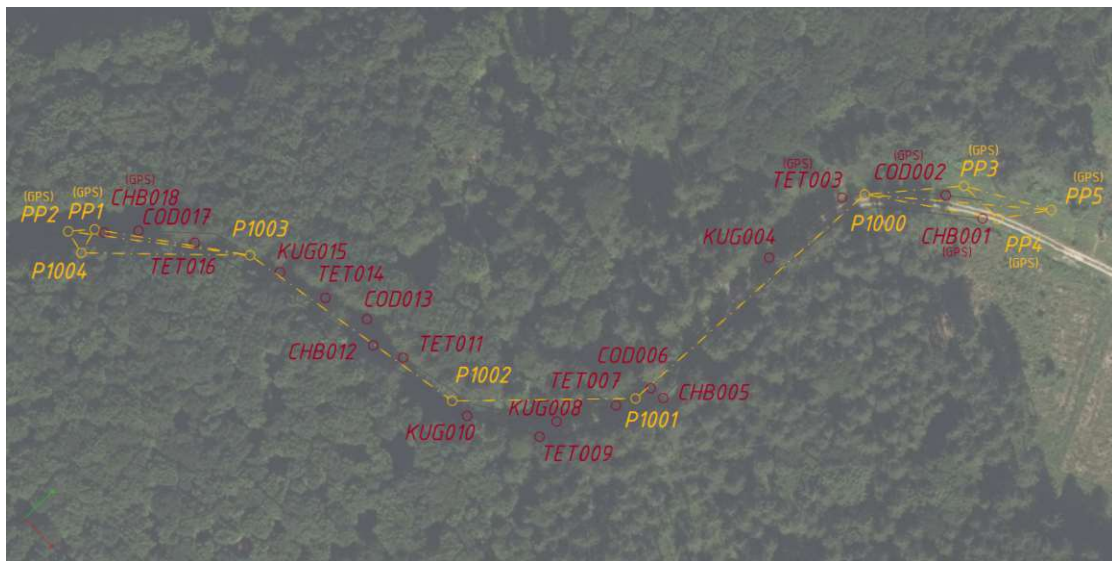


Abb. 7.1: Forststraße und UAV-Targetbezeichnungen

Bei sonnigem und windstillem Herbstwetter erfolgten am 29. September 2025 zunächst die UAV-Befliegungen und anschließend die terrestrische Referenzmessung. Als Grundlage für diese, wurden am Beginn und am Ende der Messstrecke, jeweils in kleinen Waldlichtungen, temporäre Polygonpunkte (PP1–PP5) vermarktet und mittels GNSS bestimmt. Zusätzlich wurden auch das erste Target (CHB-001) und

das letzte Target (CHB-018) mit GNSS eingemessen. Diese Punkte dienten, gemeinsam mit den Polygonpunkten, zur Berechnung zweier freier Stationierungen am Anfang (P1000) und am Ende (P1004) des Testgebiets. Ausgehend von diesen Stationierungen wurde ein an- und abgeschlossener Polygonzug entlang des Forstweges gemessen, um die Bestimmung präziser Referenzkoordinaten für die UAV-Targets zu ermöglichen.

Der parallel zur Wiener Hochquellwasserleitung verlaufende Forstweg bot ideale Bedingungen, um UAV-Messungen unter realistischen Waldbedingungen zu testen. Einerseits ist der Streckenverlauf gleichmäßig von Bäumen freigeschnitten, andererseits schränken das dichte Blätterdach und die überhängenden Äste die Sichtlinie des UAV zum Boden stark ein und stellen somit eine praxisnahe Herausforderung für Messungen im Waldgebiet dar. Abbildung 7.2a zeigt einen Ausschnitt des Testgebiets aus einer Luftaufnahme der Zennuse P1, während Abbildung 7.2 eine Bodenaufnahme entlang des Forstweges darstellt. Beide Aufnahmen verdeutlichen die teils starke Abschattung durch die Baumkronen.



(a) P1-Aufnahme aus der Luft



(b) Bodenaufnahme

Abb. 7.2: Baumkronen entlang der Forststraße

### 7.1.2 UAV-Targets

Da sich die im 3D-Druck gefertigten Targets in den bisherigen Messungen als äußerst zuverlässig und präzise erwiesen hatten, wurden für dieses Testgebiet weitere Modelle hergestellt. Neben einer zusätzlichen Halbkugel wurde ein weiteres Pyramiden-Target mit den Abmessungen  $49,5 \times 16,5$  cm angefertigt sowie eine leicht abgeänderte Variante mit flacherer Neigung und den Maßen  $49,5 \times 13,5$  cm. Tabelle 7.1 fasst die Abmessungen und den Steigungswinkel einer Seitenfläche für die entwickelten Pyramiden-Targets kompakt zusammen.

Pyramide	Grundseite	Höhe	Verhältnis	Steigung
Version	[ cm ]	[ cm ]	Höhe : Seite	Grad [ ° ]
V1	64,0	25,70	1 : 2,5	54
V2	35,0	8,75	1 : 4,0	41
V3	49,5	16,50	1 : 3,0	49
V4	49,5	13,75	1 : 3,6	44

Tabelle 7.1: Abmessungen der entwickelten Pyramiden-Targets

Da sich der Einsatz von Bodenmarkierungsspray in den vorherigen Tests als vorteilhaft erwiesen hatte, wurden alle LiDAR-Targets vollständig damit beschichtet, um die Rückstreuintensität weiter zu verbessern.

### 7.1.3 UAV-Konfigurationen

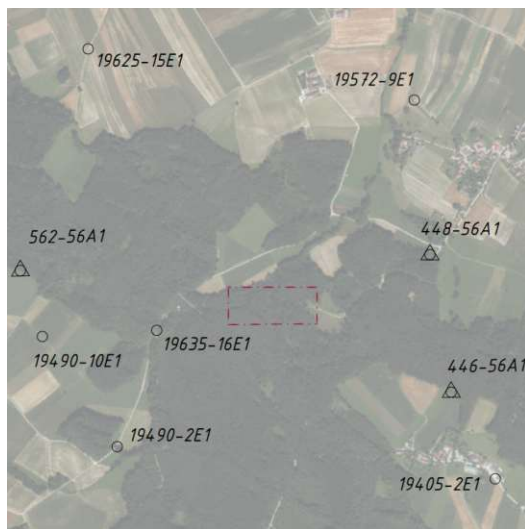
Zur Verbesserung der Querüberlappung in den photogrammetrischen Aufnahmen wurde das Testgebiet in zwei parallelen Fluglinien befliegen, wodurch sich eine gesamte Flugstrecke von rund 680 m ergab. Die Flugroute wurde in der Steuerungssoftware der DJI M350 RTK anhand georeferenzierter Routenpunkte direkt auf der hinterlegten Basemap-Funktion der Anwendung festgelegt. Dabei wurde bewusst darauf verzichtet, die Fluglinie exakt über der Waldschneise beziehungsweise dem Forstweg zu führen, um durch die überhängenden Baumkronen gezielt eine erhöhte Erschwernis für die UAV-Messungen zu schaffen.

Ein Flug erfolgte mit einer konstanten Geschwindigkeit von 2 m/s und einer mittleren Flughöhe von rund 56 m über Grund. Das UAV befand sich damit konstant etwa 10 bis 15 m oberhalb der Baumkronen, wodurch ein sicherer Flugverlauf sowie ein stabiler GNSS-Empfang gewährleistet waren. Mit der Zenmuse P1 wurden während der Befliegung insgesamt 71 Luftbilder aufgenommen, während die prozessierte LiDAR-Punktwolke der L2 eine mittlere Punktdichte von etwa 3 800 Punkten pro Quadratmeter aufwies. Die gesamte Dauer eines Fluges betrug rund neun Minuten.

## 7.2 Datenauswertung

### 7.2.1 GNSS

Wie bereits beschrieben, erfolgte die GNSS-Messung der Festpunkte gemäß den gesetzlichen Vorgaben für Katastervermessungen. Aus diesem Grunde wurde wieder eine lokal angepasste ETRS-zu-MGI-Transformation in rmGEO berechnet. Abbildung 7.3a zeigt die verwendeten Festpunkte, welche das Messgebiet gleichmäßig umschließen und somit eine stabile geometrische Grundlage für die Transformation bilden. Die damit bestimmten Parameter der 2D-Helmert-Transformation sind in Abbildung 7.3 dargestellt.



(a) Verwendete Festpunkte

2 - Stufen Datumstransformation			
Verwendeter Referenzdienst:	APOS		
<b>Stufe 1: 7-Parameter Transformation Helmert 3D</b>			
<b>Globale Parameter:</b>			
Drehpunkt im alten System (X, Y, Z) (m)	0.000	0.000	0.000
Verschiebung (X, Y, Z) (m)	-577.326	-90.129	-463.919
Drehung (X, Y, Z) (cc)	15.85	4.55	16.35
Maßstab (ppm)	-2.4232		
<b>Stufe 2: lokale Transformation Helmert 2d + 1d Ebene</b>			
<b>Berechnete Parameter:</b>			
<b>Lage</b>			
Drehpunkt	-55756.344	347493.535	
Verschiebung (Y, X) (m)	0.132	0.104	
Drehung (cc)	-27.43		
Maßstab (ppm)	-0.99		
<b>Höhe</b>			
Ebenen-Neigung (cc)	-20.00	18.31	
Verschiebung (m)	-0.911		
Mittlerer Fehler einer Lage-Koordinate (m)	0.01		
Mittlerer Punktlagefehler (m)	0.02		

(b) Berechnete Transformationsparameter

Abb. 7.3: Datumstransformation zur lokalen Anfelderung

### 7.2.2 Netzausgleich

Zur Berechnung geeigneter Referenzwerte erfolgte die Auswertung des aus fünf Standpunkten bestehenden Polygonzugs im entwickelten MATLAB-Programm. Zunächst wurden mithilfe der GNSS-eingemessenen Punkte die beiden Stationierungen am Anfang und am Ende des Messgebiets als jeweils freier Ausgleich berechnet. Dadurch erhielten die Standpunkte stabile Koordinaten und Orientierungen, mit deren Messdaten anschließend auch die GNSS-Koordinaten der beobachteten Polygonpunkte verbessert werden konnten. Auf Basis dieser Werte wurde ein erster freier Netzausgleich zur Bestimmung genäherter Target-Koordinaten durchgeführt. Ausgehend von diesen Näherungen konnte das Netz schließlich unter Zwang der

stabilisierten Polygonpunkte vollständig ausgeglichen werden. Da jedes Target von mindestens zwei Standpunkten aus beobachtet wurde, erfolgte der Ausgleich auf Grundlage von insgesamt 98 Beobachtungen. Zur weiteren Erhöhung der Messstabilität wurde bei der Messung ein kurzer 20 cm-Lotstab verwendet. Wie die Fehler- und Konfidenzellipsen des gezwängten Netzausgleichs in Abbildung 7.4 zeigen, konnte für nahezu alle Punkte eine mittlere Punktlagegenauigkeit von maximal 1 cm erzielt werden. Lediglich die Punkte CHB-001 und COD-002, die außerhalb des Polygonzugs liegen, weisen etwas größere Ellipsen auf. Da für diese Punkte jedoch zuverlässige GNSS-Messungen vorliegen, können auch deren Koordinaten als geeignete Referenzwerte für die UAV-Messungen herangezogen werden.

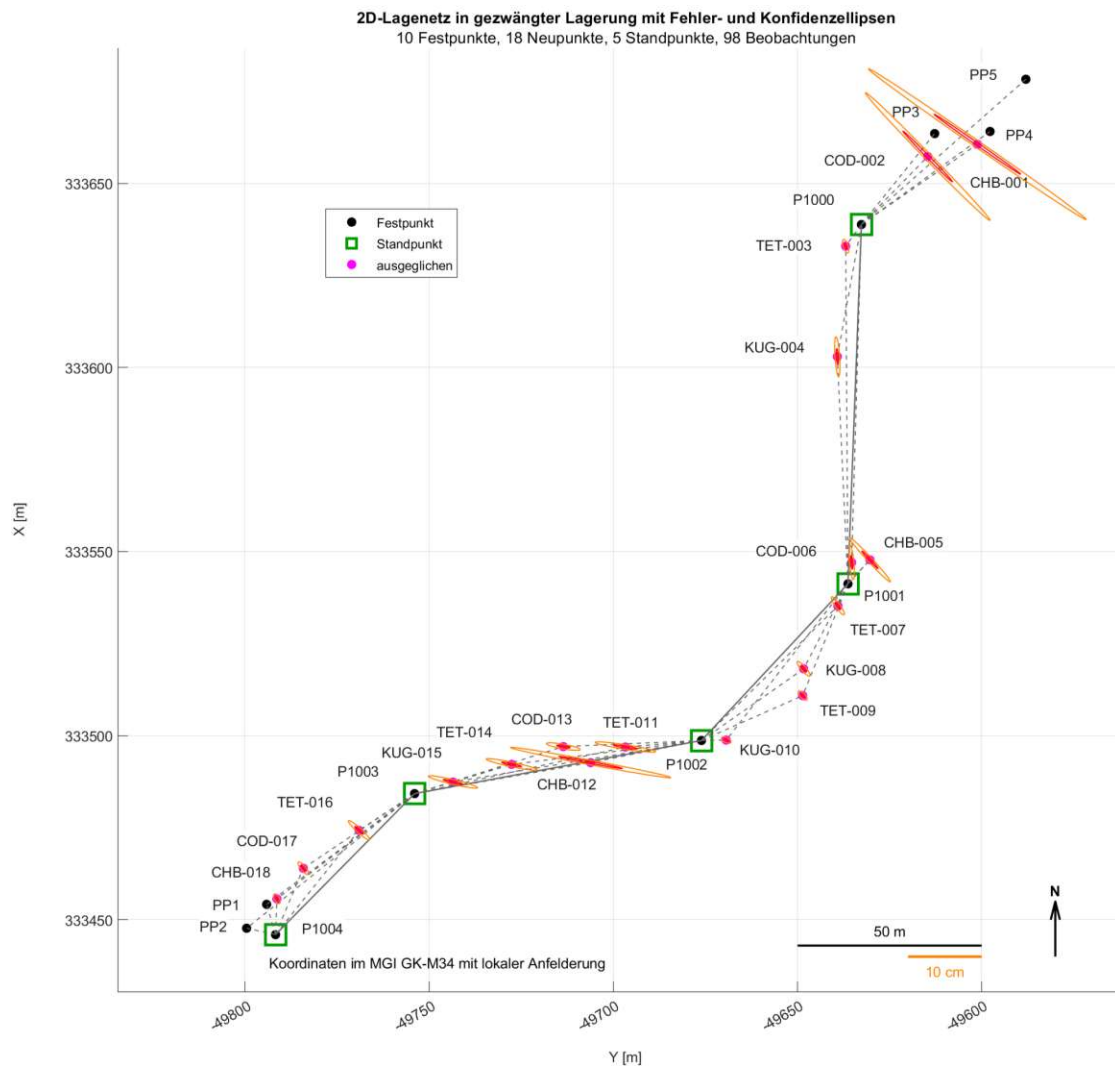


Abb. 7.4: Netzplot der Forststraße nach dem Netzausgleich

### 7.2.3 UAV-LiDAR

Die Auswertung der LiDAR-Daten erfolgte, wie bereits bei den vorangegangenen Messgebieten, auf zwei unterschiedlichen Wegen. Einerseits durch eine direkte 7-Parameter-Transformation in DJI Terra, andererseits über die in Abbildung 7.3 dargestellte ETRS-zu-MGI-Transformation in rmGEO. Abbildung 7.5 zeigt die in DJI Terra prozessierte Punktwolke gemeinsam mit der geflogenen Route über dem Forstgebiet. Deutlich sichtbar ist der leichte parallele Versatz der beiden Fluglinien zur Wegmitte beziehungsweise zur idealen Sichtlinie durch die Öffnungen zwischen den Baumkronen. Besonders im Bereich des rosafarben markierten Punkts führten die dichten Baumkronen zu erwarteten Problemen bei der Auswertung. Diese werden in den Erkenntnissen in Kapitel 7.3.4 nochmals gesondert erläutert.

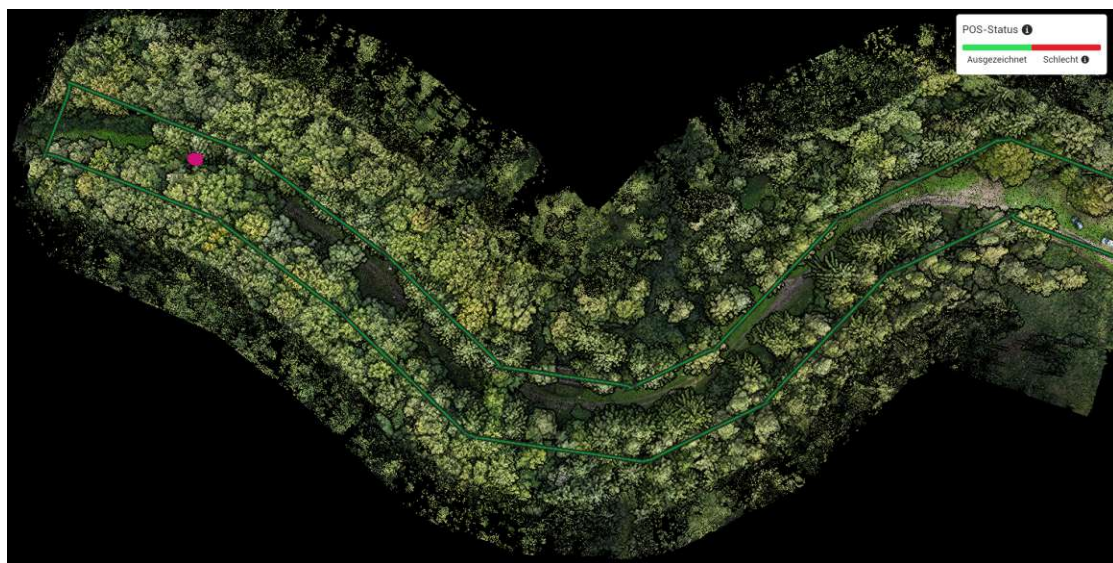


Abb. 7.5: Prozessierte LiDAR-Punktwolke mit RGB-Information und Flugroute

### 7.2.4 UAV-Photogrammetrie

Ebenso wie die LiDAR-Daten, wurden auch die photogrammetrische Aufnahmen anhand bereits vorgestellter Methoden ausgewertet. Zunächst wurde ein Bündelblockausgleich unter Einbeziehung von Bodenpasspunkten durchgeführt, anschließend eine zweite Variante mittels direkter Georeferenzierung der Kamerapositionen. Aufgrund der dichten Vegetation und der weitgehend homogenen Strukturen im Waldbereich konnten in Agisoft Metashape bei diesem Messversuch deutlich weniger Verknüpfungspunkte erkannt werden als in den offenen Testgebieten.

Abbildung 7.6 zeigt die rund 109000 erkannten Verknüpfungspunkte der P1-Auswertung sowie die acht photogrammetrischen Targets mit ihren zugehörigen Projektionen. Für jedes Target konnten im Durchschnitt acht bis zwölf Bildprojektionen identifiziert werden, die zur automatischen Mustererkennung beitrugen.

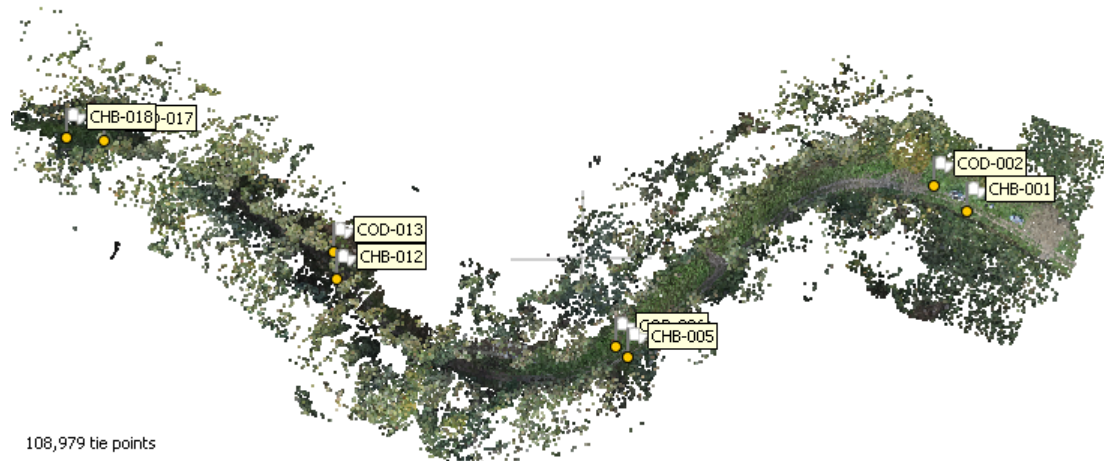


Abb. 7.6: Darstellung der Forststraße anhand verwendeter Verknüpfungspunkte

## 7.3 Ergebnisse und Vergleich

### 7.3.1 Koordinatendifferenzen: UAV-LiDAR

Im Gegensatz zu den vorherigen Messgebieten wurden für die Auswertung der Befliegungen dieses Testareals zusätzlich zu den Lagedifferenzen  $\Delta_{yx}$  auch die Höhendifferenzen  $\Delta_z$  zu den Referenzkoordinaten der jeweiligen UAV-Targets berechnet. Darüber hinaus enthalten die Ergebnistabellen die Anzahl  $n$  jener Punkte, die nach allen Filterstufen und der iterativen Ausgleichung zur Berechnung der finalen Koordinaten einer Kugel oder Pyramide herangezogen wurden. Der Grenzwert für die Intensität  $I$ , den ein Scanpunkt mindestens aufweisen muss, um im Ausgleichsverfahren berücksichtigt zu werden, wurde dabei für beide Ausgleichsprogramme auf 5000 festgelegt.

Tabelle 7.2 zeigt die Differenzen für die vier verwendeten Kugel-Targets. Die Ergebnisse fallen durchgehend positiv aus. Sowohl für die Halbkugeln als auch für die etwas kleineren Vollkugeln liegen sämtliche Abweichungen unter 35 mm – unabhängig von der gewählten Transformationsmethode.

Kugel-Targets		Flug		Berechnung			Differenzen	
Pkt.-Nr.	Maße [cm]	[m/s]	H [m]	Trafo	I >	n	$\Delta_{yx}$ [mm]	$\Delta_z$ [mm]
KUG-004	$\phi = 25$	2	56	rmGeo	5000	47	10	-9
KUG-008	$\phi = 25$	2	56	rmGeo	5000	37	13	-5
KUG-010	$\phi = 30$	2	56	rmGeo	5000	24	23	-8
KUG-015	$\phi = 30$	2	56	rmGeo	5000	16	13	22
KUG-004	$\phi = 25$	2	56	Terra	5000	37	4	-5
KUG-008	$\phi = 25$	2	56	Terra	5000	32	13	-20
KUG-010	$\phi = 30$	2	56	Terra	5000	28	26	-6
KUG-015	$\phi = 30$	2	56	Terra	5000	26	34	-7

Tabelle 7.2: Koordinatendifferenzen der Kugel-Targets zur Referenzmessung

Tabelle 7.3 zeigt die Differenzen für die verwendeten Pyramiden-Targets. Die Ergebnisse weisen bei beiden Transformationsmethoden vergleichbare Größenordnungen auf, fallen jedoch insgesamt heterogener aus als bei den Kugeln. Für die ersten drei Pyramiden entlang des Forstweges konnte eine hohe Anzahl geeigneter Scanpunkte in den zugeschnittenen Target-Punktwolke identifiziert werden, wodurch die berechneten Abweichungen zu den Referenzkoordinaten sowohl in der Lage als auch in der Höhe unter 2,5 cm blieben. Im hinteren Abschnitt der Flugroute nahm die Punktdichte aufgrund dichter Baumkronen deutlich ab, sodass für die dort befindlichen Targets keine Ausgleichslösungen berechnet werden konnten. Lediglich für die Pyramide TET-014 konnten noch Koordinaten bestimmt werden, die aufgrund der kleineren Targetgröße jedoch etwas größere Lagedifferenzen aufwiesen.

Tetraeder-Targets		Flug		Berechnung			Differenzen	
Pkt.-Nr.	Maße [cm]	[m/s]	H [m]	Trafo	I >	n	$\Delta_{yx}$ [mm]	$\Delta_z$ [mm]
TET-003	64 x 26	2	56	rmGeo	5000	362	7	7
TET-007	50 x 17	2	56	rmGeo	5000	218	20	14
TET-009	50 x 14	2	56	rmGeo	5000	232	22	18
TET-011	50 x 14	2	56	rmGeo				
TET-014	35 x 9	2	56	rmGeo	5000	17	46	19
TET-016	64 x 26	2	56	rmGeo				
TET-003	64 x 26	2	56	Terra	5000	362	8	9
TET-007	50 x 17	2	56	Terra	5000	218	20	9
TET-009	50 x 14	2	56	Terra	5000	232	23	11
TET-011	50 x 14	2	56	Terra				
TET-014	35 x 9	2	56	Terra	5000	17	66	18
TET-016	64 x 26	2	56	Terra				

Tabelle 7.3: Koordinatendifferenzen der Pyramiden-Targets zur Referenzmessung

Auffällig ist auch der Unterschied in den Höhenabweichungen zwischen den Kugel- und den Pyramiden-Targets. Während die Höhen der Pyramiden systematisch zu klein geschätzt wurden, ergaben sich bei den Kugel-Targets stets zu große

Höhenwerte. Dieses Verhalten lässt sich einerseits durch die Geometrie der Targets und die daraus resultierende unterschiedliche Rücksteuerung der Laserimpulse erklären. Andererseits könnte auch die Berechnung eine Rolle spielen. Bei den Pyramiden fließen kaum Punkte nahe der Spitze in den Ausgleich ein, während bei den Kugeln vor allem Punkte aus dem oberen Drittel berücksichtigt werden.

### 7.3.2 Koordinatendifferenzen: UAV-Photogrammetrie

Nachfolgende Tabellen zeigen die Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertung der Befliegung, einerseits mit der Zenmuse P1 und zusätzlich für die während der LiDAR-Flüge aufgenommenen Fotos der integrierten Zenmuse L2-Kamera. Die Tabelle 7.4 zeigt hierfür die berechneten Differenzen für die CHB-Targets, während Tabelle 7.5 die Ergebnisse der codierten Targets darstellt. Die Tabellen zeigen ein ähnliches Muster, was verdeutlicht, dass die Ergebnisse weniger von der Art der Targets, sondern vielmehr von der verwendeten Kamera und der gewählten Berechnungsvariante – mit oder ohne Bodenpasspunkte – abhängen.

Schachbrett-Targets				Differenzen P1		Differenzen L2	
Pkt.-Nr.	[m/s]	H [m]	GCP	$\Delta_{yx}$ [mm]	$\Delta_z$ [mm]	$\Delta_{yx}$ [mm]	$\Delta_z$ [mm]
CHB-001	2	56	ohne	25	-20	49	-10
CHB-005	2	56	ohne	8	-14	13	-13
CHB-012	2	56	ohne	24	-2	100	-372
CHB-018	2	56	ohne	41	-141	722	-496
CHB-001	2	56	mit	3	9	9	5
CHB-005	2	56	mit	10	9	7	-10
CHB-012	2	56	mit	1	-5	0	0
CHB-018	2	56	mit	0	0	0	0

Tabelle 7.4: Koordinatendifferenzen der CHB-Targets zur Referenzmessung

Codierte Targets				Differenzen P1		Differenzen L2	
Pkt.-Nr.	[m/s]	H [m]	GCP	$\Delta_{yx}$ [mm]	$\Delta_z$ [mm]	$\Delta_{yx}$ [mm]	$\Delta_z$ [mm]
COD-002	2	56	ohne	24	-24	50	-6
COD-006	2	56	ohne	15	-23	19	2
COD-013	2	56	ohne	22	6	78	-269
COD-017	2	56	ohne	16	-128	737	-363
COD-002	2	56	mit	5	-5	8	-3
COD-006	2	56	mit	4	-7	6	11
COD-013	2	56	mit	6	12	9	0
COD-017	2	56	mit	0	0	1	0

Tabelle 7.5: Koordinatendifferenzen der COD-Targets zur Referenzmessung

Bei der direkten Georeferenzierung ohne GCP treten erwartungsgemäß etwas höhere Abweichungen auf. Für die Bündelblockergebnisse der P1 liegen jedoch alle

Lagedifferenzen deutlich unterhalb der 5 cm-Grenze. Lediglich bei den äußeren Targets, CHB-018 und COD-017, am Ende der Flugroute wurden größere Höhenfehler von mehreren Dezimetern festgestellt, was, wie bereits im vorherigen Messgebiet beobachtet, auf die unzureichende Bildüberlappung an den Rändern des Flugstreifens zurückzuführen ist.

Bei allen Berechnungen mit Bodenpasspunkten lagen die Differenzen, sowohl in der Lage als auch in der Höhe, unter etwa 1 cm. Ursache dafür ist die paarweise Anordnung von CHB- und COD-Targets entlang des Forstweges, wobei jeweils eine Targetgruppe als GCPs diente und die andere berechnet wurde. Dadurch konnte die geometrische Stabilität des Bündelblockausgleichs deutlich erhöht werden, sodass selbst bei rein linearen Flugrouten konsistente und sehr genaue Ergebnisse erzielt wurden.

Die mit der L2-Kamera erzielten Ergebnisse fielen hingegen deutlich schwächer aus. Aufgrund der geringeren Auflösung und des niedrigeren Bildkontrasts konnten insbesondere bei der unzureichenden Überlappung entlang der linearen Flugkurve nur wenige und teilweise wenig stabile Verknüpfungspunkte extrahiert werden. Dies führte zu einer weniger robusten Bündelblockgeometrie und in der Folge zu größeren Abweichungen, insbesondere im Rahmen der direkten Georeferenzierung.

### 7.3.3 Interne Genauigkeitsparameter

Die in dieser Arbeit berechneten Koordinatendifferenzen der UAV-Messungen zu stabilen Referenzwerten liefern wertvolle Hinweise auf die erreichbare Positionsgenauigkeit und Reproduzierbarkeit photogrammetrischer und LiDAR-basierter Verfahren. Um daraus jedoch allgemeingültige Aussagen ableiten zu können, sind interne Genauigkeitsparameter erforderlich, denn wie bereits zu Beginn der Arbeit erläutert, soll diese zugleich als Anregung für eine präzisere katasterrechtliche Einbettung von UAV-Messungen in der Vermessungsverordnung dienen.

In der geltenden Rechtslage wird hauptsächlich von satellitengestützten Messungen gesprochen, worunter sowohl GNSS- als auch UAV-basierte Verfahren fallen können. Die Georeferenzierung solcher Messungen im Landeskoordinatensystem ist durch klare Grenzwerte definiert. Die Transformation in das lokale MGI/GK-Bezugssystem (Anfelderung) muss einen Maßstabsfehler unter 100 ppm sowie maximale Lageklaffungen der verwendeten Festpunkte von höchstens 5 cm aufweisen. Werden diese Bedingungen erfüllt, kann sowohl eine damit verbundene GNSS-Messung als auch eine entsprechend transformierte UAV-Punktcloud grundsätzlich als katastertauglich angesehen werden. Ein durch satellitengestützte Messung bestimmter Punkt gilt jedoch erst dann im Sinne der Vermessungsverordnung als geometrisch korrekt und nachvollziehbar überprüft, wenn die daraus resultierenden Punktkoordinaten eine

mittlere Punktlagegenauigkeit von höchstens 2 cm aufweisen. Zur Berechnung eines solchen Parameters wird die zugehörige Kovarianzmatrix des bestimmten Punktes benötigt. Bei GNSS-Messungen ergibt sich diese aus der Satellitengeometrie (DOP-Werte) und den Messunsicherheiten der Pseudostrecken. Wie in Abschnitt 4.5 beschrieben, konnte eine entsprechende Matrix, und damit ein Positionsfehler, auch für die Kugel-Targets der LiDAR-Messungen bestimmt werden.

Tabelle 7.6 zeigt die berechneten mittleren Lagefehler (2D) sowie den gesamten Positionsfehler (3D) für die ausgeglichenen Mittelpunktkoordinaten der Kugel-Targets. Für alle Targets liegen beide Parameter unter 3 mm, was die hohe Stabilität, Reproduzierbarkeit und Präzision des Ausgleichsverfahrens bestätigt. Da UAVs ebenfalls auf satellitengestützter Positionierung basieren, können für die Transformation identische Grenzwerte herangezogen werden. Die maximal zulässige Punktlagegenauigkeit für Kugel-Targets könnte im gesetzlichen Sinne daher, analog zu den GNSS-Kriterien, mit 2 cm angesetzt werden

Kugel-Target		Präzision [mm]	
Pkt.-Nr.	Maße [cm]	mp <sub>xy</sub>	mp <sub>xyz</sub>
KUG-004	∅ = 25	2	2
KUG-008	∅ = 25	2	2
KUG-010	∅ = 30	2	3
KUG-015	∅ = 30	3	3

Tabelle 7.6: Mittlere Lage- und Positionsfehler der ausgeglichenen Kugel-Targets

In Kapitel 4.6 wurde bereits festgehalten, dass das Ausgleichsprogramm für die Pyramiden-Targets keine Kovarianzmatrix für die berechneten Koordinaten der Spitze liefert, wodurch auch keine Positionsgenauigkeit nach Helmert'schem Vorbild bestimmt werden kann. Um dennoch einen gesetzrelevanten Genauigkeitsparameter für diese Targets zu definieren, wurde in Kapitel 4.6 der Root Mean Square (RMS) als internes Präzisionsmaß eingeführt. Für die einzelnen Seitenflächen der Pyramide beschreibt dieser Parameter die Genauigkeit der jeweiligen Flächenanpassung, während der flächengewichtete Gesamt-RMS als Maß für die räumliche Stabilität und Lagerung der gesamten Pyramidengeometrie in der gefilterten LiDAR-Punktwolke dient.

Tabelle 7.7 zeigt die berechneten RMS-Werte für alle Pyramiden-Targets, die im Zuge der Auswertung bestimmt werden konnten. Sowohl die RMS-Werte der einzelnen Seitenflächen als auch die flächengewichteten Gesamtwerte liegen bei allen Targets unter 2 cm. Wie bereits bei den Kugel-Targets bestätigen auch diese Ergebnisse eine hohe interne Konsistenz sowie eine präzise geometrische Lage in den Punktwolken. Da auch die Koordinatendifferenzen zu den Referenzwerten äußerst gering ausfallen, kann die 2 cm-Grenze auch für Pyramiden-Targets als geeignetes katasterrechtliches Maximalmaß der RMS-Werte zur Genauigkeitskontrolle empfohlen werden.

Pyramiden-Target		Punktzahl			RMS [mm]			
Pkt.-Nr.	Maße [cm]	A	B	C	A	B	C	Ges
TET-003	64 x 26	64	155	106	13	15	16	15
TET-007	50 x 17	110	96	132	15	16	12	14
TET-009	50 x 14	60	67	69	16	17	17	17
TET-014	35 x 9	37	41	39	14	15	17	16

Tabelle 7.7: RMS-Werte der ausgeglichenen Pyramiden-Seitenflächen (A,B,C)

Für die photogrammetrischen COD- und CHB-Targets können der in Kapitel 4.4 eingeführte Reprojektionsfehler  $\sigma_0$  sowie der RMS-Wert der Kamerapositionen als interne Qualitätsparameter des Bündelblockausgleichs herangezogen werden. Beide Größen lassen sich nach dem finalen Bündelblockausgleich direkt aus Agisoft Metashape auslesen. Stehen zusätzlich Passpunkte (GCP) oder unabhängige Kontrollpunkte (CP) zur Verfügung, können darüber hinaus externe RMS-Werte angegeben werden, die in metrischer Form die Genauigkeit der Georeferenzierung im übergeordneten Bezugssystem beschreiben.

Tabelle 7.8 fasst die RMS-Parameter für die Bündelblockausgleichungen der P1-Aufnahmen sowie der L2-Bilddaten zusammen. Dargestellt sind alle drei Lagerungsarten der Berechnung. Bei freier Lagerung erfolgt der Ausgleich ausschließlich über die Kamerapositionen und die Targets werden nur als Kontrollpunkte verwendet. In der weichen Lagerung gehen sowohl die GNSS/IMU-Kamerapositionen als auch je vier Targets als GCPs in den Ausgleich ein. Die restlichen vier Targets dienen als Kontrollpunkte. Beim gezwängten Ausgleich wird die Blocklagerung primär über die GCPs definiert, während die Kamerapositionen nur noch eingeschränkt zur Stabilisierung beitragen.

Da katastertechnische Ergebnisse im angefelderten MGI-System für alle drei Lagerungsarten nur mithilfe der in rmGEO transformierten Kamerapositionen erzielt werden können, enthält die Tabelle ausschließlich diese Lösungen. Eine direkte Konvertierung in das landesweite Bezugssystem MGI/GK-East würde hingegen aufgrund der fehlenden lokalen Anpassung zu systematischen Verschiebungen führen, da die Bodenpasspunkte im lokalen System vorliegen. Um ebenfalls Ergebnisse im gewünschten lokalen System zu erreichen, kann dies somit nur durch einen Ausgleich unter Zwang gelingen.

Sowohl für die P1 als auch für die Kamera der L2 liegen die internen Genauigkeitsparameter in einem sehr guten Bereich. Der Reprojektionsfehler  $\sigma_0$  beträgt maximal 0,32 px und der CAM-RMS liegt stets unter 1,5 cm. Deutliche Unterschiede zeigen sich jedoch in den externen Qualitätsparametern: Bei der L2 erreicht der CP-RMS im freien Ausgleich nahezu einen halben Meter und bleibt selbst unter Einbeziehung von Passpunkten nur geringfügig unter 5 cm. Die P1 weist hingegen eine deutlich höhere Modellpräzision auf. Die RMS-Werte der Pass- und Kontrollpunkte betra-

gen maximal 15 mm. Lediglich beim rein inertialen Bündelblockausgleich erhöht sich der CP-RMS auf 74 mm. Ursache hierfür sind die am Flugende gelegenen Targets COD-017 und CHB-018, die bereits in den Koordinatendifferenzen auffällig waren. Nach Ausschluss dieser Punkte reduziert sich der CP-RMS auch im freien Bündelblockausgleich auf 22 mm.

Bündelblockausgleich Präzision				$\sigma_0$	Cam-RMS	GCP-RMS	CP-RMS
Cam	Lagerung	CHB	COD	[px]	[mm]	[mm]	[mm]
P1	frei	CP	CP	0,202	14	—	74
P1	weich	GCP	CP	0,202	15	7	13
P1	weich	CP	GCP	0,202	15	9	14
P1	gezwängt	GCP	CP	0,201	—	3	14
P1	gezwängt	CP	GCP	0,201	—	2	15
L2	frei	CP	CP	0,316	13	—	467
L2	weich	GCP	CP	0,316	14	3	44
L2	weich	CP	GCP	0,316	14	4	52
L2	gezwängt	GCP	CP	0,314	—	1	46
L2	gezwängt	CP	GCP	0,314	—	1	48

Tabelle 7.8: RMS-Qualitätsparameter nach dem Bündelblockausgleich in Abhängigkeit von der verwendeten Kamera und der gewählten Datumslagerung

### 7.3.4 Erkenntnisse und Schwierigkeiten

Sowohl die Pyramiden- als auch die Kugel-Targets, ebenso wie die programmierten Ausgleichsalgorithmen, zeigten eine hohe Zuverlässigkeit und lieferten konsistente, präzise Ergebnisse. Der verwendete weiße Bodenmarkierungsspray trug maßgeblich zur Verbesserung der LiDAR-Rückstreuung bei und wirkte sich somit positiv auf die Genauigkeit der berechneten Targetkoordinaten aus. Es zeigte sich jedoch, dass eine ungehinderte Sichtlinie zwischen UAV-LiDAR-Sensor und Target eine grundlegende Voraussetzung für eine erfolgreiche Punktgenerierung darstellt. Abbildung 7.7a zeigt eine kleine Öffnung in den Baumkronen, die sich exakt über dem Pyramiden-Target TET-016 befindet. Da die Flugbahn des UAVs nicht unmittelbar über diese Öffnung verlief, wurden zahlreiche Laserimpulse bereits von Ästen und Blättern reflektiert, bevor sie den Boden erreichen konnten. In der resultierenden LiDAR-Punktwolke (Abbildung 7.7b ist an der Position der rosa markierten Punkte daher keine erkennbare Targetstruktur oder Punktanhäufung sichtbar. Das Target wurde folglich nicht erfasst und konnte, ebenso wie TET-011, nicht berechnet werden. Die Position des TET-016 wurde ebenfalls in Abbildung 7.5 markiert, welche nochmals die unpassende Fluglinie und die dichten Baumkronen in diesem Bereich verdeutlicht.



(a) Baumkronen über TET-016

(b) Eigentliche Target Position (rosa)

Abb. 7.7: Fehlendes Pyramiden-Target TET-016 in LiDAR-Punktwolke

### 7.3.5 Wirtschaftliche Aspekte

Für die Vermessung des rund 350 m langen Testgebiets wurden etwa 40 Minuten für das Auslegen und Einsammeln der UAV-Targets benötigt. Die jeweils rund neunminütigen UAV-Flüge führten zu einer gesamten Messzeit von etwa einer Stunde. Die terrestrische Referenzmessung, bestehend aus der GNSS-Bestimmung der Polygonpunkte und der Aufnahme des Polygonzugs, beanspruchte hingegen rund drei Stunden und damit deutlich mehr Zeit. Zudem werden terrestrische Waldvermessungen häufig von zwei Fachkräften durchgeführt, da Messungen mit einer Einmann-Totalstation aufgrund eingeschränkter Sichtlinien und schwieriger Geländebedingungen erheblich mehr Zeit in Anspruch nehmen können. Der zusätzliche Personalaufwand erhöht die Gesamtkosten, wodurch sich insbesondere bei Katastervermessungen von Forstgebieten oder längeren Güterwegen der Einsatz von UAV-Systemen wirtschaftlich lohnen kann. Neben den Anschaffungskosten eines UAV-Systems sind jedoch auch die gesetzlichen Rahmenbedingungen (Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems) sowie die daraus resultierenden Einschränkungen der Einsatzmöglichkeiten zu berücksichtigen.

Der derzeit größte Nachteil von UAV-Messungen liegt in der aufwendigen Datenverarbeitung. Diese Arbeit zeigt sehr deutlich den erheblichen Mehraufwand, der erforderlich ist, um die Auswertung der Messdaten zusätzlich nach katasterrechtlichen Gesetzen durchzuführen. Eine angepasste Softwarelösung mit integriertem Workflow könnte die dabei auftretenden Probleme deutlich reduzieren.

## 8 Conclusio

Ziel dieser Arbeit war es, die Eignung und Genauigkeit UAV-gestützter Messverfahren für Anwendungen im Katasterwesen zu untersuchen. Im Mittelpunkt stand die Frage, ob mit modernen UAV-Systemen, insbesondere UAV-LiDAR und UAV-Photogrammetrie, eine reproduzierbare Einzelpunktbestimmung mit einer Lageabweichung von höchstens 5 cm erreicht werden kann. Diese Genauigkeitsanforderung entspricht der in der österreichischen Vermessungsverordnung festgelegten Toleranzgrenze für Kontrollmessungen von Grenzpunkten und stellt somit eine praxisrelevante Zielgröße für UAV-basierte Katastervermessungen dar. Neben der Toleranzgrenze für Grenzpunkte wird durch eine maximale mittlere Punktlagegenauigkeit von 2 cm auch eine interne Präzisionsgrenze für satellitengestützte Messungen festgelegt. Aus diesem Grund wurde ergänzend untersucht, wie UAV-basierte Messungen künftig katasterrechtlich integriert werden könnten und welche internen Qualitätsparameter hierfür geeignet wären.

Die Überprüfung dieser Fragestellungen erfolgte durch den Vergleich von UAV-basierten Punktbestimmungen mit stabilen terrestrischen Referenzwerten. Die UAV-Datenerfassung erfolgte dabei mit einer DJI Matrice 350, ausgestattet mit dem Zenmuse L2-LiDAR-Sensor beziehungsweise der Zenmuse P1-Kamera für photogrammetrische Aufnahmen. Für eine präzise geometrische Auswertung der Messdaten und einer Genauigkeitssteigerung der Einzelpunktbestimmung wurden hierfür spezifische Zielkörper entwickelt. Kugel- und Pyramidentargets für UAV-LiDAR sowie codierte Targets für UAV-Photogrammetrie wurden eigens im 3D-Druck gefertigt, geometrisch optimiert und mit selbst entwickelten MATLAB-Ausgleichsprogrammen analysiert.

Die Kugel-Targets wurden auf Grundlage der allgemeinen Kugelgleichung mithilfe eines robusten LMS-RANSAC-Verfahrens berechnet, wobei als inneres Präzisionsmaß ein räumlicher Positionsfehler definiert wurde. Der Pyramidenausgleich erfolgte ebenfalls in einem robusten LS-RANSAC-Ansatz, bei dem zunächst die einzelnen Seitenflächen ausgeglichen und anschließend die Pyramidenspitze durch den Schnitt dieser Ebenen bestimmt wurde. Als interner Qualitätskennwert wurde ein flächengewichteter RMS der Seitenebenen eingeführt. Die codierten Targets für die UAV-Photogrammetrie erforderten hingegen keine eigene Programmierung, da sie in Agisoft Metashape automatisch ausgewertet werden. Zusätzlich liefert Agisoft RMS-Parameter, welche als interne und externe Genauigkeitsgrößen dienen.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit lag in der Entwicklung eines MATLAB-Programms zur zweidimensionalen Netzausgleichung mit integrierter, robuster Ausreißererkenkung. Der rund 2 700 Zeilen umfassende Code beinhaltet neben der eigentlichen Ausgleichsroutine auch Funktionen zur Iterationssteuerung, zur automatisierten Ausreißeridentifikation, zur adaptiven Gewichtungsanpassung, zur grafischen Visualisierung sowie zur Analyse von Qualität, Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Das Programm wurde zur Auswertung der terrestrischen Netzmessungen eingesetzt, um präzise und ausreißerfreie Referenzkoordinaten zu bestimmen, die als Grundlage für den Vergleich und die Bildung der Koordinatendifferenzen zu den UAV-Ergebnissen dienten.

Die Ergebnisse der UAV-LiDAR-Auswertungen zeigen, dass mit den entwickelten Targets Lage- und Höhenabweichungen von unter 2,5 cm erzielt werden können. Die berechneten internen Qualitätsparameter bestätigen die hohe Stabilität der Ausgleichsalgorithmen sowie die gute Reproduzierbarkeit der Messungen. Für präzise Ergebnisse sind jedoch ausreichende Sichtlinien zwischen Scanner und Target sowie eine geeignete Targetgröße entscheidend. Selbiges gilt in noch größerem Maße für die Photogrammetrie, da das entsprechende Target in mindestens zwei Bildern identifizierbar sein muss. Durch das Besprühen der Zielkörper mit weißem Markierspray konnte die Punktdichte erhöht und die Flächenanpassung deutlich verbessert werden. Zur Einhaltung der geforderten Genauigkeiten werden maximale Fluggeschwindigkeiten unter 7 m/s und Flughöhen unter 60 m empfohlen. Höhere Werte führen zu größeren Unsicherheiten und verringern die Reliabilität der Ergebnisse. Unter den genannten Bedingungen lagen sämtliche Differenzen in Lage und Höhe innerhalb von 2,5 cm. Damit konnte die Hypothese bestätigt werden, dass UAV-LiDAR-Messungen eine Einzelpunktbestimmung mit einer Lagegenauigkeit von höchstens 5 cm reproduzierbar ermöglichen.

Auch die photogrammetrischen Untersuchungen lieferten sehr positive Ergebnisse. Die neu entwickelten, codierten 3D-Druck-Targets erwiesen sich dabei als gleichwertig zu den klassischen Schachbrettmustern. Für die Kamera des Zenmuse L2-LiDAR konnte gezeigt werden, dass katastergenaue Auswertungen nur bei Einbeziehung von Bodenpasspunkten möglich sind. Sowohl für die L2-Aufnahmen als auch die P1-Bilddateien wurden bei gezwängten Bündelblockausgleichungen Abweichungen von unter 1 cm erzielt. Für Messungen bei direkter Georeferenzierung wird hingegen stets die hochauflösende P1-Kamera empfohlen. Selbst bei linearen Flugstreifen lagen die Differenzen im mittleren Flugbereich unter 2,5 cm. Lediglich in den Randbereichen traten bei diesen Auswertungen erhöhte Koordinatendifferenzen auf. Es wird daher empfohlen, lineare Flugstrecken an den Enden um ein bis zwei Bodenpasspunkte zu ergänzen oder die Flugplanung durch zusätzliche Querstreifen

zu stabilisieren. Werden diese Rahmenbedingungen eingehalten, ist eine kataster-taugliche Vermessung auch bei direkter Georeferenzierung ohne GCPs möglich. Die Hypothese, dass UAV-Photogrammetrie eine reproduzierbare Punktbestimmung mit einer Lagegenauigkeit von höchstens 5 cm ermöglicht, konnte somit ebenfalls bestätigt werden. Gleichzeitig widerlegen die Ergebnisse die in § 1 Abs. 8 der Vermessungsverordnung enthaltene Annahme, dass photogrammetrisch bestimmte Einschaltpunkte eine Punktlagegenauigkeit von 3 cm nicht erreichen können. Moderne UAV-Systeme mit GNSS/IMU-Integration, stabiler Kamerakalibrierung und präziser Bündelblockausgleichung erfüllen diese Genauigkeitsanforderung heute problemlos und übertreffen sie in vielen Fällen sogar.

Die Untersuchungen verdeutlichen das große Potenzial UAV-gestützter Katastervermessungen. Besonders in Gebirgstälern und Forstgebieten, in denen GNSS-Messungen aufgrund von Abschattungen häufig nicht möglich sind, bieten UAV-Systeme eine erhebliche Zeit- und Kosteneinsparung. Lange Festpunktanschlüsse oder Polygonzüge, die in solchen Gebieten zur Einmessung von Katastergrenzen erforderlich sind, können durch UAV-Befliegungen in deutlich kürzerer Messzeit erfasst werden – ohne Einbußen bei der Genauigkeit.

Der derzeit größte Nachteil liegt noch im komplexen Datenworkflow. Die Prozessierung von LiDAR-Punktwolken, die manuelle Extraktion der Targets und die Durchführung der Ausgleichungen erfordern aktuell den Einsatz mehrerer Softwarelösungen und Zwischenschritte. Eine integrierte, katasterkonforme Softwareumgebung, die UAV-Datenerfassung, Punktwolkenprozessierung und geodätische Auswertung vereint, würde den praktischen Einsatz erheblich vereinfachen und könnte zur standardisierten Verwendung von UAVs im Katasterwesen beitragen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass UAV-gestützte Katastervermessungen bei sorgfältiger Flugplanung, geeigneten Zielmarken und einer robusten Auswertung die gesetzlich geforderte Genauigkeit zuverlässig erreichen können – vorausgesetzt, die Zielpunkte sind für die Sensorik hinreichend sichtbar. Damit stellen UAV-Systeme eine technisch und wirtschaftlich effiziente Ergänzung zur klassischen terrestrischen Vermessung dar, insbesondere in topografisch anspruchsvollem oder bewaldetem Gelände.

Zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sollten sich auf die automatisierte Erkennung von 3D-Targets, die Entwicklung kombinierter und katasterkonformer LiDAR-Photogrammetrie-Software sowie auf die Definition einheitlicher Qualitätsparameter konzentrieren, um UAV-Messungen langfristig als anerkanntes und rechtssicheres Messverfahren im Katasterwesen zu etablieren.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Historische Entwicklung der Genauigkeit von UAV-Systemen . . . . .	2
4.1	Protokollausschnitt: Gewichtungstufen für auffällige Beobachtungen anhand geschätzter Standardabweichungen für Richtungen und Distanzen . . . . .	18
4.2	Codeausschnitt: Einstellungen für die Berechnung der Ausreißer-Scores	21
4.3	Protokollausschnitt: Score-Analyse im Iterationsschritt zur Beurteilung der auffälligsten Beobachtung des letzten Ausgleichsergebnis .	22
4.4	Protokollausschnitt: Qualitätsbeurteilung mit den Standardkriterien Hauptprobe, Ausreißerdetektion und Konfidenzellipsen ( $S = 95\%$ ) .	23
4.5	Protokollausschnitt rmGEO: Absolutglieder für Distanzen . . . . .	25
4.6	Protokollausschnitt rmGEO: Absolutglieder für Richtungen . . . . .	26
4.7	Netzplot nach dem Ausgleich in rmGEO inklusive Fehlerellipsen . .	28
4.8	Netzplot nach dem Ausgleich in MATLAB inklusive Konfidenzellipsen	29
4.9	Kugel-Ausgleichsprozess mit einer hochauflösenden Punktwolke . . .	32
4.10	Kugel-Ausgleichsprozess mit einer UAV-Punktwolke . . . . .	34
4.11	Pyramiden-Ausgleichsprozess mit einer hochauflösenden Punktwolke	35
4.12	Pyramiden-Ausgleichsprozess mit einer UAV-Punktwolke . . . . .	39
5.1	Schottergrube und UAV-Targetbezeichnungen . . . . .	40
5.2	Photogrammetrische Targets . . . . .	41
5.3	Gesamter Aufbau eines Kugel-Target . . . . .	42
5.4	Pyramiden-Target mit schwarzer Bodenplatte . . . . .	43
5.5	Datumstransformation zur lokalen Anfelderung . . . . .	45
5.6	Netzplot der Schottergrube nach dem Netzausgleich . . . . .	46
5.7	Berechnete Transformationsparameter im DJI Terra . . . . .	47
5.8	LiDAR-Punktwolke der Schottergrube mit Intensitätsinformation .	48
5.9	Darstellung der Schottergrube anhand verwendeter Verknüpfungspunkte . . . . .	49
6.1	Güterweg und UAV-Targetbezeichnungen . . . . .	56
6.2	COD-Target aus 3D-Druck . . . . .	57
6.3	Kugel-Target aus 3D-Druck . . . . .	57
6.4	4-teiliges Pyramiden-Target aus dem 3D-Drucker . . . . .	58

6.5	Erweitertes 4-teiliges Pyramiden-Target aus dem 3D-Drucker . . . . .	59
6.6	Netzplot des Güterweges nach dem Netzausgleich . . . . .	61
6.7	Prozessierte LiDAR-Punktwolke des Güterweges mit RGB-Information	62
6.8	Darstellung des Güterwegs anhand verwendeter Verknüpfungspunkte	63
6.9	Durchschnittliche Lagedifferenz $\Delta_{yx}$ in <i>cm</i> der Pyramiden-Targets in Abhängigkeit von Flug, Transformation und Intensität-Filter . .	68
6.10	Durchschnittliche Lagedifferenz $\Delta_{yx}$ in <i>cm</i> der Kugel-Targets in Abhängigkeit von Flughöhe, Geschwindigkeit und Intensität-Filter .	71
7.1	Forststraße und UAV-Targetbezeichnungen . . . . .	75
7.2	Baumkronen entlang der Forststraße . . . . .	76
7.3	Datumstransformation zur lokalen Anfelderung . . . . .	78
7.4	Netzplot der Forststraße nach dem Netzausgleich . . . . .	79
7.5	Prozessierte LiDAR-Punktwolke mit RGB-Information und Flugroute	80
7.6	Darstellung der Forststraße anhand verwendeter Verknüpfungspunkte	81
7.7	Fehlendes Pyramiden-Target TET-016 in LiDAR-Punktwolke . . . . .	88

# Tabellenverzeichnis

4.1	Originale und systematisch verrauschte Messdaten . . . . .	24
4.2	Vergleich der berechneten Näherungskordinaten . . . . .	25
4.3	Eliminierungen rmGEO . . . . .	26
4.4	Eliminierungen MATLAB . . . . .	26
4.5	Vergleich der Ausgleichs anhand der Lagedifferenzen $\Delta_{yx}$ . . . . .	28
5.1	RMS und Projektionsanzahl der Passpunkte nach der Auswertung .	50
5.2	Koordinatendifferenzen $\Delta_{yx}$ in <i>mm</i> nach der Auswertung . . . . .	51
6.1	Flugkonfigurationen und Kennwerte der einzelnen Flüge . . . . .	60
6.2	Lagedifferenz $\Delta_{yx}$ in <i>mm</i> zur Referenzmessung für Punkt TET-003 in Abhängigkeit von Flug, Transformation und Intensität-Filter . .	64
6.3	Lagedifferenz $\Delta_{yx}$ in <i>mm</i> zur Referenzmessung für Punkt TET-005 in Abhängigkeit von Flug, Transformation und Intensität-Filter . .	65
6.4	Lagedifferenz $\Delta_{yx}$ in <i>mm</i> zur Referenzmessung für Punkt TET-008 in Abhängigkeit von Flug, Transformation und Intensität-Filter . .	65
6.5	Lagedifferenz $\Delta_{yx}$ in <i>mm</i> zur Referenzmessung für Punkt TET-012 in Abhängigkeit von Flug, Transformation und Intensität-Filter . .	66
6.6	Lagedifferenz $\Delta_{yx}$ in <i>mm</i> zur Referenzmessung für Punkt TET-014 in Abhängigkeit von Flug, Transformation und Intensität-Filter . .	67
6.7	Lagedifferenz $\Delta_{yx}$ in <i>mm</i> zur Referenzmessung für Punkt KUG-004 in Abhängigkeit von Flug, Transformation und Intensität-Filter . .	69
6.8	Lagedifferenz $\Delta_{yx}$ in <i>mm</i> zur Referenzmessung für Punkt KUG-009 in Abhängigkeit von Flughöhe, Geschwindigkeit und Intensität-Filter	70
6.9	Lagedifferenz $\Delta_{yx}$ in <i>mm</i> zur Referenzmessung für Punkt KUG-013 in Abhängigkeit von Flug, Transformation und Intensität-Filter . .	70
6.10	Lagedifferenz $\Delta_{yx}$ in <i>mm</i> zur Referenzmessung für CHB-Targets . .	73
6.11	Lagedifferenz $\Delta_{yx}$ in <i>mm</i> zur Referenzmessung für COD-Targets . .	73
6.12	Lagedifferenz $\Delta_{yx}$ in <i>mm</i> zur Referenzmessung für CHB-Targets . .	73
6.13	Lagedifferenz $\Delta_{yx}$ in <i>mm</i> zur Referenzmessung für COD-Targets . .	73
6.14	Vergleich der Ergebnisse bei Intensitätsfilterung $I > 10000$ für idente Targets mit Besprühung des weißen Markierspray und ohne . . . . .	74
7.1	Abmessungen der entwickelten Pyramiden-Targets . . . . .	77

7.2	Koordinatendifferenzen der Kugel-Targets zur Referenzmessung . . .	82
7.3	Koordinatendifferenzen der Pyramiden-Targets zur Referenzmessung	82
7.4	Koordinatendifferenzen der CHB-Targets zur Referenzmessung . . .	83
7.5	Koordinatendifferenzen der COD-Targets zur Referenzmessung . . .	83
7.6	Mittlere Lage- und Positionsfehler der ausgeglichenen Kugel-Targets	85
7.7	RMS-Werte der ausgeglichenen Pyramiden-Seitenflächen (A,B,C) .	86
7.8	RMS-Qualitätsparameter nach dem Bündelblockausgleich in Abhängigkeit von der verwendeten Kamera und der gewählten Datumslagerung . . . . .	87

# Literatur

- Baarda, W. (1968). *A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks* (Bd. 2). Netherlands Geodetic Commission.
- Böhm, J. (2020). Grundzüge der Höheren Geodäsie.
- Brunn, A. (2024). Fehlertheorie und Ausgleichsrechnung. <https://oer.vhb.org/edu-sharing/components/render/9ee25ba2-8f65-4896-86da-1076cd960700>
- Bundesgesetz über die Landesvermessung und den Grenzkataster (Vermessungsgesetz – VermG) [Österreich]. (1968). <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10011400>
- Caspary, W. (2002). Kinematische Messmethoden. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv)*, 127(5), 281–290. [https://www.unibw.de/geoinformatik/publikationen-und-vortraege/pdf-dateien-wissenschaftliche-publikationen/zfv\\_2002\\_5\\_281-290-caspary.pdf](https://www.unibw.de/geoinformatik/publikationen-und-vortraege/pdf-dateien-wissenschaftliche-publikationen/zfv_2002_5_281-290-caspary.pdf)
- Dornmayr, H., & Riepl, R. (2024). *Unternehmensbefragung zum Arbeits- und Fachkräftebedarf/-mangel in Österreich 2024*. Institut für Bildungsforschung der Wirtschaft (ibw). <https://ibw.at/publikationen/id/577/>
- DVW. (2020). *UAV 2020 – The Sky is the Limit?* [https://geodaesie.info/images/schriftenreihe/downloads/DVW\\_97\\_2020\\_UAV\\_2020\\_FINAL\\_200214.pdf](https://geodaesie.info/images/schriftenreihe/downloads/DVW_97_2020_UAV_2020_FINAL_200214.pdf)
- Eltner, A., Hoffmeister, D., Kaiser, A., Karrasch, P., Klingbeil, L., Stöcker, C., & Rovere, A. (Hrsg.). (2022). *UAVs for the Environmental Sciences: Methods and Applications*. wbg Academic – Wissenschaftliche Buchgesellschaft. <https://doi.org/10.53186/1028514>
- Freeden, W., & Rummel, R. (Hrsg.). (2018). *Handbuch der Geodäsie*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46900-2>
- Gojcic, Z., Böhm, J., & Wujanz, M. (2019). Comparison of GNSS-, TLS- and Different Altitude UAV-Generated Datasets on the Basis of Spatial Diffe-

- rences. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(4), 175. <https://doi.org/10.3390/ijgi8040175>
- Gruber, F., & Joeckel, R. (2022). *Formelsammlung für das Vermessungswesen, 21. Auflage*. Springer Vieweg.
- Heck, B., & Hager, H. (2018). *Ausgleichsrechnung: Grundlagen, Verfahren, Anwendungen* (4. Aufl.). Wichmann Verlag.
- Heipke, C. (Hrsg.). (2017). *Photogrammetrie und Fernerkundung: Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel*. Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-47094-7>
- Heunecke, O., Kuhlmann, H., Welsch, W., Eichhorn, A., & Neuner, H. (Hrsg.). (2000). *Handbuch Ingenieurgeodäsie: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen*. Wichmann Verlag.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and More*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73013-3>
- Huber, P. J. (1964). Robust Estimation of a Location Parameter. *Annals of Mathematical Statistics*, 35(1), 73–101. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177703732>
- Kemkes, E., Zimmermann, K., & Rüffer, J. (2018). cm-GNSS im Wald – ein Wunschtraum. *VDV-Magazin*, 2, 24–28. [https://www.allsat.de/wp-content/uploads/2018/10/201804\\_GNSS\\_im\\_Forst\\_VDV-Magazin\\_2-2018.pdf](https://www.allsat.de/wp-content/uploads/2018/10/201804_GNSS_im_Forst_VDV-Magazin_2-2018.pdf)
- Koch, K.-R. (1999). *Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03976-2>
- Krarup, T., Juhl, J., & Kubik, K. (1980). Theory of Least Squares Collocation: A Review and a Study of Accuracy. *Report of the Danish Geodetic Institute*, 35, 1–43.
- Leica Viva GS14 Data Sheet*. (2016). Leica Geosystems AG. [https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica\\_viva\\_gs14\\_ds.ashx](https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica_viva_gs14_ds.ashx)
- Leica Viva TS15 Datenblatt*. (2010). Leica Geosystems AG. [https://www.geoaxis.de/manuals/viva/br/ts15/ts15\\_ds\\_de.pdf](https://www.geoaxis.de/manuals/viva/br/ts15/ts15_ds_de.pdf)

- Matrice 350 RTK - Technische Daten.* (2023). DJI Enterprise. <https://enterprise.dji.com/de/matrice-350-rtk/specs>
- Niemeier, W. (2008). *Ausgleichsrechnung – Statistische Auswertemethoden* (2. Aufl.). de Gruyter.
- Rousseeuw, P. J. (1984). Least Median of Squares Regression. *Journal of the American Statistical Association*, 79(388), 871–880. <https://doi.org/10.1080/01621459.1984.10477105>
- Staffas, A., O’Driscoll, C., Li, Y., Ren, M., Huth, M., Padmanabhan, S., Krstajić, N., & Buller, G. S. (2024). Frequency modulated continuous wave and time of flight LIDAR with single photons: a comparison. *Optics Express*, 32(5), 7332–7348. <https://doi.org/10.1364/OE.518398>
- Verordnung des Bundesministers für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft über Vermessungen und Pläne (Vermessungsverordnung 2016 – VermV 2016) [Österreich]. (2016). <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20009675>
- Wing, M. G., Eklund, A. E., & Kellogg, L. D. (2005). Effects of Forest Environment and Survey Protocol on GPS Accuracy. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 71(8), 907–916. <https://doi.org/10.14358/PERS.71.9.1071>
- Yeo, J., Hwang, H., Kim, D., & Lim, S. (2021). Sensors and Measurements for UAV Safety: An Overview. *Sensors*, 21(23), 1–26. <https://doi.org/10.3390/s21248253>
- Zeger, J. (1971). Fehlergrenzen für langseitige Polygonzüge. *Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen*, 59(2), 50–54. <https://www.ovg.at/de/bibliothek/vgi-die-zeitschrift/files/pdf/4136>
- Zenmuse L2 - Technisches Datenblatt.* (2023). DJI Enterprise. [https://dl.djicdn.com/downloads/Zenmuse\\_L2/20231017/Zenmuse\\_L2\\_Specs\\_EN.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/Zenmuse_L2/20231017/Zenmuse_L2_Specs_EN.pdf)
- Zenmuse P1 - Datenblatt.* (2020). DJI. <https://enterprise.dji.com/zenmuse-p1/specs>