



# Master Thesis

im Rahmen des

Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“  
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z\_GIS)  
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

„Optimierung der UAV-gestützten Erfassung von sicherheitsrelevanter  
Vegetation an Bahnstrecken unter Einsatz von Nadir- und Oblique-  
Aufnahmen.“

vorgelegt von

**Stefan Wurmser**

640232, UNIGIS MSc Jahrgang 2018

Betreuer/in:

Univ.-Prof. Mag. Dr. Thomas Blaschke

Zur Erlangung des Grades

„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc (GIS)“

Finning, 30.03.2021

## Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich recht herzlich bei Allen, die diese Arbeit unterstützt haben und maßgeblich zu ihrer erfolgreichen Fertigstellung beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt Florian Seibel von Quantum-Systems, der es mir ermöglicht hat, wann immer ich im Rahmen dieser Arbeit eine Befliegung durchführen musste, auf eine Trinity F90+ zurückgreifen konnte, sowie Sebastian Sattler, der mir die spezielle, schwenkbare Payload für die Sony UMC gebaut hat, die mir in den letzten Monaten hervorragende Dienste geleistet hat. Weiterhin bedanke ich mich bei Irmgard Runkel (GEOSYSTEMS) für die tollen Ideen zur Umsetzung der Arbeit, Dejan Dragic (Phase One) für Rat und Tat bei der Vermessung der Checkpoints, Martin Herkommer (Quantum-Systems) für die Unterstützung bei der professionellen Anwendung von Agisoft Metashape, Alexander Wolf (Ingenieurbüro Wolf) für die Hilfe bei der Auswertung der erhobenen Daten und Freddy Watzka (Quantum-Systems) für die hervorragenden Fotos und Filmaufnahmen.

Vor allem aber bedanke ich mich bei Matthias Maier von der DB Fahrwegdienste GmbH, der mir über den ganzen Zeitraum der Bearbeitung umfassend mit Rat und Tat zur Seite stand und durch seine Anregungen und seine ständige Diskussionsbereitschaft wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

## Erklärung der eigenständigen Abfassung der Arbeit

Hiermit erkläre ich, dass diese vorliegende Masterthesis ohne fremde Hilfe und selbstständig verfasst wurde. In der Bearbeitung und Abfassung wurden keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet. Alle wörtlichen und sinngemäßen Zitate wurden als solche gekennzeichnet und sind im Literaturverzeichnis aufgeführt. Diese vorliegende Masterthesis wurde noch nicht veröffentlicht und für Prüfungszwecke vorgelegt.

---

Ort, Datum

---

Stefan Wurmser

## Zusammenfassung

Ziel der Arbeit ist die Überprüfung der These, dass ein Bahnstreckenmonitoring mit zwei gleichzeitig geflogenen Kameras vom gleichen Typ nicht nur eine erhebliche Zeiteinsparung mit sich bringt, sondern auch eine erhöhte Qualität der aufgenommenen Daten zur Folge hat. Weiterhin gilt es zu überprüfen, ob mit der kombinierten Methode von Nadir- und Schrägaufnahme ein Verlust der Lagegenauigkeit der erhobenen Daten zu erwarten ist.

Momentan wird eine aufzunehmende Bahnstrecke mit mindestens vier parallelen Flugstreifen überflogen, um eine ausreichende Überlappung für eine photogrammetrische Auswertung zu gewährleisten. Nachteil der ausschließlichen Nadir-Aufnahmen ist neben dem relativ hohen zeitlichen Aufwand der vier Flugstrecken eine nur unzureichende Abbildung des Lichtraumprofils mit der daraus abgeleiteten Punktwolke.

Im ersten Schritt wird dafür eine Bahnstrecke mit der bisherigen Konfiguration abgeflogen und Referenzdaten aufgenommen. Aus diesen wird mit einer Auswertesoftware wie z.B. Agisoft Metashape eine dichte Punktwolke, ein DSM und ein Orthomosaik gewonnen.

Im zweiten Schritt sollte die gleiche Strecke unter vergleichbaren äußeren Bedingungen mit der gleichen Drohne mit unterschiedlich ausgerichteten Sensoren befliegen werden. Zwei Flugstrecken ebenfalls Nadir ausgerichtet und zwei Flugstrecken mit einer schräg angebrachten Kamera. Die Daten werden ebenfalls ausgewertet und hinsichtlich ihrer Lagegenauigkeit und Qualität mit den Referenzdaten verglichen.

Solche Multi-Kamera Systeme und die von ihnen aufgenommenen Nadir- und Schrägbilder sind von zunehmender Wichtigkeit für die professionelle Luftbildphotogrammetrie (WIERZBICKI 2018). Wie in professionellen photogrammetrischen Systemen ist es möglich, die footprints von Baumkronen und andere Formen der natürlichen Umgebung zu erfassen (WIERZBICKI 2018). Damit können Baumgruppen in der Nähe des Gleisbetts, welche den Bahnverkehr gefährden können identifiziert und Maßnahmen eingeleitet werden.

Die daraus resultierenden Daten werden für automatisierte Prozesse verwendet, um aussagekräftige Ergebnisse für ein weiteres Vegetationsmanagement entlang der Bahnstrecken zu erhalten.

## Abstract

The aim of the thesis is to verify the thesis that a railroad line monitoring with two cameras of the same type flown simultaneously not only saves a considerable amount of time but also results in an increased quality of the recorded data. Furthermore, it has to be checked whether a loss of positional accuracy of the collected data can be expected with the combined method of nadir and oblique recording.

Actually, a railway section to be recorded is flown with at least four parallel flight strips to ensure sufficient overlap for photogrammetric evaluation. The disadvantage of the exclusive nadir images is, besides the relatively high expenditure of time for the four flight paths, an insufficient representation of the clearance profile with the point cloud derived from it.

In the first step, a track is flown with the previous configuration and reference data are recorded. From this data, a dense point cloud, a DSM and an orthomosaic are obtained with evaluation software such as Agisoft Metashape.

In the second step, the same route should be flown under comparable external conditions with the same drone with differently aligned sensors. Two flight routes also nadir aligned and two flight routes with a camera mounted at an angle. The data are also evaluated and compared with the reference data in terms of positional accuracy and quality.

Such multi-camera systems and the nadir and oblique images taken by them are of increasing importance for professional aerial photogrammetry (WIERZBICKI 2018). As in professional photogrammetric systems it is possible to capture the footprints of tree crowns and other forms of the natural environment (WIERZBICKI 2018). This allows to identify groups of trees in the vicinity of the track bed which may endanger railroad traffic and to take measures.

The resulting data is used for automated processes to obtain meaningful results for further vegetation management along the railroad lines.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung .....</b>	<b>I</b>
<b>Erklärung der eigenständigen Abfassung der Arbeit.....</b>	<b>II</b>
<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>III</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>IV</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>X</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>1. Einleitung – Motivation für diese Arbeit .....</b>	<b>1</b>
1.1    Befliegung von Bahnstrecken mit Drohnen .....	1
1.2    Projekt FreeRail .....	1
<b>2. Der professionelle Einsatz von UAV .....</b>	<b>3</b>
2.1    Fernerkundung mit UAV.....	3
2.1.1    Missionsplanung und Befliegung.....	5
2.1.2    Photogrammetrie .....	8
2.2    BVLOS Flug.....	12
2.3    Georeferenzierung von UAV Bildern mit GCPs – PPK – RTK.....	12
2.4    Schrägluftaufnahmen mit UAV.....	14
<b>3. Vegetationsmanagement der Deutschen Bahn.....</b>	<b>18</b>
<b>4. Fragestellung der Arbeit .....</b>	<b>21</b>
<b>5. Methodische Vorgehensweise .....</b>	<b>22</b>
5.1    Ausrüstung.....	22
5.1.1    Quantum-Systems Trinity F90+ .....	22
5.1.2    Sony UMC – Schwenkbarer Eigenbau .....	23
5.1.3    Quantum-Systems iBase GNSS Receiver .....	25
5.1.4    Emlid Reach RS2 .....	26
5.2    Flugplanung mit QBase 3D .....	26
5.2.1    Bisheriger Ansatz – Vier Flugstreifen nadir .....	26
5.2.2    Experimenteller Ansatz – Zwei Flugstreifen nadir und oblique kombiniert.....	30
5.3    Anwendung des PPK Verfahrens .....	32

---

5.4	Durchführung der Befliegung .....	32
5.4.1	Auswahl der Strecke .....	32
5.4.2	Durchführung der Datenerhebung.....	33
5.4.3	Besonderheiten und Fotos .....	35
<b>6.</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>41</b>
6.1	Photogrammetrische Auswertung .....	41
6.1.1	Referenzflug – Sony UMC-R10C – Vier Flugstreifen – 90 m – nadir.....	43
6.1.2	Vergleichsflug Sony UMC-R10C– Vier Flugstreifen – 80 m – nadir .....	46
6.1.3	Vergleichsflug Sony UMC-R10C – Vier Flugstreifen – 70 m – nadir .....	47
6.1.4	Vergleichsflug Sony RX1RII – Vier Flugstreifen – 90 m – nadir.....	49
6.1.5	Messflug Sony UMC-R10C – Zwei Flugstreifen – 90 m – nadir und oblique .....	51
6.1.6	Ermittlung des optimalen Winkels .....	59
6.2	Konfidenz der Ergebnisse .....	65
6.3	Genauigkeit der Ergebnisse .....	71
<b>7</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>73</b>
7.1	Unterschiede .....	73
7.1.1	In der Genauigkeit der erhobenen Daten .....	73
7.1.2	In der Dichte der Punktwolke.....	73
7.2	Verringerung des Zeitbedarfs.....	74
7.3	Unterschiede in der Planung .....	75
7.4	Bewertung der Ergebnisse .....	75
7.5	Tabellarische Zusammenfassung.....	78
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerung und Ausblick.....</b>	<b>79</b>
8.1	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	79
8.2	Ausblick und Fortführung.....	79
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>82</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>86</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorwärts- und Seitwärtsüberlappung von Luftbildern (eigene Darstellung) .....	7
Abbildung 2: Schema des Abgleichs von Passpunkten in überlappenden Luftbildern (eigene Darstellung) .....	10
Abbildung 3: Die drei Hauptschritte in einem SfM – MVS Arbeitsablauf (eigene Darstellung) .....	11
Abbildung 4: Unterscheidung von nadir und oblique aufgenommenen Luftbildern (eigene Darstellung) .....	14
Abbildung 5: Aufnahmegeometrie von Schrägluftaufnahmen (Gerke and Vosselman 2016).....	15
Abbildung 6: Waldrand, nadir-Aufnahmen, dichte Punktwolke berechnet mit Agisoft Metashape....	16
Abbildung 7: Waldrand mit nadir und oblique-Aufnahmen, dichte Punktwolke berechnet mit Agisoft Metashape.....	16
Abbildung 8: Vegetationsschnitt an Strecken der DB (Deutsche Bahn AG / Julia Amend) .....	19
Abbildung 9: Sicherheitsrelevanter Bereich aus Sicht der Vegetationskontrolle (DB Netze. 2019) .....	20
Abbildung 10: Mögliche Strecke einer Korridormission mit der Trinity F90+ .....	23
Abbildung 11: Trinity F90+ mit manuell schwenkbarer Payload Sony UMC-R10C .....	24
Abbildung 12: Funktionsweise der Datenaufzeichnung für den PPK Prozess.....	25
Abbildung 13: Quantum-Systems iBase, mit GNSS Antenne, Kabel und Powerbank für die Stromversorgung.....	26
Abbildung 14: Beispielhafter Flugplan der DB Fahrwegdienste mit vier Flugstreifen in einer Flughöhe von 90m mit einer Bildüberlappung von 75% / 75%.....	27
Abbildung 15: Korridorbreite 120 m .....	27
Abbildung 16: Flugplanung des Referenzfluges mit den gleichen Einstellungen wie derzeit von DB Fahrwegdienste verwendet.....	28
Abbildung 17: Unterschied der Flughöhe AGL und der tatsächlichen Oberfläche (hier Baumkronen) .....	29
Abbildung 18: Schematische Darstellung der Berechnung des Winkels für die Schrägluftaufnahmen .....	30
Abbildung 19: Schematische Darstellung der Aufnahmegeometrie für nadir und oblique Aufnahmen mit einem UAV .....	31
Abbildung 20: Flugplanung mit zwei Flugstreifen .....	32
Abbildung 21: Befliegungsgebiet mit Bahngleis der S8 der Münchner Verkehrsbetriebe bei Streckenkilometer 21 .....	33
Abbildung 22: Verteilung der eingemessenen Checkpoints entlang der Versuchsstrecke.....	34
Abbildung 23: Hochgenaue Einmessung der Checkpoints mit einem Emlid Reach RS2 .....	34
Abbildung 24: Checkpoint 5, dargestellt in Agisoft Metashape .....	35
Abbildung 25: Überlagerung von SRTM-Daten und dem ESRI World Imagery Service, sowie Anzeige eines Flugpfades als KML-Datei.....	36
Abbildung 26: Überlagerung von Höhendaten der Bayerischen Vermessungsverwaltung und dem ESRI World Imagery Service, sowie Anzeige eines Flugpfades als KML-Datei .....	36
Abbildung 27: Messung des Höhenwertes am äußersten Süd-westlichen Rand des Befliegungsgebietes in den SRTM-Daten .....	37
Abbildung 28: Messung des Höhenwertes am äußersten Süd-westlichen Rand des Befliegungsgebietes in den Höhendaten der Bayerischen Vermessungsverwaltung .....	37
Abbildung 29: Höhe der Kameraposition über der Bodenoberfläche nach Google Earth.....	38
Abbildung 30: Screenshot von QBase 3D während eines Fluges über dem Untersuchungsgebiet .....	39
Abbildung 31: Einmessen eines Checkpoints neben der Bahnstrecke.....	39
Abbildung 32: Trinity F90+ im Schwebeflug.....	40
Abbildung 33: Vermessung von Checkpoints mit Emlid Reach RS2 .....	40

---

Abbildung 34: Dichte Punktwolke aus Agisoft Metashape - Flug mit vier Flugstreifen in 90 m mit rein nadir ausgerichteter Kamera.....	43
Abbildung 35: Screenshot der Planungssoftware QBase 3D mit geöffnetem Plot-Bereich und Anzeige der geschätzten Flughöhe über Startpunkt (ATO) .....	44
Abbildung 36: Perspektivischer Blick auf die Dichte Punktwolke mit Fotopositionen in Agisoft Metashape.....	44
Abbildung 37: Orthomosaik der Befliegung mit vier Flugstreifen in 90 m Flughöhe, begrenzt auf einen 120 m breiten Korridor.....	45
Abbildung 38: Das komplette Orthomosaik der Befliegung mit vier Flugstreifen in 90 m Höhe mit den Bildpositionen.....	45
Abbildung 39: Perspektivische Darstellung der Dichten Punktwolke der Befliegung mit vier Flugstreifen in 90 m Flughöhe in ArcGIS Pro.....	46
Abbildung 40: Orthomosaik der Befliegung mit vier Flugstreifen in 80 m Flughöhe, begrenzt auf einen 120 m breiten Korridor.....	47
Abbildung 41: Orthomosaik der Befliegung mit vier Flugstreifen in 70 m Flughöhe, begrenzt auf einen 120 m breiten Korridor.....	48
Abbildung 42: Detailaufnahme mit Sony UMC-R10C.....	49
Abbildung 43: Detailaufnahme mit Sony RX1RII .....	49
Abbildung 44: Aufnahme eines unbelaubten Laubbaumes und mehrerer Nadelbäume mit der Sony RX1RII aus ca. 100m Flughöhe .....	50
Abbildung 45: Dichte Punktwolke aus Agisoft Metashape - Flug mit zwei Flugstreifen in 90 m mit nadir und ca. 20° oblique ausgerichteter Kamera.....	51
Abbildung 46: Perspektivischer Blick auf die Dichte Punktwolke mit nadir und 20° geneigten Fotopositionen in Agisoft Metashape .....	51
Abbildung 47: Orthomosaik der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Flughöhe, begrenzt auf einen 120 m breiten Korridor.....	52
Abbildung 48: Mit Sony UMC-R10C aufgenommenes Bild (DSC03825) aus 90m Flughöhe mit einem Neigungswinkel von ca. 20° .....	53
Abbildung 49: Das gleiche Bild (DSC03825), dargestellt an der richtigen Stelle in der Dichten Punktwolke.....	54
Abbildung 50: Anzeige des Sichtfeldes für die obige Abbildung (DSC03825) in ArcGIS Pro .....	55
Abbildung 51: Perspektivische Darstellung der Dichten Punktwolke der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Flughöhe mit zwei Kameraausrichtungen (nadir und 20° oblique zum Gleis geneigt) in ArcGIS Pro.....	56
Abbildung 52: Dichte Punktwolke aus Agisoft Metashape - Flug mit zwei Flugstreifen in 90 m mit nadir und ca. 20° oblique ausgerichteter Kamera – zum Gleis und weg vom Gleis.....	57
Abbildung 53: Perspektivischer Blick auf die Dichte Punktwolke mit nadir und 20° geneigten Fotopositionen zum Gleis und weg vom Gleis in Agisoft Metashape.....	57
Abbildung 54: Perspektivische Darstellung der Dichten Punktwolke der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Flughöhe mit drei Kameraausrichtungen (nadir, 20° oblique zum Gleis und 20° oblique vom Gleis weg geneigt) in ArcGIS Pro .....	58
Abbildung 55: Orthomosaik der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Flughöhe, mit drei Kamerablickrichtungen, begrenzt auf einen 120 m breiten Korridor .....	58
Abbildung 56: Dichte Punktwolke bei Schnee – Flug in 90m AGL in 30m Abstand vom Gleis, nadir und 25° geneigt.....	61
Abbildung 57: Dichte Punktwolke bei Schnee – Flug in 90m AGL in 40m Abstand vom Gleis, nadir und 30° geneigt.....	62

---

Abbildung 58: Dichte Punktwolke bei Schnee – Flug in 90m AGL in 50m Abstand vom Gleis, nadir und 35° geneigt.....	63
Abbildung 59: Detailansicht des Orthomosaiks der herkömmlichen Flugplanung mit vier Flugstreifen und rein senkrecht ausgerichteten Bildern.....	64
Abbildung 60: Detailansicht des Orthomosaiks einer experimentellen Flugplanung mit zwei Flugstreifen in einem Abstand von 100 m zueinander mit zwei unterschiedlichen Kameraausrichtungen. ....	64
Abbildung 61: Konfidenzniveau der Dichten Punktwolke der Befliegung mit vier Flugstreifen in 90 m Höhe .....	65
Abbildung 62: Ausschließlich Bereiche mit hohem oder sehr hohem Konfidenzwert .....	66
Abbildung 63: Anzeige der Überlappungen im Bereich der Befliegung.....	66
Abbildung 64: Konfidenzniveau der Dichten Punktwolke der Befliegung mit vier Flugstreifen in 80 m Höhe .....	67
Abbildung 65: Konfidenzniveau der Dichten Punktwolke der Befliegung mit vier Flugstreifen in 70 m Höhe .....	67
Abbildung 66: Konfidenzniveau der Dichten Punktwolke der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Höhe – zwei Blickrichtungen der Kamera .....	68
Abbildung 67: Konfidenzniveau der Dichten Punktwolke der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Höhe – drei Blickrichtungen der Kamera .....	68
Abbildung 68: Ausschließlich Bereiche mit hohem oder sehr hohem Konfidenzwert .....	69
Abbildung 69: Anzeige der Überlappungen im Bereich der Befliegung.....	69
Abbildung 70: Konfidenzniveau der Dichten Punktwolke der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Höhe – zwei Blickrichtungen der Kamera – Abstand der Flugstreifen ca. 60m .....	70
Abbildung 71: Konfidenzniveau der Dichten Punktwolke der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Höhe – zwei Blickrichtungen der Kamera – Abstand der Flugstreifen ca. 80m .....	70
Abbildung 72: Konfidenzniveau der Dichten Punktwolke der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Höhe – zwei Blickrichtungen der Kamera – Abstand der Flugstreifen ca. 100m .....	71
Abbildung 73: Dichte Punktwolke – Flug mit zwei Flugstreifen im Abstand von 100m – Neigungswinkel der Kamera 35° .....	77

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technische Daten der Quantum-Systems Trinity F90+ .....	22
Tabelle 2: Verschiedene auf dem Markt verfügbare Oblique-Kameras für sUAS.....	24
Tabelle 3: Zusammenfassung der wichtigsten Kenngrößen der Befliegung mit vier Flugstreifen in 90 m Flughöhe.....	46
Tabelle 4: Zusammenfassung der wichtigsten Kenngrößen der Befliegung mit vier Flugstreifen in 80 m Flughöhe.....	47
Tabelle 5: Zusammenfassung der wichtigsten Kenngrößen der Befliegung mit vier Flugstreifen in 70 m Flughöhe.....	49
Tabelle 6: Zusammenfassung der wichtigsten Kenngrößen der Befliegung mit Sony RX1RII mit vier Flugstreifen in 90 m Flughöhe.....	50
Tabelle 7: Zusammenfassung der wichtigsten Kenngrößen der Befliegung mit Sony UMC-R10C mit zwei Flugstreifen in 90 m Flughöhe – nadir und 20° zur Bahnstrecke geneigt .....	56
Tabelle 8: Zusammenfassung der wichtigsten Kenngrößen der Befliegung mit Sony UMC-R10C mit zwei Flugstreifen in 90 m Flughöhe – nadir und 20° zum Gleis und 20° weg vom Gleis geneigt.....	59
Tabelle 9: Vergleich des RMSE einiger durchgeführter Flüge .....	73
Tabelle 10: Vergleich der durchschnittlichen Punktdichte einiger durchgeführter Flüge .....	74
Tabelle 11: Auflistung der GSD nach Flügen .....	76
Tabelle 12: Zusammenfassung der Ergebnisse .....	78

---

## Abkürzungsverzeichnis

ATO	Above Take Off
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
DEM	Digital Elevation Model
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
EXIF	Exchangeable Image File Format
FOV	Field Of View
GCP	Ground Control Point
GSD	Ground Sample Distance
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
Hz	Hertz
IMU	Inertial Measurement Unit
LiDAR	Light Detection and Ranging
MP	Megapixel
MSL	Mean Sea Level
MVS	Multi-view stereo
PPK	Post Processing Kinematic
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RMSE	Root Mean Square Error
RTK	Real Time Kinematic
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst
SD-Karte	Secure Digital Karte
SfM	Structure from Motion
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
SORA	Specific Operations Risk Assessment
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
sUAS	small Unmanned Aerial System
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VDOP	Vertical Dilution of Precision

## 1. Einleitung – Motivation für diese Arbeit

### 1.1 Befliegung von Bahnstrecken mit Drohnen

Gerade wenn man oft mit der Bahn unterwegs ist, oder als Pendler jeden Tag auf die Pünktlichkeit des Zuges angewiesen ist, kommen einem Meldungen wie dieser Tweet der Deutsche Bahn Verkehrsmeldungen mehr als bekannt vor: „Ein umgestürzter Baum im Gleis <sup>b</sup> ~~beeinträchtigt~~ den Bahnverkehr zwischen #Hamburg und #Lübeck. Züge des Fernverkehrs werden über Büchen umgeleitet. Verspätungen von etwa 90 Minuten sind leider“ (DEUTSCHE BAHN VERKEHRSMELDUNGEN @DB\_INFO). Die Verhinderung solcher Vorfälle und weitere Aufgaben rund um Vegetations- und Fahrwegpflege ist Aufgabe der DB Fahrwegdienste GmbH (DB NETZ AG 2019). Dabei wird immer häufiger auf unbemannte Fluggeräte, sogenannte Drohnen zurückgegriffen, da diese nach SENTHILNATH, KANDIKURI ET AL. (2017) im Gegensatz zu traditionell bemannt fliegenden und satellitengestützten Fernerkundungssystemen, eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung haben und auch unter Wolkenabdeckung arbeiten können. UAVs haben erfolgreich den Wandel zu kleineren, einfacher zu bedienenden Plattformen innerhalb der Fernerkundung geschafft (SENTHILNATH, KANDUKURI ET AL. 2017). Wie NEVALAINEN, HONKAVAARA ET AL. (2017) herausstellen, ermöglichen es sehr hochauflösende Fernerkundungsdaten von der Bestandsebene auf die Ebene einzelner Bäume zu gelangen, was bestimmte Vorteile hat, z.B. bei der Präzisionsforstwirtschaft, Forstmanagementplanung, Biomasse-Schätzung und Modellierung des Waldwachstums. Im Streckenmanagement der DB Fahrwegdienste werden Drohnen mit unterschiedlichen optischen Sensoren eingesetzt. UAS ermöglichen die On-Demand-Erfassung vieler Bilder mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung (SHEN, CAO ET AL. 2019). Darüber hinaus sind die aus Bildern abgeleiteten photogrammetrischen Punktwolken detailliert und genau (SHEN, CAO ET AL. 2019). Es kommen daher verschiedene Sensortypen zum Einsatz, die zur Aufgabenerfüllung der DB Fahrwegdienste ihren Beitrag leisten können. Es fehlt aber bisher eine praktikable Lösung, Nadir und Oblique-Aufnahmen in einem Sensor bzw. in einem Flug zu vereinen. Oblique-Aufnahmen können helfen, 3D-Punktwolken im Bereich von gleisnahen Wäldern und Gehölzen deutlich zu verbessern. Für die genaue Aufnahme von V-Profilen und U-Profilen in solchen Abschnitten sind Lücken unter den Bäumen, wie sie bei reinen Nadir-Aufnahmen häufig auftreten, sehr hinderlich. Daher gab es innerhalb der DB-Fahrwegdienste schon seit längerem Überlegungen Versuche mit einer Oblique-Kamera durchzuführen.

### 1.2 Projekt FreeRail

Im Rahmen der Forschungsinitiative mFUND fördert das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) seit 2016 Forschungs- und Entwicklungsprojekte rund um digitale datenbasierte Anwendungen für die Mobilität 4.0. Neben der finanziellen Förderung unterstützt der mFUND mit verschiedenen Veranstaltungsformaten die Vernetzung zwischen Akteuren aus Politik, Wirtschaft und Forschung sowie den Zugang zum Datenportal mCLOUD (BMVI 2020). Mein Arbeitgeber, die Quantum-Systems GmbH aus Gilching bei München nimmt als Verbundkoordinator für das Projekt FreeRail – Automatisierte Erfassung der gleisnahen Vegetation und von Unwetterschäden entlang des Streckennetzes der Deutschen Bahn mit autonom betriebenen Drohnen – an der Forschungsinitiative mFUND teil. Es ist weithin bekannt, dass die stetig nachwachsende Vegetation entlang des 34.000 KM langen Streckennetzes der Deutschen Bahn zu kontrollieren und zu pflegen, eine zeitintensive und

herausfordernde Aufgabe ist. Um der vorgeschriebenen Verkehrssicherungspflicht nachzukommen, muss mindestens einmal jährlich die Vegetation entlang des gesamten Streckennetzes von Fachpersonal inspiziert, dokumentiert und ausgewertet werden. Zeitgleich soll während dieser Kontrollarbeit der Bahnverkehr nicht gestört werden (BMVI 2020). Während des Projektes sollen die wissenschaftlich-technischen Grundlagen eines zukünftigen vollautomatisierten drohnenbasierten Systems zur digitalisierten Vegetationskontrolle und Registrierung von Schäden nach Unwetterereignissen entlang des Streckennetzes der Deutschen Bahn erarbeitet werden. Ziel ist zum einen die Konzeptionierung und Untersuchung der hierfür benötigten Technologien und Betriebsprozesse. Zum anderen soll ein funktionsfähiger Demonstrator entwickelt und an einem ausgewählten Streckenabschnitt erprobt werden (BMVI 2020). Zudem ist es für alle Projektverantwortlichen von besonderer Bedeutung, die Datenaufnahme mittels UAV selbst weiter zu verbessern und ein möglichst optimales Ergebnis für weitere Auswertungen zu erhalten. Eine Möglichkeit der Optimierung der Bilddatenaufnahme könnte die Kombination aus senkrecht und schräg aufgenommenen Bildern aus einem einzigen Flug sein. Die Drohnen sollen im Rahmen von FreeRail völlig autonom agieren, was die Möglichkeit voraussetzt, dass diese über weite Strecken ohne die visuelle Überwachung durch einen Drohnenpiloten fliegen dürfen. Hierbei ermöglicht der Einsatz von 5G-Mobilfunk eine quasi unbegrenzte Reichweite bei gleichzeitig hohem Datendurchsatz von hochauflösenden Bildern der Lage nahezu in Echtzeit.

## 2. Der professionelle Einsatz von UAV

### 2.1 Fernerkundung mit UAV

Fernerkundung ist die Wissenschaft und Kunst der Gewinnung von Informationen über ein Objekt, ein Gebiet oder ein Phänomen durch die Analyse von Daten, die von einem Gerät erfasst werden, das nicht in direktem Kontakt mit dem untersuchten Objekt, Gebiet oder Phänomen steht (LILLESAND ET AL. 2015). Für die Fernerkundung unter anderem mit UAV kommen dabei aktive und passive Fernerkundungsverfahren zum Einsatz.

Generell lässt sich die Fernerkundung nach der Verwendung aktiver und passiver Sensoren unterscheiden. Passive Sensoren messen das von der Erdoberfläche oder Atmosphäre gestreute Sonnenlicht, oder die Wärmestrahlung der beobachteten Objekte. Aktive Systeme, wie z.B. Radar und Laser senden selbst Signale aus und messen die Rückstreuung durch die beobachteten Objekte. Sie können daher auch nachts eingesetzt werden (LEXIKON DER FERNERKUNDUNG 2020)

Fernerkundung aus der Luft wurde in der Anfangszeit aus Ballons durchgeführt (CAMPBELL AND WYNNE 2011) und erlangte während des Ersten Weltkriegs zur Aufklärung gegnerischer Stellungen mit bemannten Luftfahrzeugen erste vorwiegend militärische Bedeutung. Wenige Jahre vor Ausbruch des Ersten Weltkriegs, am 23. Oktober 1911 setzte das Königreich Italien das erste Aufklärungsflugzeug, bestückt mit Kameras und Messgeräten, im Krieg gegen das Osmanische Reich ein (SIEGERT 1992). Im Zweiten Weltkrieg wurden flugzeuggetragene Aufklärungssysteme schon weit verbreitet eingesetzt und im Verlauf des Kalten Krieges entstanden bahnbrechende Systeme für den Einsatz als Fernerkundungsplattform mit denen auch die Sensoren und die Auswertetechniken immer weiter verbessert wurden. Zu den Bekanntesten und innovativsten Systemen gehören ohne Zweifel die Lockheed SR-71 Blackbird und die Lockheed U-2 Dragon Lady (CRICKMORE 2015, POLMAR 2001). Letztere erreichte bereits in den 60er Jahren aus einer Flughöhe von 70.000 ft eine Auflösung von 23 cm. Seit den 1970er Jahren werden auch Satelliten für die Fernerkundung im militärischen aber zunehmend auch zivilen Bereich eingesetzt. Am bekanntesten sind hierbei sicherlich die von der NASA betriebene Landsat-Serie (PELTON ET AL. 2013) und die von der ESA betriebene Sentinel-Serie. Die Entwicklung von immer kleineren, immer leichteren aber dafür immer leistungsfähigeren Digitalkameras und IMUs hat aber auch einen Trend zur kleinräumigeren Fernerkundung mit unbemannten Fluggeräten ermöglicht. Obwohl die räumliche Ausdehnung der Drohnenbilder kleiner als die von den Satelliten abgeleiteten Daten ist, liefern die durch Drohnen gewonnenen Informationen üblicherweise eine höhere Präzision und decken ein größeres Gebiet ab als die konventionelle Vermessung am Boden. (IZUKA, ITOH ET AL. 2018)

Wie unter anderem (TOTH AND JUTZI 2017) herausstellen, sind Unbemannte Luftfahrzeuge (UAV) zurzeit ein sehr aktuelles Thema in der Fernerkundung.

Die rasante Entwicklung und das stetige Wachstum des Anteils unbemannter Luftfahrzeuge (UAVs) als Fernerkundungsplattform sowie die Fortschritte bei der Miniaturisierung von Instrumenten und Datensystemen haben zu einer zunehmenden Verbreitung dieser Technologie in den Umwelt- und Fernerkundungswissenschaften geführt. Angesichts der gegenüber der bemannten Luftfahrt vergleichsweise niedrigen Betriebskosten und der im Gegensatz zu bodengebundenen Verkehrsformen weitgehenden Unabhängigkeit von Infrastruktur haben unbemannte Fluggeräte das Potential, nicht nur die Luftfahrtindustrie an sich, sondern den Verkehrssektor insgesamt zu revolutionieren (PHIESEL 2019). Obwohl weltweit strenge Vorschriften den breiteren Einsatz von UAVs oft noch einschränken, steigt ihre Verwendung in der Präzisionslandwirtschaft, der Ökologie, der Atmosphärenforschung, in Katastrophenschutz, ökologischem Monitoring, Forstwirtschaft, Brandüberwachung, schnellen Gegenmaßnahmen bei Katastrophen, in der geowissenschaftlichen

Forschung, bei Vulkangas-Probenahmen, der Überwachung von Gaspipelines, im Bergbau, bei humanitären Beobachtungen und biologisch/chemischen Fernerkundungsaufgaben stetig (TORO AND TSOURDOS 2018). Diese Vielzahl an Möglichkeiten der Anwendung geht einher mit weiteren Vorteilen gegenüber klassischen Fernerkundungssystemen wie bemannten Luftfahrzeugen oder Satelliten. Eine davon ist die Flughöhe, die einen erfolgreichen Bildflug auch bei bedecktem Himmel und niedrigen Wolken zulässt. UAVs fliegen typischerweise in niedriger Höhe, um Fernerkundungsdaten aufzunehmen. (OLLERO, MARTÍNEZ-DE-DIOS ET AL. 2006). Sehr hoch fliegende, überwiegend militärisch eingesetzte Drohnen der Klassen HALE (High Altitude Long Endurance) oder MALE (Medium Altitude Long Endurance) wie die Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk oder die IAI Heron sollen hier außer Acht gelassen werden. Die Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk fliegt Missionen von mehr als 32 Stunden in bis zu 60.000 ft (über 18.000 m) Flughöhe (NORTHROP GRUMMAN 2020)

Darüber hinaus können Unbemannte Luftfahrzeuge nach (TUTTĀV, MŠSŪUĀĀ. 2019) Daten bei Bedarf und mit deutlich höherer Flexibilität als andere Fernerkundungstechniken liefern. Das gilt insbesondere für Situationen mit dichter Bewölkung, wenn Satellitendaten, zumindest im optischen Bereich des Spektrums nicht zur Verfügung stehen. Auch können Flüge zur Datenaufnahme mit UAV in unregelmäßigen Abständen, aufgrund der niedrigen Flughöhe, leichter in der unmittelbaren Umgebung von Flughäfen durchgeführt werden, als dies mit bemannten Fernerkundungssystemen (Flugzeugen oder Hubschraubern) möglich wäre (TUTTĀV, MŠSŪUĀĀ. 2019). Unter anderem durch diese Vorteile wurden Unbemannte Luftfahrzeuge (UAVs) zu einem wichtigen Werkzeug für Vermessungsingenieure, Ingenieure und Wissenschaftler da die Anzahl der verfügbaren kosteneffizienten und einfach zu bedienenden Systeme rasch zunimmt. Diese Plattformen bieten eine attraktive Alternative zur Kartierung kleiner Gebiete in zentimetergenauer Auflösung. (CLEDAT, JOSPIN ET AL. 2020). Nach CLEDAT, JOSPIN ET AL. 2020 ist die Drohnenkartierung mit GNSS-gestützter Photogrammetrie damit eine hocheffiziente Methode zur Vermessung kleiner oder mittelgrosser Flächen.

Vor allem sind in diesem Bereich die Vorteile von Drohnenaufnahmen gegenüber solchen von Satelliten eindeutig: Sie liefern Bilder in besserer Auflösung (BMWİ, 2020).

Photogrammetrie mit UAV ist zudem kosteneffektiv, bietet eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung (KRAUSE, HARTMANN ET AL. 2016) sowie die Verwendung einer erhöhten Redundanz der Bildmessungen, um potenzielle Probleme bei der automatischen Luftbildtriangulation zu überwinden (HAALA AND ROTHERMEL 2012).

Nach (FLAMMINI, PRAGLIOLA ET AL. 2016) sind Drohnen im Bereich Eisenbahn hauptsächlich für folgende Anwendungen geeignet:

1. Strukturelle Überwachung, insbesondere für kritische Anlagen wie Brücken und Tunnels, zur Fehlererkennung (d.h. Diagnose/Prognostik).
2. Überwachung der Umweltsicherheit, d.h. Feuer, Explosionen, Erdbeben, Überschwemmungen und Erdbeben Erkennung entlang der Strecke.
3. Überwachung der physischen Sicherheit, d. h. Erkennung von Einbrüchen, gestohlenen oder verschobenen Gegenständen, Graffiti, etc.
4. Sicherheitsüberwachung, z.B. zur frühzeitigen Erkennung von Ausfällen an Streckenelementen/Geräten oder Hindernissen auf der Strecke.
5. Lagebeurteilung und Notfall-/Krisen Management, d.h. Überwachung von Unfallszenarien und das Eingreifen von Ersthelfern zu koordinieren.
6. Forensik, um die Ursachen von Unfällen zu erforschen, Unfallursachen zu ermitteln und das Vorhandensein gefährlicher Substanzen im Falle von CBRN (Chemical Biologische, Radiologische, Nukleare) Terroranschläge.

Zu erstens lässt sich noch das Vegetationsmanagement ergänzen, welches Grundlage für die vorliegende Arbeit ist.

### 2.1.1 Missionsplanung und Befliegung

Der Missionsplanung kommt bei UAV-Befliegungen nach wie vor eine wichtige Rolle zu. Nach (COLOMINA AND MOLINA 2014) sind die Missionsplanung und Echtzeit-Missionsmanagement der Schlüssel zu einer wettbewerbsfähigen Nutzung von UAV für Photogrammetrie und Fernerkundung. Üblicherweise fliegen UAV den voreingestellten Flugplan dann ohne weiteres Eingreifen des Piloten ab. Der Pilot überlässt die Positions- und Lageregelung vollständig der On-Board-Navigationseinheit, die einem vordefinierten Flugpfad folgt. Die Systemparameter können jederzeit an der Bodenkontrollstation überprüft werden, während das UAV in der Luft ist. Dieser Modus ist für konventionelle photogrammetrische Flüge am sinnvollsten, da er eine effiziente und genaue Navigation zu den Bildaufnahmeorten ermöglicht (EISENBEISS AND SAUERBIER 2011).

Die Flugplanung vor der Bildaufnahme ist essenziell für die Orientierung der Luftbilder und die anschließende Generierung von photogrammetrischen Produkten (EISENBEISS AND SAUERBIER 2011). Die Flugplanung und Flugdurchführung lassen sich in verschiedene Bereiche unterteilen, welche getrennt voneinander betrachtet werden können.

- Gelände

Gerade dem Gelände kommt üblicherweise bei der Planung von Drohnenflügen mit der Absicht Bilder für die Erzeugung photogrammetrischer Produkte aufzunehmen, eine sehr große Bedeutung zu. Mit unterschiedlichem Abstand von der Bodenoberfläche schwankt die GSD mitunter enorm. Bei der Aufnahme von linearer Infrastruktur und insbesondere von Bahngleisen tritt dieser Aspekt jedoch weitgehend in den Hintergrund, da Gleise üblicherweise nur ein sehr moderates Gefälle aufweisen dürfen. Hierzu ein Auszug aus der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung: „Die Längsneigung auf freier Strecke soll bei Neubauten 12,5 von Tausend 40 von Tausend nicht überschreiten.“ (BMJV 1967).

- Wetter

Die aktuellen Luftfahrtvorschriften regeln nicht viele der Wettergefahren für sUAS (RANQUIST, STEINER ET AL. 2017) Auch nach der am 01. Januar 2021 in Kraft getretenen EU-Drohnenverordnung können Nebel oder Wolken kaum die Bedienung eines UAV beeinträchtigen, da Flüge außerhalb der Sichtbedingungen nicht erlaubt sind. Das Standardszenario 1 („STS-01“) umfasst den Betrieb in direkter Sicht („VLOS“), der in einer Höhe von höchstens 120 m über einem kontrollierten Bereich am Boden in besiedelter Umgebung unter Verwendung eines UAS der CE-Klasse C5 durchgeführt wird (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2020). Dies schließt effektiv Wetter aus, das Wolken enthält oder die Sicht anderweitig einschränkt, aber es betrifft nicht solche Sicherheitsrisiken, die auch bei klarem Himmel auftreten können. Die wichtigsten Wetterphänomene, die in diese Kategorie fallen, sind Blendung, Wind und Turbulenzen, Temperaturextreme, Feuchtigkeit und Sonnenstürme. Da es Piloten rechtlich freisteht, unter diesen Bedingungen zu fliegen, ist es von höchster Priorität zu verstehen welche Auswirkungen diese Wetterbedingungen auf sUAS und ihren Betrieb haben (RANQUIST, STEINER ET AL. 2017).

Normalerweise haben UAVs die geringere Fluggeschwindigkeit, das geringere Startgewicht, kleinere Größe und geringere Flughöhe als bemannte Flugzeuge. Diese Faktoren machen UAVs anfälliger für die Störungen durch den Wind (WANG, WANG ET AL. 2019).

- Hindernisse bei Start und Landung

Hindernisse wie Bäume, Gebäude oder Funkmasten stellen für fixed-wing UAVs bei Start und Landung eine größere Gefahr dar als dies für Copterdrohnen der Fall ist. VTOL fixed-wing UAVs wie die Trinity F90+ haben durch ihre Senkrechtstart und -landefähigkeit einen Vorteil gegenüber klassischen fixed-wing Ausführungen, welche die Höhe bis zur Landung komplett im Vorwärtsflug abbauen müssen. Dennoch kann auch die Trinity F90+ die Retransition nur maximal bis zu einer Höhe von 40 m ausführen, so dass genügend Abstand von höheren Bäumen und Bauwerken gehalten werden sollte. Das gilt insbesondere in Hinblick auf eine mögliche GPS-Ungenauigkeit in der Höhenangabe von mehreren Metern, welche die genaue Abschätzung von knappen Überflügen von Hindernissen schwierig macht.

- Bildüberlappung

Eine genügend hohe Überlappung der aufzunehmenden Bilder einzuplanen ist von außerordentlicher Wichtigkeit, um eine genaue Berechnung von 3D-Passpunkten zu gewährleisten und aussagekräftige Höhenmodelle und Orthomosaik daraus ableiten zu können. Eine Bildverarbeitungssoftware basiert darauf, automatisch Tausende gemeinsamer Punkte zwischen den aufgenommenen Bildern zu finden. Jeder charakteristische Punkt, der in einem Bild gefunden wird, wird als Keypoint bezeichnet. Wenn 2 Keypoints auf 2 verschiedenen Bildern als gleich befunden werden, handelt es sich um übereinstimmende Keypoints. Jede Gruppe von korrekt übereinstimmenden Keypoints erzeugt einen 3D-Punkt. Wenn es eine große Überlappung zwischen 2 Bildern gibt, ist der gemeinsam erfasste Bereich größer und es können mehr Keypoints miteinander abgeglichen werden. Je mehr Keypoints es gibt, desto genauer können die 3D-Punkte berechnet werden. Daher ist die wichtigste Regel, eine hohe Überlappung zwischen den Bildern zu gewährleisten (PIX4D 2020). Welche Überlappung als ausreichend erachtet wird, hängt immer von der verwendeten Software und dem beflogenen Gelände ab. Pix4D empfiehlt beispielsweise eine Überlappung von:

- < 75 % frontale und 60 % seitliche Überlappung generell.
- < 85 % frontale und 70 % seitliche Überlappung für Wälder, dichte Vegetation und Felder.
- < 85 % frontale und 60% seitliche Überlappung für die Kartierung von Korridoren mit zwei Flugstreifen

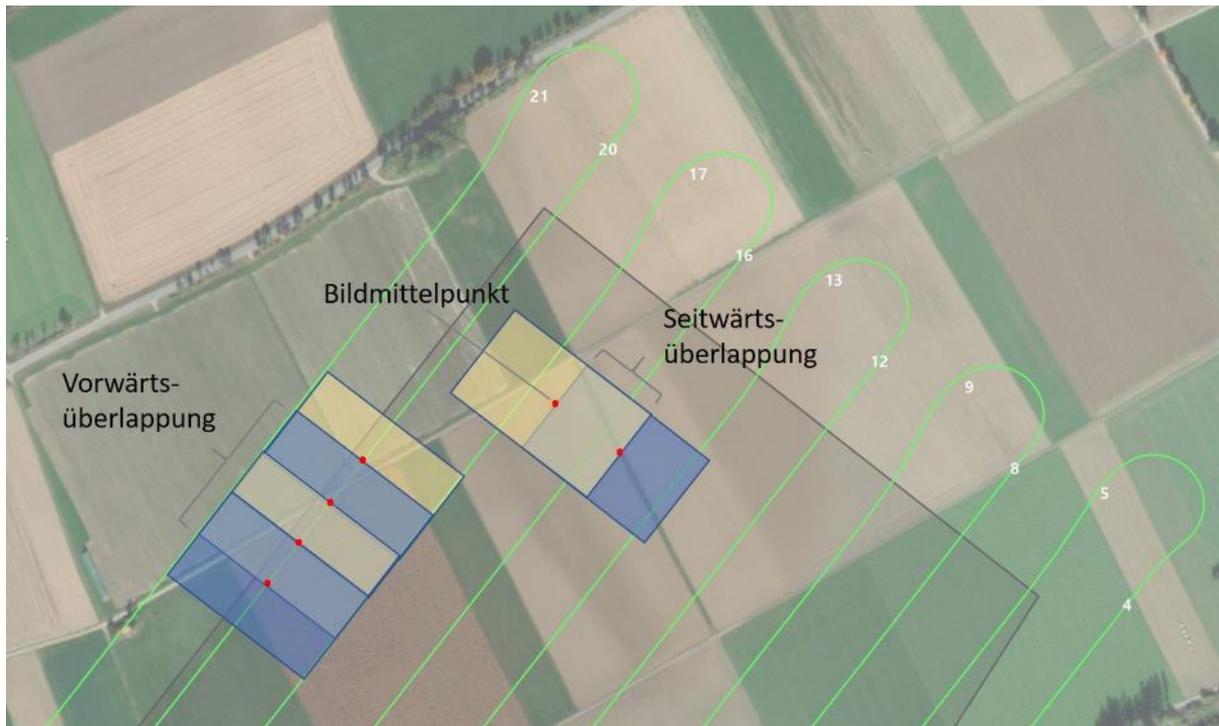


Abbildung 1: Vorwärts- und Seitwärtsüberlappung von Luftbildern (eigene Darstellung)

Die Möglichkeit zur Einstellung der frontalen Überlappung wird insbesondere bei Flugzeugdrohnen wie der Trinity F90+ stark von der minimalen Fluggeschwindigkeit der Drohne (hier 17 m/s) und der maximalen Auslösegeschwindigkeit der verwendeten Kamera (hier Sony UMC-R10C, ca. 1s) bestimmt. Hier sind Multicopter Drohnen aufgrund ihrer in aller Regel deutlich geringeren Fluggeschwindigkeit deutlich geringer betroffen.

- Batteriemangement

Das Batteriemangement findet bei der Trinity F90+ durch den Autopiloten statt. Beginnend zehn Minuten vor einem voraussichtlich kritischen Ladezustand des UAV-Akkus übermittelt der Autopilot über die Fernsteuerung eine akustische und optische Warnung an den Bediener. Wird diese Warnung über den kritischen Ladezustand der Batterie weiterhin ignoriert und der Flug fortgesetzt, befiehlt der Autopilot an einem bestimmten Punkt, an welchem letztmöglich der Rückflug erfolgreich sein wird, die Mission abzubrechen und zum designierten Start- und Landepunkt zurückzukehren.

Die Befliegung selbst wird in aller Regel automatisch anhand der vorher durchgeführten Wegpunktplanung ausgeführt. Ein manuelles Eingreifen ist in den allermeisten Fällen nicht notwendig und sollte nur als Notfallszenario verstanden werden. Im Rahmen des FreeRail-Projektes soll in Zukunft sowieso ganz auf das menschliche Element zum Steuern und Überwachen der Drohne im Flug verzichtet werden und die Flüge aus dem Droneport heraus vollkommen autonom erfolgen.

- Wechsel der Wetterbedingungen

Ein Wechsel während der Wetterbedingungen während einer Befliegung sollte nach Möglichkeit vermieden werden. Zum einen kann starker Wind oder einsetzender Regen nicht nur die Aufnahmen der Kamera verschlechtern, sondern andererseits auch das UAV selbst gefährden.

Gerade bei Korridormissionen kann sich zu starker Wind sehr schnell negativ auf die Überlappung der aufgenommenen Bilder auswirken. Da hier nur wenige Flugstreifen zur Bildung einer Punktwolke zur Verfügung stehen, macht sich jede Veränderung der Überlappung unweigerlich in der Qualität der Ergebnisse bemerkbar.

Die Trinity F90+ ist nicht für den Einsatz bei Niederschlag wie Regen oder Schnee ausgelegt. Wird das Staudruckrohr, über welches laufend die aktuelle Geschwindigkeit ermittelt wird, durch Regenwasser oder Vereisung zugesetzt führt das zum automatischen Abbruch der Mission. Die Trinity F90+ wird bei Feststellung einer Fehlfunktion bei der Geschwindigkeitsmessung unverzüglich zum designierten Landepunkt zurückkehren und eine automatische Landung einleiten.

- Beachtung aller Regularien und Vorschriften

Es gibt beim Betrieb von UAV einige rechtliche Vorgaben zu beachten (EASA 2021). So ist es nach Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) §21b verboten, ein unbemanntes Luftfahrtsystem über oder in einem seitlichen Abstand von 100m von Bundesfernstraßen, Bundeswasserstraßen und Bahnanlagen zu betreiben (BMJV 2015). Die zuständige Stelle kann dem Betrieb ausdrücklich zustimmen um das Verbot außer Kraft zu setzen.

Weiterhin muss ein gültiger Kenntnissnachweis zum Betrieb unbemannter Fluggeräte oder seit dem 01.01.2021 der EU-Kompetenznachweis vorzuweisen sein, um eine Drohne mit mehr als 500g legal betreiben zu können.

### 2.1.2 Photogrammetrie

Die photogrammetrische Auswertung von im Flug aufgenommenen Daten gehört zu einem der Hauptgründe für den professionellen Einsatz von UAV (TURNER, LUCIEER ET AL. 2012). Laut Einleitung in das Kapitel „Grundprinzipien der Photogrammetrie“ bei Lillesand et al. (2015) ist die *Photogrammetrie die Wissenschaft und Technologie der Gewinnung von räumlichen Messungen und anderen geometrisch zuverlässigen abgeleiteten Produkten aus. Für Photogrammetrie* nutzt dafür mehrere passive Methoden der Fernerkundung zur Auswertung der Lage, der Größe und der dreidimensionalen Form eines Objekts im Raum über berührungslose Rekonstruktionsmechanismen (KRAUS 2004) und erfordert nach DE LANGE (2013) hochgenaue Aufnahmesysteme, die eine möglichst exakte Vermessung der aufgezeichneten Situation ermöglichen. Häufig zielt die Verwendung von Photographien, vornehmlich von Luftbildern, jedoch gar nicht auf einen Meßzweck, sondern auf die Durchforschung und Deutung des Bildinhalts, die sog. Bildinterpretation, ab, so z.B. in der Geographie, der Geologie, der Vegetationskunde oder der Vorgeschichtsforschung (LEHMANN 2019). Die Möglichkeit, Bilder von kleinen unbemannten Flugzeugen aus aufzunehmen, kombiniert mit jüngsten Fortschritten in der Computer Vision und Photogrammetrie, erlauben es, Darstellungen der Erdoberfläche schnell und wirtschaftlich zu erfassen (SANZ-ABLANEDO, CHANDLER ET AL. 2018). So können dank der sehr hochauflösenden Bilder, die über optische UAV-Payloads in geringer Höhe erfasst werden, sehr dichte und genaue photogrammetrische Punktwolken durch einen Triangulationsprozess mit Hilfe von Photogrammetrie-Software rekonstruiert werden (KRAUSE, HARTMANN ET AL. 2016).

Diese durch unbemannte Luftfahrtsysteme aufgenommenen Daten zeichnen sich durch eine nur geringe Abdeckung der Erdoberfläche pro Einzelbild aus (TURNER, LUCIEER ET AL. 2012). Daher ist

es notwendig Algorithmen zur Zusammenfügung von Einzelbildern zu größeren Gesamtflächen zu entwickeln (TURNER, LUCIEER ET AL. 2012). Die meisten verfügbaren Softwareanwendungen, die derzeit zur Verarbeitung von UAV-Bildern verwendet werden, basieren auf dem Structure from Motion-Ansatz (SfM). Dieser Ansatz, anders als traditionelle digitale Photogrammetrie löst die Kollinearitätsgleichungen ohne dass ein Passpunkt benötigt wird und liefert eine Punktwolke in einem beliebigen Koordinatensystem und eine vollständige Kamerakalibrierung (FERRER-GONZÁLEZ, AGÜERA-VEGA ET AL. 2020). Structure from Motion (SfM) ist ein photogrammetrisches Verfahren, bei dem dreidimensionale Strukturen (3D) aus sich überlappenden zweidimensionalen (2D) Bildsequenzen ermittelt werden (SCHWIND 2016). SfM verwendet Bilder, die aus mehreren Kameraperspektiven aufgenommen wurden, um die 3D-Geometrie von Objekten und Oberflächen zu bestimmen. (FONSTAD, DIETRICH ET AL. 2013). SfM ist zwar keine neue Technologie, aber die Möglichkeit, eine Consumer-Kamera an ein erschwingliches sUAS zu montieren und die Sammlung von Sequenzen überlappender Luftbilder zu automatisieren, ist eine relativ neue Fähigkeit, über die Ingenieure und Vermesser jetzt verfügen (Schwind 2016). Während die traditionelle Photogrammetrie auf geraden Linien sich überlappender Bilder beruht, ermöglicht SfM, zufällige Bilder aus unterschiedlichen Winkeln und Entfernungen aufzunehmen, um eine 3D Geometrie zu generieren (KOENDERINK AND VAN DOORN 1991).

Das Prinzip der Verwendung zufällig positionierter Bilder ist dank der Fortschritte in der Entwicklung des automatischen Bildabgleichs möglich. Zum Beispiel ist dies die skaleninvariante Merkmalstransformation (Scale-Invariant Feature Transform - SIFT) bei der der Schlüsselansatz die Fähigkeit ist, eine physikalische Eigenschaft zu erkennen, die in mehreren Bildern vorhanden ist, unabhängig vom Maßstab (d. h. der Auflösung) der Bilder und dem Blickwinkel des Bildes. In SfM werden die Positionen und die Orientierung der Kamera automatisch bestimmt, ohne dass ein Messpunktnetz mit bekannten 3D-Koordinaten vorhanden sein muss (DINKOV AND KITEV 2020).

Stattdessen werden sie mit sich wiederholenden iterativen Verfahren für die Batch-Anpassung gleichzeitig gelöst, die auf einer Datenbasis basieren, die automatisch aus überlappenden Bildern erstellt wird (SNAVELY, SEITZ ET AL. 2008)

Da die Photogrammetrie ein passives Verfahren ist, werden die Ergebnisse stark von den eingegebenen Bilddaten beeinflusst. Die SfM-Photogrammetrie, die ein automatisiertes Verfahren zur Identifizierung und Zuordnung von Merkmalen durch Computer Vision, ist grundsätzlich abhängig von der Bildqualität. Sensoren, Einstellungen und Erfassungskonzepte sollten mit großer Sorgfalt betrachtet werden (IGLHAUT, CABO ET AL. 2019).

Die Bilder werden dabei über sogenannte Passpunkte (auf Englisch: Tie Points) verknüpft. Ein Passpunkt ist definiert als Punkt in einem digitalen Bild oder Luftbild, der dieselbe Stelle in einem benachbarten Bild oder Luftbild darstellt. Normalerweise als Paar angegeben, können Pass- oder Verknüpfungspunkte verwendet werden, um Bilder zu verbinden und Mosaike zu erstellen (ESRI. 2021).

Die so gut als möglich verorteten 3D-Modell-Daten im Objektraum erhält man unter anderem durch die Verwendung mehrerer Bodenkontrollpunkte. (GCPs) (CLEDAT, JOSPIN ET AL. 2020)

Wenn ein Punkt nun auf mindestens zwei Bildern automatisch erkannt wird, als automatic tie point (ATP) oder vom Benutzer markiert, als manuel tie point (MTP) oder als ground control point (GCP), werden die 3D-Koordinaten dieses Punktes unter Verwendung der internen und externen Parameter der Kamera sowie der Position des Punktes in den Bildern berechnet. Die folgende Abbildung zeigt die Verwendung von Passpunkten in zwei unterschiedlich ausgerichteten Bildern.

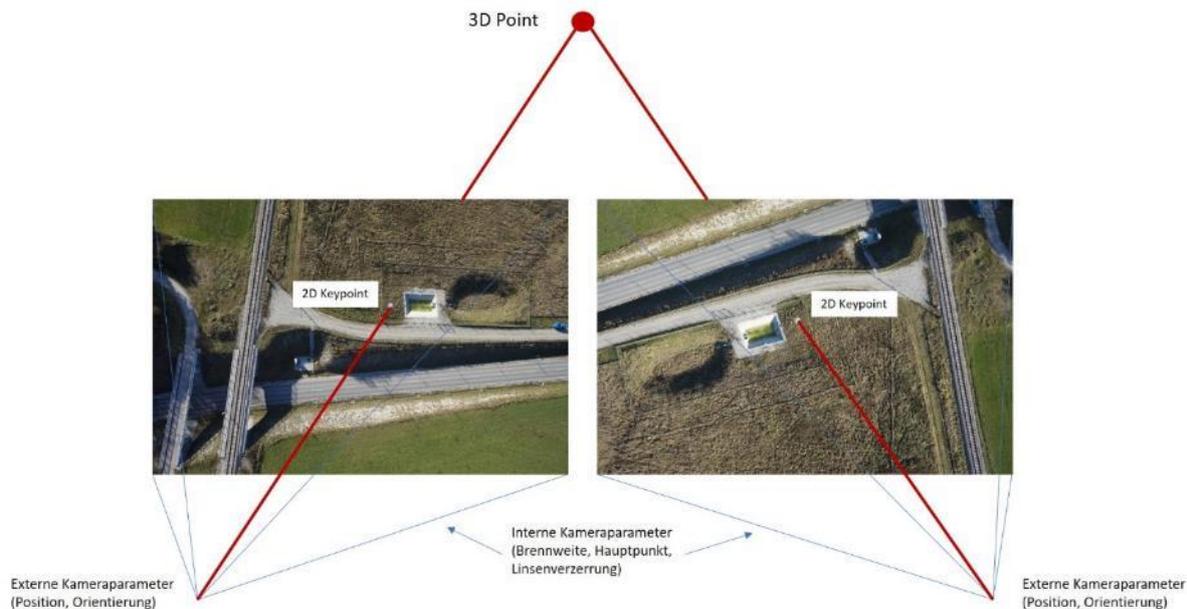


Abbildung 2: Schema des Abgleichs Passpunkten in überlappenden Luftbildern (eigene Darstellung)

In der Tat, kann die Passpunkt-Dichte auf Oberflächen mit einer homogenen Textur (zum Beispiel Wasser, Neuschnee und bestimmte Arten von Vegetation) niedrig oder sogar Null sein, wohingegen sie in texturreichen Umgebungen extrem hoch sein kann (wie etwa in bebauten Gebieten) (CLEDAT, JOSPIN ET AL. 2020). Um ausreichende Ergebnisse liefern zu können ist eine hohe Bildüberlappung, also die Quer- und Längsüberlagerung von Einzelbildern, der Basisdaten notwendig (WESTOBY, BRASINGTON ET AL. 2012)

Nach GERKE UND VOSSELMANN (2016) wird die Kamera in der konventionellen Luftbildphotogrammetrie so im Flugzeug montiert, dass die optische Achse vertikal ausgerichtet ist und dadurch einen Nadirblick ermöglicht. Das führt dazu, dass durch die durch die zentralperspektivische Abbildung bedingten Reliefversetzungen im Zentralbereich des Bildes klein sind. Für viele Anwendungen, wie bei der Erzeugung von Orthomosaiken, ist diese Eigenschaft eher hinderlich. Daher betonen GERKE UND VOSSELMANN (2016) die Bildüberlappung. Diese muss groß genug sein, um nur auf die Zentralbereiche des Bildes zurückgreifen zu können. Das ist der Hauptgrund warum bei der Verwendung eines relativ schnell fliegenden fixed-wing UAV die minimale Flughöhe limitiert ist, wenn damit Ergebnisse photogrammetrisch ausgewertet werden sollen. Da die verbaute Kamera nicht beliebig schnell auslösen kann und ein fixed-wing UAV üblicherweise eine relativ hohe Geschwindigkeit aufweist, muss der Flug in einer ausreichenden Höhe stattfinden, um eine für die photogrammetrische Auswertung ausreichende Überlappung erreichen zu können. Auch in der Forstwirtschaft ist der Einsatz von Fernerkundungsdaten durch Bestrebungen motiviert, die Kosteneffizienz, Präzision und Aktualität von Waldinformationen zu erhöhen (IGLHAUT, CABO ET AL. 2019). Das folgende Schaubild verdeutlicht die drei wichtigsten Schritte in einem typischen SfM – MVS Arbeitsablauf. Am Anfang stehen Keypoint Identifikation und Matching, beispielsweise nach dem SIFT-Verfahren, gefolgt von SfM mit den Kameraparametern und einer Punktwolke als Ausgabe. Im Anschluss kann eine Dichte Punktwolke nach MVS erstellt werden (Iglhaut, Cabo et al. 2019). SfM-UAV-Projekte haben in der Regel eine hohe Bildredundanz, so dass mehrere Ansichten der gleichen Szene von verschiedenen Standpunkten aus zu erwarten sind (SANZ-ABLANEDO, CHANDLER ET AL. 2018).

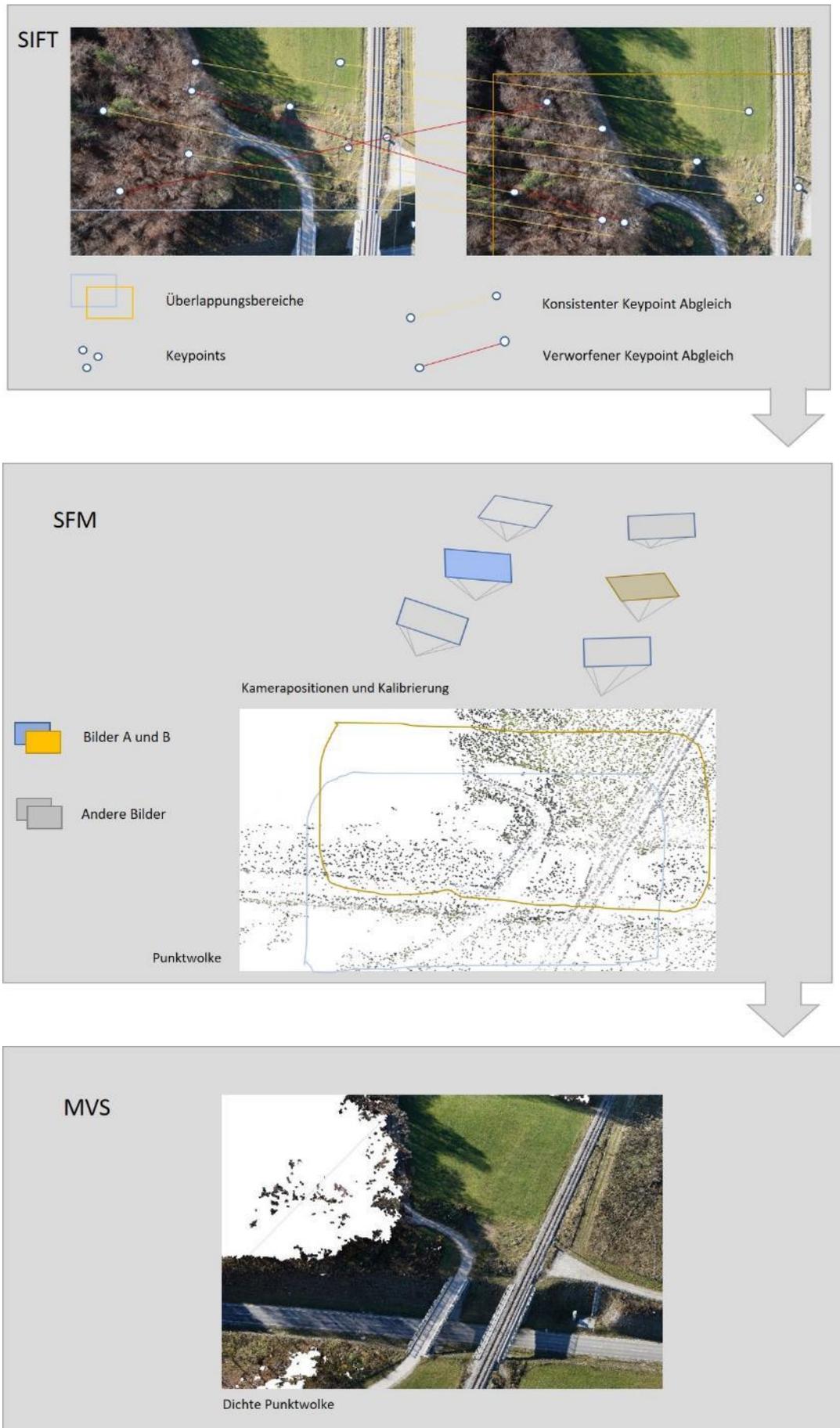


Abbildung 3 Die drei Hauptschritte des SfM/MVS Arbeitsablauf (eigene Darstellung)

## 2.2 BVLOS Flug

Drohnenflüge auch außerhalb der Sichtweite des Piloten (Beyond Visual Line Of Sight - BVLOS) bieten gegenüber dem reinen Sichtlinienflug einige Vorteile. Sie sind effizienter und kostengünstiger, da weniger oft gestartet und gelandet werden muss, um eine längere Strecke abfliegen zu können und können einen leichteren Zugang zur Datenaufnahme in abgelegenen oder gefährlichen Gebieten ermöglichen. Das gilt insbesondere auch für das Vegetationsmonitoring entlang von Bahngleisen, da für einen sinnvollen Einsatz von Drohnen häufig weite Flugdistanzen erforderlich sind. Durch Regularien und strenge Sicherheitsanforderungen ist das Fliegen von Drohnen außerhalb der Sicht des Piloten nur sehr schwer in Deutschland umsetzbar (BMVI 2020). Unter anderem kommen hier Sicherheitsbedenken zum Tragen, da der Pilot Hindernisse, wie andere Luftverkehrsteilnehmer nicht oder über Kamerafernsteuerung nur eingeschränkt wahrnehmen kann. Im Falle von vollkommen autonom durchgeführten Flügen fände überhaupt keine menschliche Beobachtung mehr statt. Daher ist es verständlich, dass der Betrieb von Drohnen außerhalb der Sichtweite aus Sicht der Luftfahrtbehörden eine besondere Rolle spielt. Im Gegensatz zu dem jahrzehntelang in Sichtweite durchgeführten Modellflug werden erst seit wenigen Jahren und in deutlich geringerer Zahl Flüge außerhalb der Sichtweite durchgeführt (PHIESEL, 2019). Es gibt aber sehr wohl bereits einige erfolgreich durchgeführte Inspektionen linearer Infrastruktur mit Drohnen außerhalb der Sichtweite. Zum Beispiel meldete das Ingenieurbüro Black & Veatch kürzlich den erfolgreichen Abschluss einer 60 Meilen langen, ununterbrochenen Evaluierung von Stromleitungen. Der interessanteste Aspekt dieser Bemühungen war, dass die Inspektion Operationen außerhalb der Sichtlinie umfasste (BVLOS) (GRUBESIC AND NELSON 2020). Es bleibt anzunehmen, dass der Einsatz von unbemannten Fluggeräten außerhalb der Sichtweite des Piloten in Zukunft eine große Rolle einnehmen wird und durch die technische Weiterentwicklung der dafür eingesetzten UAV ein vertretbares Risiko für Menschen und Güter entstehen wird.

## 2.3 Georeferenzierung von UAV Bildern mit GCPs – PPK – RTK

Die Drohnenkartierung mit GNSS-gestützter Verortung der aufgenommenen Bilder für photogrammetrische Anwendungen wie die Erstellung von Punktwolken, Höhenmodelle oder Orthofotos ist eine hocheffiziente Methode zur Vermessung von kleinen oder mittelgroßen Gebieten. Die Kartierungsqualität ist jedoch nicht intuitiv vorhersehbar, insbesondere in komplexen Umgebungen (mit steilem und unübersichtlichem Gelände), in dem die Qualität der real-time kinematic (RTK) oder postprocessed-kinematic (PPK) Positionierung variiert (CLEDAT, JOSPIN ET AL. 2020). Traditionelle Georeferenzierung von Bilddaten aufgenommen mit Drohnen beinhaltet die Verwendung von GCPs, was den Vorteil von schneller und effizienter Kartierung in abgelegenen Gebieten zunichtemacht (TU T CE V, M S Ü U ¥ Á Ö. 2019). Das Sammeln von GCP-Daten mit einem GPS-Empfänger kann sehr aufwendig, insbesondere zeitaufwendig sein. Wenn in einem großen Befliegungsgebiet viele GCPs erforderlich sind, ist es meist notwendig vor dem Flug mehrere Stunden Vorbereitungsarbeit einzuplanen. Das beinhaltet die Platzierung der GCPs, die Aufnahme der GNSS-Koordinaten und das Einsammeln der GCPs nach Abschluss der Befliegung (GRUBESIC AND NELSON 2020).

Im Zuge des technischen Fortschritts der letzten Jahre im Bereich der Satellitenpositionierungsverfahren können Kartierungen per Drohne einfacher und unkomplizierter durchgeführt werden. Die GNSS-Korrekturtechnologie bietet eine bequemere Alternative zu Verwendung von GCPs.

Dieses Verfahren verbessert die Qualität der Positionsdaten, indem mit Hilfe einer Basisstation hochpräzise Korrekturdaten für die mit der Drohne gemessenen Lageinformationen gemessen werden können. Diese Technologie wird schon seit Jahren für die terrestrische Vermessung und auf Baustellen eingesetzt. Erst seit kurzem hat die GNSS-Korrekturtechnologie auch Einzug in die drohnengestützte Vermessung gefunden und ist mittlerweile ein verlässliches Werkzeug für die vermessungstaugliche Photogrammetrie. Sowohl die Verwendung von GCPs als auch die GNSS-Korrekturtechnologie sind in der Lage, die gleichen akkuraten Daten zu erzeugen, allerdings erfordert die GNSS-Korrekturtechnologie nicht die gleichen zeitlichen Vorbereitungen.

Es gibt zwei grundsätzlich verschiedene Ausprägungen der GNSS-Korrekturtechnologie – Real Time Kinematic (RTK) und Post Processing Kinematic (PPK).

Die Real Time Kinematik bietet Echtzeit-Korrekturen der Positionsdaten, während die Drohne fliegt. RTK ist auf die Verwendung einer Basisstation angewiesen. Die Basisstation ist ein GNSS-Empfänger positioniert auf einer bekannten (d.h. bereits eingemessenen Koordinatenpaar)-Stelle, der aktiv Echtzeit-Standortinformationen, übermittelt durch Satelliten, sammelt (GRUBESIC AND NELSON 2020).

Allerdings funktioniert das nicht immer perfekt. Wenn es um die Kartierung aus der Luft geht, kann die RTK-Positionierung ihre Nachteile haben, mit Ausfällen der Funkverbindung und GNSS-Signalausfällen. Aufgrund der mitunter großen Entfernungen zwischen der Drohne und der Basisstation können die Signale beeinträchtigt werden, was zu einem Verlust von Korrekturdaten und einem geringeren Prozentsatz an genauen Kamerapositionen für den entsprechenden Flug führt. Diese Probleme führen zu einer großen Ungenauigkeit bei den Korrekturen. Die Genauigkeit kann bei einigen Dezimetern bei RTK-Float oder sogar bei einer Genauigkeit im Meter-Bereich liegen, wie man sie auch bei Nicht-RTK-Flügen erhalten würden (GEAVIS 2018).

In einem solchen Fall bietet sich die Positionskorrektur im Nachhinein mit einer PPK-fähigen Drohne an. Denn PPK verarbeitet die Positionsdaten nach dem Flug, nicht während des Fluges. Die Daten werden im Flugzeug aufgezeichnet und mit den Daten der Basisstation kombiniert, wenn der Flug beendet ist. Daher besteht kein Risiko eines Daten- oder Initialisierungsverlusts aufgrund von Ausfällen der Funkverbindung. Die Verarbeitung ist ähnlich wie bei RTK, allerdings ist PPK etwas gründlicher, da es die Daten mehrfach zurückverfolgt und so umfassendere Ergebnisse liefert (GEAVIS 2018).

Für die Korrektur der Positionsdaten mit der PPK-Methode werden die gesammelten Daten einer Basisstation oder virtuellen Referenzstation nach dem Flug in einer geeigneten Software zusammengeführt.

Grundsätzlich besteht der Hauptunterschied zwischen beiden Methoden darin, wann diese Positionskorrektur stattfindet. RTK korrigiert während des Fluges und PPK korrigiert nach dem Flug, wobei aber nach GEAVIS 2018 auch gilt, dass RTK-Drohnen eine sehr spezielle Basisstation sowie andere Komponenten brauchen, die zusammenarbeiten, um Daten in Echtzeit zu verarbeiten.

PPK-Drohnen bieten mehr Flexibilität in Bezug auf den eigentlichen Flug der Vermessungsdrohne, was bedeutet, dass der Anwender mehr Freiheit hat, wie und wo die Drohne eingesetzt wird. PPK kann mehr Zuverlässigkeit und eine größere Reichweite von der Basisstation liefern, um dem Nutzer mehr Flexibilität zu bieten.

Der Einsatz von RTK/PPK-Drohnen ist gegenüber Nicht-RTK-Drohnen dann von Vorteil, wenn aufgrund von Einschränkungen vor Ort oder mühsamen Messverfahren keine Bodenkontrollpunkte (GCPs) verwendet werden sollen. Das Ergebnis beider Systeme sind bereits georeferenzierte Luftbilder, die

direkt für die Konstruktion von Punktwolken, digitalen 3D-Erdmodellen (DTM, DSM usw.) und weiter für Orthomosaike verwendet werden können (GEAVIS 2018).

## 2.4 Schrägluftaufnahmen mit UAV

UAV-Vermessungen erfolgen in der Regel nadir, das heißt, die Bilder werden mit der Kameraachse in vertikaler Richtung aufgenommen; so liefern sie sowohl eine Vorwärtsüberlappung zwischen den Aufnahmen wie auch eine Seitwärtsüberlappung zwischen den Flugstreifen, was die Rekonstruktion des vermessenen Gebiets oder Objekts in 3D ermöglicht (VACCA, DESSÌ ET AL. 2017).

Diese Art der Vermessung ist nicht geeignet für die 3D-Modellierung von Städten, wo es wichtig ist, eine vollständige 3D Modellierung eines jeden Gebäudes, einschließlich der Fassaden und Grundrisse von Gebäuden, zu bekommen. In solchen Fällen können zur Verbesserung des 3D-Modells die Daten aus der Nadir-UAV-Vermessung mit Punktwolken aus einem terrestrischen Laserscanner (TLS) oder aus einer herkömmlichen Vermessung ergänzt werden (VACCA, DESSÌ ET AL. 2017). Natürlich erfordert diese Integration längere Zeiten und höhere Kosten für Personal und Ausrüstung. Um dies auszugleichen, gibt es seit etwa dem Jahr 2008 Versuche Schrägaufnahmen mit Nadir-UAV-Bildern zusammenzubringen (VACCA, DESSÌ ET AL. 2017)

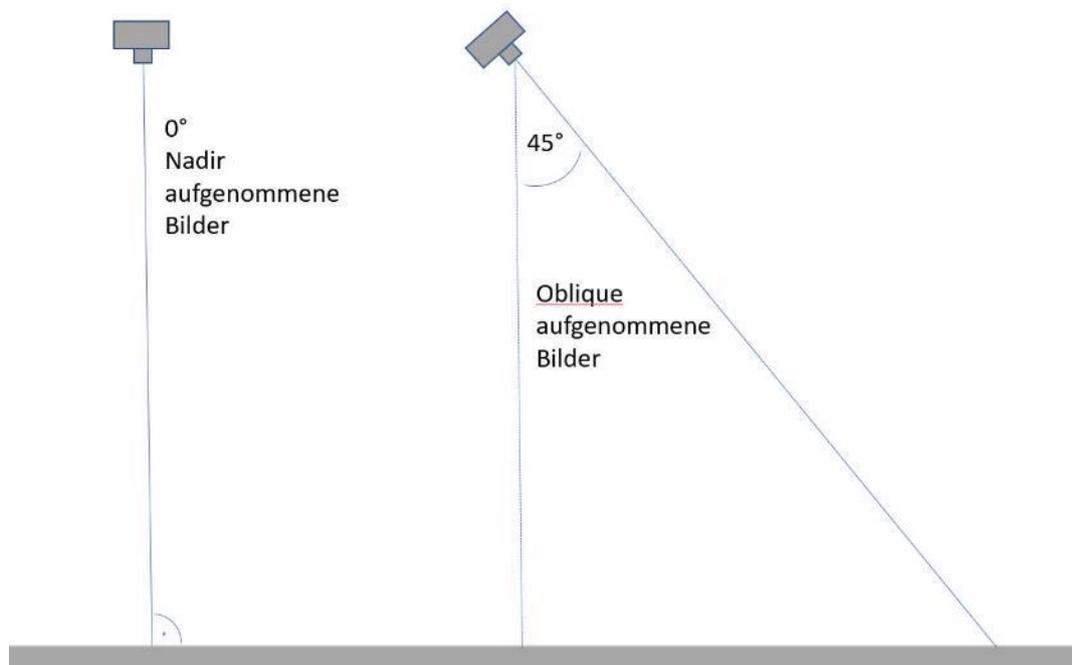


Abbildung4: Unterscheidung von nadir oblique aufgenommenen Luftbildern (eigene Darstellung)

Aufgrund ihrer vielfältigen Vorteile haben aber Schrägbildaufnahmen ihren Platz in zahlreichen Unternehmen und zivilen Anwendungen. Die automatische Verarbeitung solcher Bildblöcke ist jedoch nach wie vor ein Thema der Forschung (NEX, RUPNIK ET AL. 2013). Der Vorzug der Schrägbildfotografie liegt vielmehr in der Einfachheit der Interpretation und der einfachen Verständlichkeit für unerfahrene Anwender (NEX, RUPNIK ET AL. 2013).

Die Kamerakonfiguration stellt zwar eine Herausforderung für die traditionelle photogrammetrische Verarbeitung dar, die in kommerzieller Software verwendet wird, bietet aber andererseits die Möglichkeit, den zusätzlichen Informationsgehalt zu nutzen und ermöglicht eine zuverlässigere Feature-Extraktion (NEX, RUPNIK ET AL. 2013). Insbesondere die Informationen, die in Verbindung mit Gebäudefassaden abgeleitet werden können, eröffnen ganz neue Möglichkeiten für die Gebäudeerkennung und Footprint-Extraktion (NEX, RUPNIK ET AL. 2013). Ebenso gut lassen sich die durch die Schrägaufnahme zusätzlich gewonnen Informationen für das Vegetationsmanagement entlang von linearer Infrastruktur wie Bahngleisen verwenden.

Nach HEIPKE 2017 erlauben Schrägluftaufnahmen eine gute Sichtbarkeit von lateralen Gebäudeteilen, Bäumen und anderen Objekten. Bei den meisten Prozessierungs- und Auswerteschritten kann auf bestehende Verfahren zurückgegriffen werden, jedoch sollte die besondere Aufnahmegeometrie berücksichtigt werden.

Im Gegensatz zu Nadiraufnahmen variiert der Bildmaßstab einer Schrägluftaufnahme von Vorder- zu Hintergrund in Abhängigkeit einiger Parameter (HEIPKE 2017). In der folgenden Abbildung sind alle wesentlichen Größen skizziert.

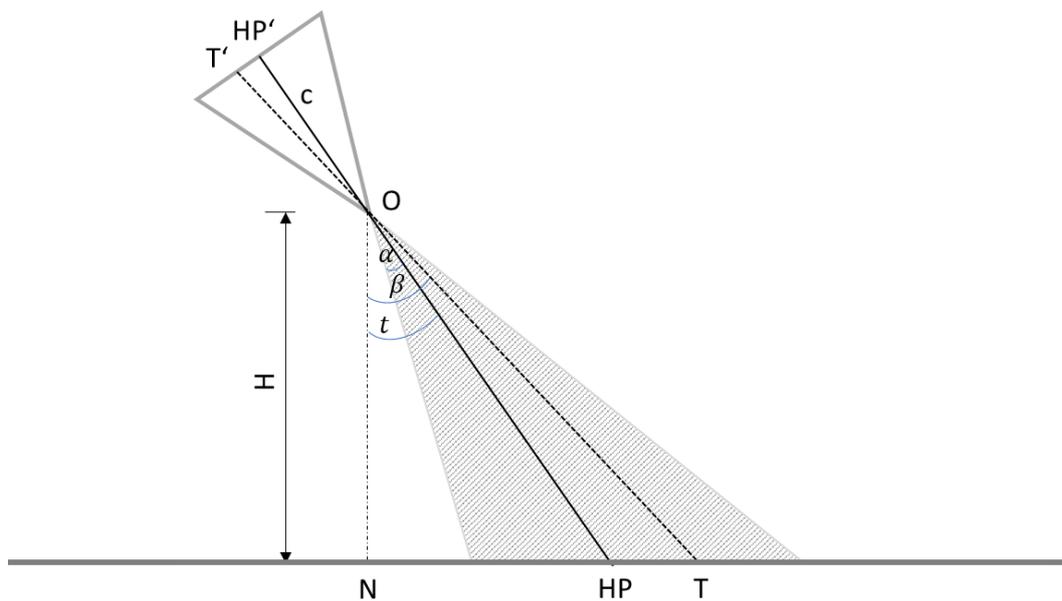


Abbildung 5: Aufnahmegeometrie von Schrägluftaufnahmen (Gerke and Vosselman 2016)

O	Projektionszentrum
HP	Schnittpunkt der optischen Achse mit der Oberfläche
HP'	Bildhauptpunkt
C	Kammerkonstante
T	Geländepunkt
T'	Abbild des Geländepunktes
H	Höhe des Projektionszentrums über dem Gelände
N	Nadirpunkt
	Kippwinkel, der die optische Achse und den Vertikal einschließt
	Halber Öffnungswinkel der Kamera
	Winkel, der den Vertikal und das Ziel einschließt

Abbildung sechs zeigt die Schrägansicht einer mit Agisoft Metashape erstellten dichten Punktwolke eines Waldrandes. Zur Aufnahme der Daten wurde das Gelände in einer Höhe von 100m überflogen und mit einer Sony UMC-R10C rein nadir ausgerichtete Bilder in genügender Überlappung (75%/75%) aufgenommen. In der Schrägansicht fallen viele Lücken zwischen den Bäumen auf, da diese Bereiche von höheren Ästen und der Baumkrone selbst verdeckt sind und bei einer rein nadir ausgerichteten Bildaufnahme nicht dargestellt werden können. Gerade im Bereich des Vegetationsmonitorings entlang von Bahnstrecken, wo klare Mindestabstände eingehalten werden müssen, können diese Datenlücken problematisch für die Verwendbarkeit der aufgenommenen Daten sein. Im Zweifelsfall muss der entsprechende Bereich im Nachgang vom Boden aus inspiziert werden. Damit entfällt jeder Vorteil in Sachen Arbeitsaufwand, den die Befliegung mit Drohnen leisten sollte.



Abbildung6: Waldrandnadir-Aufnahmen, dichte Punktwolke berechnet mit Agisoft Metashape

Abbildung sieben dagegen zeigt die dichte Punktwolke des gleichen Waldrandes in einer Kombination aus nadir und oblique aufgenommenen Bildern. Deutlich ist zu erkennen, dass die oben erwähnten Lücken in dieser Ansicht geschlossen werden konnten. Die Form der Bäume am Waldrand kann so bis hinunter zum Boden eindeutig bestimmt werden.



Abbildung7: Waldrand mit nadir und oblique Aufnahmen, dichte Punktwolke berechnet mit Agisoft Metashape

Wird eine Kamera unter einem Neigungswinkel eingesetzt, entstehen Schrägluftbilder (GERKE AND VOSSELMAN 2016). Dort sind im gesamten Bild seitliche Bereiche vertikaler Strukturen wie

Hausfassaden oder Bäume zu sehen (GERKE AND VOSSelman 2016). Im Bereich der UAV, insbesondere bei kleinen Systemen unter 25kg sind Multi-Kamera Oblique-Lösungen immer noch die Ausnahme bei den verfügbaren Sensoren. Für bemannte Flugzeuge wurde deren Einsatz erstmals in den 1920er Jahren für militärische Anwendungen vorgenommen, aber in den letzten Jahren werden Schrägluftbilder zu einer Standard Technologie für zivile Anwendungen, dank der Entwicklung neuer kommerzieller Systeme (beispielsweise der Hersteller Leica RCD30, Pictometry, Track'Air Midas, BlomOblique, IGI DigiCAM, Vexcel UltraCam Osprey, etc.) (NEX, RUPNIK ET AL. 2013).

Eine Charakteristik von Schrägluftaufnahmen ist, dass Verdeckungen sehr viel prominenter sind als bei Nadiraufnahmen (GERKE AND VOSSelman 2016). Unterschieden wird dabei zwischen der sogenannten „Selbstverdeckung“ und Verdeckung durch Vordergrundobjekte. Der erste Fall kommt im untersuchten Anwendungsfall eher nicht vor, da keine Gebäude befliegen werden, deren Rückseiten verdeckt sein könnten, aber von Relevanz für die Qualität der erhobenen Daten sein könnten. Der zweite Fall hingegen, die Verdeckung des Zielobjekts, hier der Lichtraum des Gleiskörpers, durch Vordergrundobjekte, in aller Regel Bäume, ist ein durchaus nicht selten auftretender Fall bei den Befliegungen von Bahngleisen mit UAV. Im Gegensatz zu vertikalen Bildern haben diese schrägen Bilder einige spezifische Eigenschaften, wie einen stark variierenden Bildmaßstab und mehr Verdeckung durch hoch aufragende Objekte, wie z. B. Gebäude. Allerdings sind jedoch die Fassaden von Gebäuden und anderen vertikal ausgerichteten Objekten gut sichtbar, weshalb Schrägbilder z. B. für Visualisierungszwecke verwendet werden (GERKE 2010)

Der Maßstab innerhalb eines Schrägbildes ist abhängig von der Flughöhe  $H$ , der Brennweite  $c$ , dem Neigungswinkel  $t$  und dem Winkel zwischen dem Sichtstrahl auf ein Ziel und der Vertikalen  $\beta$  (HÖHLE 2008):

$$m = \frac{c}{H \cdot \sin(\beta - t)}$$

wobei  $m$ : Maßstab am Zielpunkt.

Für den Vordergrund ist  $\beta = t - \alpha$  und für den Hintergrund  $\beta = t + \alpha$ .

Je nach Neigungswinkel variiert der Maßstab innerhalb der abgebildeten Szene stark (GERKE 2010), woraus sich ergibt, dass im Vordergrund die GSD kleiner ist als im Bildhintergrund (GRENZDÖRFFER, GURETZKI ET AL. 2008). Glücklicherweise können nadir und oblique Aufnahmen oft zusammen verarbeitet oder nach der Verarbeitung zusammengeführt werden, um ein einziges Modell mit verbesserter Qualität und Vollständigkeit zu erhalten (ROSSI, MANCINI ET AL. 2017). Die meisten modernen SfM-Photogrammetrie-Softwareverarbeitungsanwendungen, einschließlich Pix4Dmapper, Agisoft Metashape (früher PhotoScan) und Bentley ContextCapture, erlauben die gemeinsame Verarbeitung von Oblique- und Nadirbildern (GREGORY-LEDERER 2020).

Jedenfalls erlaubt die höhere Informationsdichte, die von Schrägbildern geliefert wird, ihren Einsatz in sehr unterschiedlichen Anwendungen, wie zum Beispiel Überwachungsdienste bei Massenereignissen und Umweltkatastrophen (PETRIE, 2008; GRENZDÖRFFER ET AL., 2008), Aktualisierung von Straßendaten (MISHRA ET AL, 2008), administrative Dienste (LEMMENS ET AL., 2008), Gebäude-Erkennung (XIAO ET AL., 2012), Klassifizierung von Gebäudeschäden (NYARUHUMA ET AL., 2012), Stadtmodellierung (WANG, 2012) Rekonstruktion der Topographie im Tagebau (ROSSI, MANCINI ET AL. 2017), Archäologie (HÖHLE 2008), Management von Militär- und Sicherheitsoperationen (GRENZDÖRFFER, GURETZKI ET AL. 2008) oder Anwendungen in der Forstwirtschaft (KRAUSE 2016).

### 3. Vegetationsmanagement der Deutschen Bahn

Die DB Fahrwegdienste GmbH stellt unter Beachtung der Naturschutzvorgaben das Vegetationsmanagement am ca. 34.000 km langen Bahnstreckennetz in Deutschland sicher. Dabei fallen unter anderem die Vegetationspflege entlang des Schienennetzes und der Bahnstromleitungen zur Aufrechterhaltung der Betriebs- und Verkehrssicherheit sowie die Planung und Umsetzung von Bestandspflegemaßnahmen mit Einsatz von speziellen Verfahren wie Seilklettertechnik, Schreitbagger und Rücketechnik (DB NETZ AG. 2019). Weiterhin gehört aber auch die Digitale Fernerkundung mittels unbemannter Luftfahrtsystemen zum Leistungsspektrum der DB Fahrwegdienste GmbH.

Das Vegetationsmanagement des Bereichs im Gleisbett soll hier nicht Gegenstand der Arbeit sein. Hier werden überwiegend chemische Verfahren eingesetzt, um den Gleiskörper vegetationsfrei zu halten.

Gegenstand der Arbeit ist der Bereich am Gleis, für den grundsätzlich mechanische Verfahren für das Vegetationsmanagement eingesetzt werden.

Um die Ausdehnung der in der Richtlinie 882 „Landschaftspflege und Vegetationskontrolle“ vorgegebenen Rückschnittszone von 6m (minimaler Sicherheitsraum zuzüglich eines Wachstumszuschlags für den seitlichen Austrieb von Gehölzen) gewährleisten zu können wird ein jährlicher bodennaher Rückschnitt vorgenommen. Ziel des Einsatzes von Drohnen für das Vegetationsmanagement ist es, eine verlässliche Datengrundlage für den Rückschnitt von Vegetation zu erhalten, ohne dass eine zeitraubende Begehung vor Ort notwendig ist. Denkbar ist in Zukunft sogar die Auswahl der Methode, die für den Rückschnitt zum Einsatz kommen soll, anhand der Drohnen Daten zu bestimmen.

Je nach Art und Größe des notwendigen Rückschnitts kommt eine andere Methode zum Einsatz. Könnte bereits aus den Luftbildern bestimmt werden welche Methode die geeignetste für die Rückschnittmaßnahme ist, wäre das eine große Hilfe bei der Entscheidung, da dadurch keine weitere Begehung vor Ort notwendig wäre, um sich ein zusätzliches Bild von den Gegebenheiten vor Ort machen zu müssen. Handelt es sich beispielsweise um eine aufwendige Maßnahme kommt mitunter ein Harvester zum Einsatz. Aber von besonderem Interesse wäre aus den von der Drohne aufgenommenen Daten zu erkennen, ob sich die zurückzuschneidenden Äste höher oder niedriger als 6 m vom Boden befinden. In einer Höhe von über 6 m darf der Rückschnitt ausschließlich mit Einsatz einer Hebebühne erfolgen wohingegen niedrigere Äste vom Boden aus zurückgeschnitten werden dürfen.

Das ist mit rein nadir gemachten Aufnahmen nicht möglich. Die Überdeckung der betreffenden Äste durch die Baumkronen ist üblicherweise zu hoch. Gerade Oblique-Aufnahmen können hier möglicherweise eine höhere Genauigkeit gewährleisten.

Abbildung 8 zeigt die Rückschnittszonen entlang eines Bahngleises mit eingezeichnetem U- Profil und V-Profil. Im U-Profil (6 m Rückschnittszone ab Gleismitte) werden alle Gehölze einmal jährlich bodennah zurückgeschnitten um einen ausreichend sicheren Lichtraum für den Zugverkehr gewährleisten zu können. Grundsätzlich wird das U-Profil der Rückschnittszone nach oben hin offen vegetationsfrei gehalten. Ausschließlich mit Nadir-Aufnahmen lässt sich das U-Profil meist nur unzureichend darstellen, da überhängende Baumkronen den Blick auf niedrige Äste und kleinere Gehölze verdecken können. Dadurch entstehen Lücken in der aus den Befliegungsdaten abgeleiteten Punktwolke.

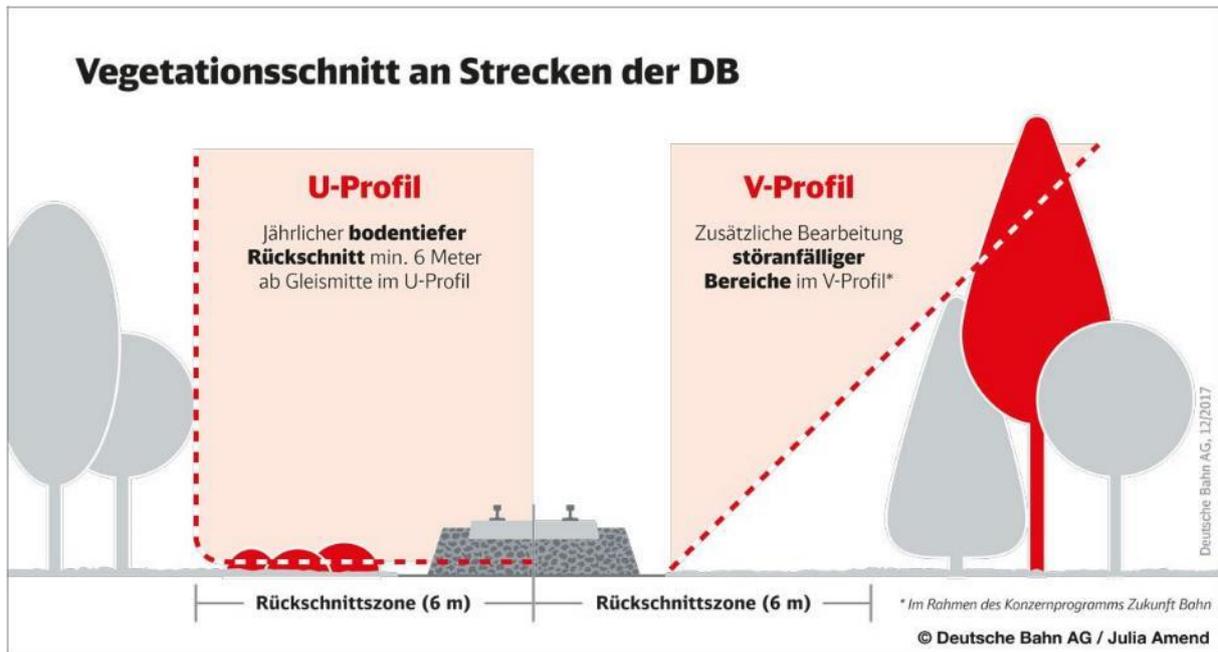


Abbildung 8: Vegetationsschnitt an Strecken der DB (Deutsche Bahn AG / Julia Amend)

Weiterhin stellt insbesondere hohe Vegetation eine Gefahr für den Bahnbetrieb dar, so dass auch die genaue Abschätzung der Baumhöhen in der Stabilisierungszone entlang von Bahngleisen zu einem wichtigen Ergebnis der Drohnenbefliegungen zählt. Hierauf zielt die Abbildung des V-Profiles ab. Hohe Bäume können bei Sturm oder Schneebruch mitunter auf das Gleis stürzen und bisweilen eine große Gefahr für die Sicherheit des Bahnverkehrs darstellen. Auch hier gilt es zu prüfen, ob die Höhenabschätzung der Bäume mit einer Kombination aus nadir und oblique aufgenommenen Bildern genauer gelingen kann.

Laut Richtlinie 882 „Landschaftspflege und Vegetationskontrolle“ schließt die Stabilisierungszone an die Rückschnittzone an. Sie dient der Stabilisierung von Waldbeständen und ihre Ausdehnung ist abhängig von der Vegetation, insbesondere der Gehölze, die eine Gefahr für die Bahnanlagen oder für Dritte darstellen kann, und beträgt in der Regel eine Baumlänge, mindestens aber 30 m. Um aber ein überall ausreichend gutes Ergebnis der Datenauswertung aus den Drohnenflügen zu bekommen, sollen die bei der DB Fahrwegdienste GmbH verwendeten Daten immer 60 m links und rechts der Gleismitte abdecken. Das Orthomosaik soll so die doppelte Breite der Stabilisierungszone abdecken.

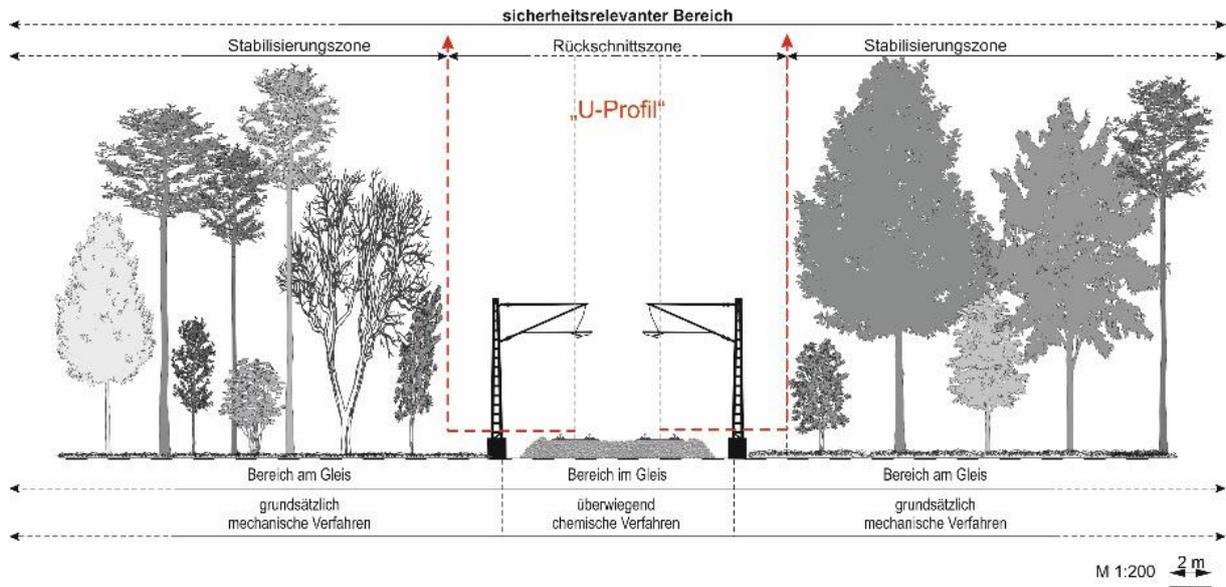


Abbildung 9. Sicherheitsrelevanter Bereich aus Sicht der Vegetationskontrolle (DB Netze, 2019)

## 4. Fragestellung der Arbeit

Im Rahmen der Arbeit soll ein Vergleich verschiedener Möglichkeiten der Befliegung und Datenerfassung von linearer Infrastruktur mit UAV durchgeführt werden.

Konkret geht es um eine Optimierung der Befliegung von Bahnstrecken zum Monitoring von Vegetation, die aufgrund einzuhaltender Richtwerte gegebenenfalls zurückzuschneiden sind bzw. Bäume, die durch Unwetterereignisse auf das Gleisbett stürzen könnten. Bisher werden diese Flüge mit VTOL Starrflügeldrohen vom Typ Trinity F90+ des Herstellers Quantum-Systems mit in Nadir-Ausrichtung fest verbauten RGB-Kameras vom Typ Sony UMC-R10C mit 20,1 MP aus 90m Flughöhe mit vier Flugstreifen erhoben. Dabei entstehen mitunter Lücken in der zu berechnenden Punktwolke, da durch die ausschließliche Nadir-Ausrichtung der Kamera, Baumstämme und der Boden in der Nähe der Gleise durch überhängende Baumkronen mitunter nicht erfasst werden kann. Weiterhin ist die in Anwendung befindliche Konfiguration der Korridorbefliegung mit vier Flugstreifen gerade über Waldgebieten mitunter nicht geeignet die benötigte Güte der Dichten Punktwolke für anschließende Auswertungen wie zum Beispiel Baumhöhen zu liefern.

Zum Vergleich werden mit dem gleichen UAV und der gleichen Kamera (Trinity F90+ und Sony UMC-R10C) Bilder aus verschiedenen Flughöhen und verschiedener Anzahl an Flugstreifen eigenständig erhoben. Teil dieser Erhebung ist der Vergleich von nadir und oblique ausgerichteten Aufnahmen.

Die Arbeit wird dabei helfen herauszufinden, welches das optimale Setting für die Datenaufnahme zum Vegetationsmonitoring entlang von Bahnstrecken hinsichtlich Flughöhe, Anzahl der Flugstreifen und Ausrichtungswinkel der Kamera(s) darstellt um den Drohneneinsatz möglichst ökonomisch sinnvoll und mit bestmöglichem Ergebnis mit Blick auf Vollständigkeit der Punktwolke, Lagegenauigkeit des Orthomosaiks und Praktikabilität zu finden.

Die wissenschaftliche Fragestellung ist daher die Überprüfung, ob es möglich und sinnvoll ist, mit nur zwei Flugstreifen und mindestens zwei gleichzeitig senkrecht sowie schräg aufzeichnenden RGB Kameras mit rund 20 MP ein genügend gutes Ergebnis an Lagegenauigkeit, Bildüberlappung, Größe der aufgenommenen Fläche pro Flug und Vollständigkeit der Daten zu bekommen, um diese im Rahmen des Vegetationsmanagements der DB Fahrwegdienste verwenden zu können.

## 5. Methodische Vorgehensweise

### 5.1 Ausrüstung

#### 5.1.1 Quantum-Systems Trinity F90+

Die Trinity F90+ ist ein VTOL-fähige Starrflügeldrohne mit einer Spannweite von 2,394 m. Die Trinity F90+ kann aktuell eine Nutzlast von bis zu 700g befördern. Der Hersteller gibt die weiteren technischen Daten wie folgt an:

Max. Startgewicht	5,0 kg
Max. Flugzeit	90+ min
Max. Reichweite = Fläche	100 km = 700 ha
Maximale Flughöhe (MSL)	3000 m
Befehl- und Steuerbereich	5 -7,5 km
Nutzlast	Max. 700 g
Optimale Fluggeschwindigkeit	17 m/s (61,2 km/h)
Windtoleranz (Start)	Bis zu 9 m/s
Windtoleranz (Flug)	Bis zu 12 m/s
Batteriekapazität	12 Ah
Batteriegewicht	1,5 kg
Senderfrequenz Fernbedienung	2,4 GHz
Frequenz Telemetrie-Link	2,4 GHz
Leistung Telemetrie-Link	Max. 100 mW
Temperaturbereich	-12° C bis 50° C
Flügelspannweite	2,394
Abmessungen Transportbox	1002 x 830 x 270 mm
Gewicht Transportbox (mit 3 Batterien)	22,3 kg

Tabelle1: Technische Daten der Quantum-Systems Trinity F90+

Die Trinity F90+ ist seit Ende 2019 erhältlich und ist mit einer Flugzeit von 90 Minuten das ideale UAV für den automatisierten Einsatz zur Aufnahme linearer Infrastruktur wie Bahngleisen. In einem einzigen Flug ließe sich unter BVLOS-Bedingungen eine Strecke von ca. 17 km abfliegen. Dabei wird von vier Flugstreifen in nadir-Ausrichtung der Kamera ausgegangen.

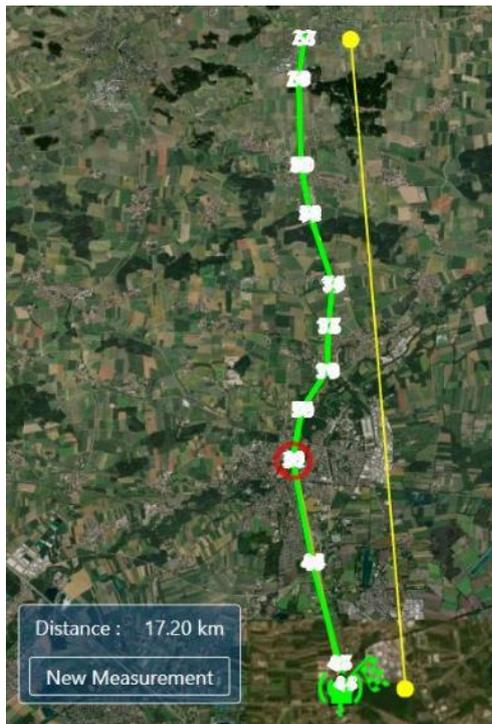


Abbildung 10 Möglichkeit einer Korridormission mit der Trinity F90+

Bei einer angestrebten Befliegung mit nur zwei Flugstreifen, hin und zurück, mit gleichzeitiger nadir und oblique Ausrichtung der Kamera könnte die Flugstrecke sogar auf bis zu 30 km verlängert werden. Im Rahmen des oben beschriebenen mFUND Projektes Free Rail finden unter anderem auch Versuche mit der Datenübertragung mittels 5G statt, welche die Datenübertragung nicht mehr auf die Reichweite eines Funkempfängers beschränken würden. Aktuell müsste die Drohne die Mission bei Entfernungen ab ca. 5 km ohne Verbindung zum Telemetriemodem oder der Funkfernbedienung weiterführen.

### 5.1.2 Sony UMC – Schwenkbarer Eigenbau

Für die Aufzeichnung der Bilddaten wurde eine Kamera vom Typ Sony UMC-R10C verwendet. Die Sony UMC wurde mit einer Auflösung von 20,1 MP und einer sehr schnellen Verschlusszeit von 1 Sekunde für den Einsatz in einem UAV entwickelt. Damit kann die Sony UMC in Kombination mit der schnell fliegenden Trinity F90+ (17 m/s) auch in einer niedrigen Flughöhe von 70 m zum Einsatz kommen und liefert trotzdem noch eine genügende Vorwärtsüberlappung für die Berechnung einer dichten Punktwolke oder eines Orthomosaiks.

Für die Durchführung der vorliegenden Masterarbeit wurde ein Prototyp der Sony UMC – Payloadbay angefertigt, die eine Schwenkung der Kamera aus der üblichen 90°-nadir-Position bis zu einer 45° Position zulässt. Die Kamera wird mit einer Schraube in der gewählten Position gehalten und lässt sich durch Lösen der Schraube mit einem Inbus-Schlüssel in die gewünschte Position schwenken und wieder arretieren.

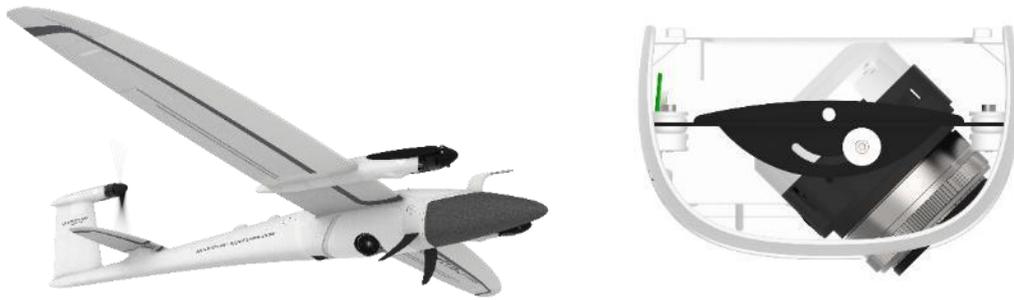


Abbildung1: Trinity F90+ mit zwei schwenkbaren Payload Sony R10C

Durchaus denkbar für die Zukunft ist die Integration von zwei Sony UMC-R10C in eine Payload um so mit einem Double Payload Compartment eine vollkommen synchronisierte nadir und oblique Aufnahme in einem vorher einstellbaren Winkel zu bekommen und die hier gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis umsetzen zu können.

Insbesondere einige chinesische Hersteller bieten auch heute schon Kameras mit oblique ausgerichteten Sensoren an. Meist handelt es sich hierbei um Systeme mit fünf unterschiedlich ausgerichteten Sensoren. Als Beispiele sind die Kameras in Tabelle 2 zu nennen. Aber auch senseFly aus der Schweiz hat mit der S.O.D.A 3D für die Starrflüglerdrohne eBee X eine eigene Oblique-Kamera im Angebot. Die Kamera ändert ihre Ausrichtung während des Fluges, um für ein größeres Sichtfeld drei Bilder (zwei schräg, eins Nadir) aufnimmt.

	senseFly S.O.D.A 3D	ADTi oblique camera OBLIQUE CAMERA SURVEYOR 5 STANDARD	Shenzen Kewetait Oblique Photography Camera	N5 Oblique Camera
Sensor	F +	APS-C CMOS (23.5X15.6mm)	CCD sensor* 5	Sony APS-C sensor
Lens	29mm	25mm/35mm	20mm	16mm, 20mm, 35mm
Pixels Number	20 MP	24 MP	20.1 MP	24,3 MP
Total Pixels	60 MP	120 MP	100,5 MP	120 MP
Oblique Lens Angle	Total FOV 154°	45 degree	42~43 degree	45 degree
Weight	N/A	700 g	2.5 kg.	730 g

Tabelle2: Verschiedene auf dem Markt verfügbare oblique Kameras für sUAS

### 5.1.3 Quantum-Systems iBase GNSS Receiver

Für die Bestimmung der Genauigkeit der bei den Flügen erhobenen Bilddaten wurde die GNSS Basisstation iBase von Quantum-Systems verwendet. Die iBase ist eine einfache GNSS-Referenzstation, die automatisch GNSS Referenzmessungen an einer festen, im Idealfall vorher genau eingemessenen Stelle mit einer Frequenz von 1 Hz aufzeichnet. Damit ist ohne die Verwendung weiterer GCPs eine absolute horizontale Lagegenauigkeit der Bilddaten von 2 – 5 cm möglich. Vertikal kann die Lagegenauigkeit etwas größer ausfallen. Nach (LANGLEY, TEUNISSEN ET AL. 2017) sind VDOP-Werte (Vertical Dilution of Precision) größer als HDOP-Werte (Horizontal Dilution of Precision), was anzeigt, dass vertikale Positionsfehler größer sind als horizontale Fehler. Dieser Effekt stellt sich üblicherweise ein, da sich alle Satelliten, von denen die Referenzstation Signale erhält, über dem Empfänger befinden. Die horizontalen Koordinaten unterliegen keinem ähnlichen Verhalten, da normalerweise Signale von allen Seiten empfangen werden.

Wenn die Erde für Radiowellen durchlässig wäre, könnten vertikale Koordinaten mit der gleichen Genauigkeit wie horizontale Koordinaten bestimmt werden (LANGLEY, TEUNISSEN ET AL. 2017).

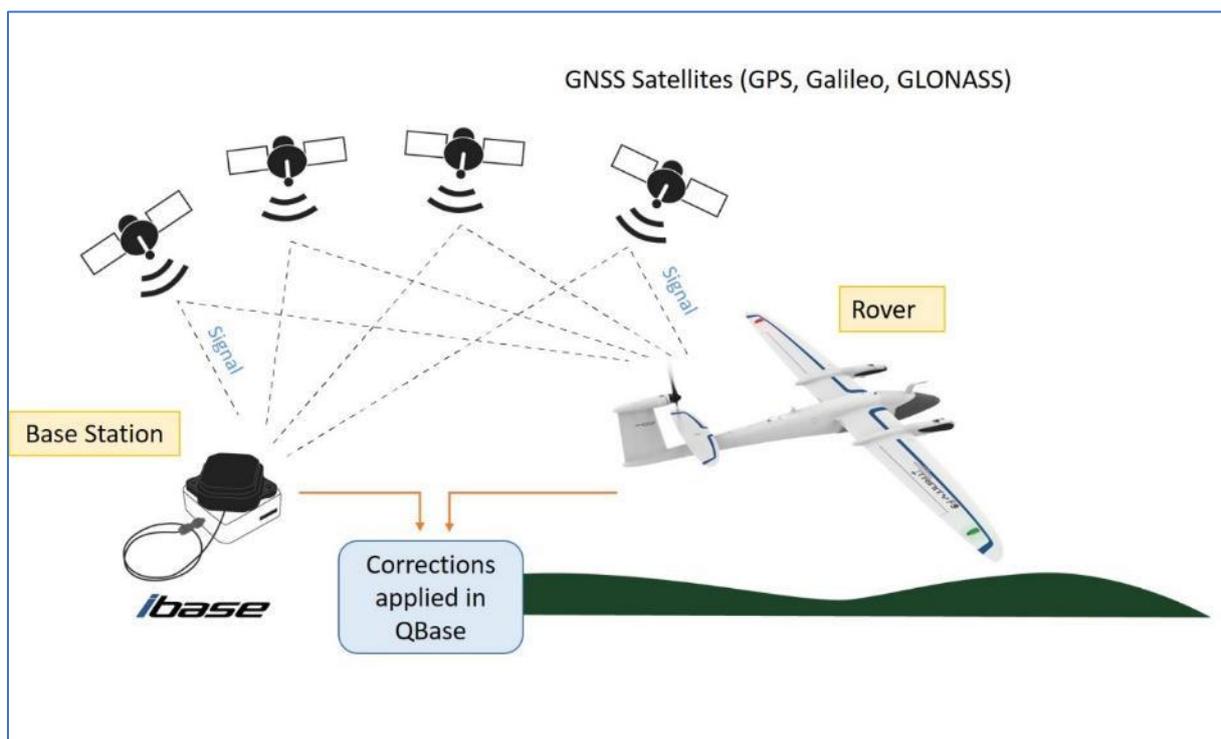


Abbildung 12 Funktionsweise der Datenaufzeichnung und des PPK-Prozesses

Die so erhobenen RINEX-Daten wurden anschließend für den PPK-Prozess in der Quantum-Systems entwickelten Flugplanungs- und Postprocessing-Software QBase 3D verwendet, um die Lagegenauigkeit deutlich zu erhöhen.

Abbildung 12 zeigt die Referenzstation iBase, bestehend aus der Empfängerantenne, der Verarbeitungseinheit mit microSD-Karte und der für den Betrieb notwendigen Stromversorgung in Form einer Powerbank. Die iBase oder jede andere verwendete Basisstation sollte vor Beginn einer Befliegung, bei Ankunft am designierten Start- und Landepunkt immer als erstes in Betrieb genommen

werden. So kann sichergestellt werden, dass die zur Positionskorrektur benötigte RINEX-Datei zeitlich auch den ganzen Flug einschließt. Ebenso sollte die Basisstation nach Landung und Beendigung der Aufnahme als letztes ausgeschaltet werden. Damit lässt sich am besten gewährleisten, dass der Flug und die zu korrigierenden Aufnahmen zeitlich komplett in die Korrekturdatei eingeschlossen sind.



Abbildung 13 Quantum Systems iBaseit GNSS Antenna Cable und Power Bar für die Stromversorgung

#### 5.1.4 Emlid Reach RS2

Für das Einmessen der Kontrollpunkte wurde der Multi-band RTK GNSS Receiver Emlid Reach RS2 verwendet. Mithilfe des Reach RS2 lassen sich Ground Control Points (GCP) unter Verwendung eines Mobiltelefons einmessen. Auf dem Mobiltelefon muss die von Emlid angebotene App „Reach View“ installiert sein, mit der über einen W-LAN Hotspot eine Verbindung zwischen dem Reach RS2 und dem Mobiltelefon hergestellt wird. Die GCPs werden in der Auswertung lediglich als Checkpoints verwendet werden, um die Genauigkeit des PPK-Verfahrens zu überprüfen, die Messungen aber nicht zu beeinflussen.

## 5.2 Flugplanung mit QBase 3D

### 5.2.1 Bisheriger Ansatz – Vier Flugstreifen nadir

Aktuell befliegen die DB Fahrwegdienste eine aufzunehmende Strecke mit vier Flugstreifen in 90 m Höhe. Mit dieser Flughöhe kann die nach Richtlinie 883.7200 Vermessungsflüge (DB NETZ AG 2017) geforderte GSD von unter 2,5 cm mit der aktuell verwendeten Kamera vom Typ Sony UMC R10C eingehalten werden. Durchschnittlich liegt die GSD in dieser Flughöhe mit dem verwendeten Kameramodell bei ca. 2,4 cm. Durch die Verwendung einer geraden Anzahl an Flugstreifen kann vermieden werden, dass das UAV direkt über den Gleisen fliegen muss. Zudem kann eine jeweils gleich große Fläche links und rechts der Gleise abgebildet werden. Die Überlappung beträgt 75% vorwärts und 75% zur Seite. Mit dieser Überlappung kann eine genügend dichte Punktwolke erzeugt werden,

um aussagekräftige Daten zu bekommen und ein lückenloses DSM und Orthomosaik mit allen gängigen Softwarepaketen (z.B. Agisoft Metashape / Pix4Dmapper) erstellen zu können.



Abbildung 4: Beispielhafter Flugplan der Fahrwegdienste mit vier Flugstreifen in einer Flughöhe von 90m mit einer Bildüberlappung von 75% 75



Abbildung 5: Korridorbreite 120 m

Mit dieser Methode kann die Abdeckung der gesamten Stabilisierungszone (mindestens 30m) zu beiden Seiten des Gleiskörpers gewährleistet werden. Zum Rand der Befliegung reicht die Überdeckung der Bilder meist nicht mehr für ein aussagekräftiges, lückenloses Ergebnis aus. Durch die geringe Anzahl der Flugstreifen überdecken sich zum Rand bisweilen nur noch zwei, drei Bilder, was für die photogrammetrische Verarbeitung zu wenig ist.

### Flug 1:

Vier Flugstreifen, 90m Flughöhe, Überlappung (forward / side) 75% / 70%, nur nadir.

Der erste Flug im Rahmen dieser Arbeit wurde nahezu in derselben Konfiguration durchgeführt, wie sie aktuell für Drohnenflüge bei der DB Fahrwegdienste Anwendung findet. Die Flughöhe wurde mit 90 m über Grund so gewählt, dass die Vorgabe der Richtlinie 883.7200 Vermessungsflüge (DB NETZ AG. 2017), nach der sich die Drohnenflüge derzeit richten müssen, umgesetzt werden kann. Im Wortlaut heißt es in der Richtlinie wie folgt:

*Die physikalische Bodenauflösung der Fotos an der Geländeoberfläche muss bei der Aufnahme kleiner oder gleich 2,5 cm (ground sample distance) sein.*

*Die Pixelgröße der digitalen Orthofotos muss dem Aufnahmewert der GSD entsprechen.*



Abbildung 16: Flugplanung des Referenzfluges mit den gleichen Einstellungen wie derzeit von DB Fahrwegdienste verwendet.

Mit diesem Setting kann die geforderte GSD sowie die Breite der doppelten Stabilisierungszone eingehalten werden.

## Flug 2:

Vier Flugstreifen, 80m Flughöhe, Überlappung (forward / side) 75% / 70%, nur nadir

Der zweite Flug wurde von den Einstellungen unverändert durchgeführt. Lediglich die Flughöhe wurde auf 80 m angepasst. Dadurch verringert sich die GSD auf 2,13 cm was eine höhere Detailschärfe der aufgenommenen Objekte zur Folge hat. Dieser Flug wurde in erster Linie durchgeführt, um zu testen, ob eine um 10 m verringerte Flughöhe mit einer besseren Auflösung noch erfolgsversprechend ist, oder ob bereits größere Lücken in der Punktwolke und damit in den Endprodukten DSM und Orthomosaik zu erwarten sind.

Durch die wenigen Flugstreifen, die durch eine Korridormission bedingt sind, kann es mitunter bei der niedrigeren Flughöhe vorkommen, dass die Überlappung der Bilder nicht mehr ausreichend ist und einige Bilder nicht ausgerichtet (engl. *aligned*) werden können, was zu Lücken im Datenverband führt. Die Planungssoftware QBase 3D verwendet als Höhenmodell SRTM-Daten. Dieses Höhenmodell wurde aus Daten generiert, die im Jahr 2000 bei einer Space Shuttle Mission erhoben wurden. Die Daten sind daher zum einen nicht mehr hochaktuell und können mit einer Auflösung von 30 m auch nur ein ungefähres Abbild der Erdoberfläche liefern. Daher werden für die Planung der Mission und der Berechnung der Flughöhe sowie der wahrscheinlichen GSD mitunter nicht die exakten Oberflächenwerte verwendet, sondern nur ungefähre Näherungswerte.

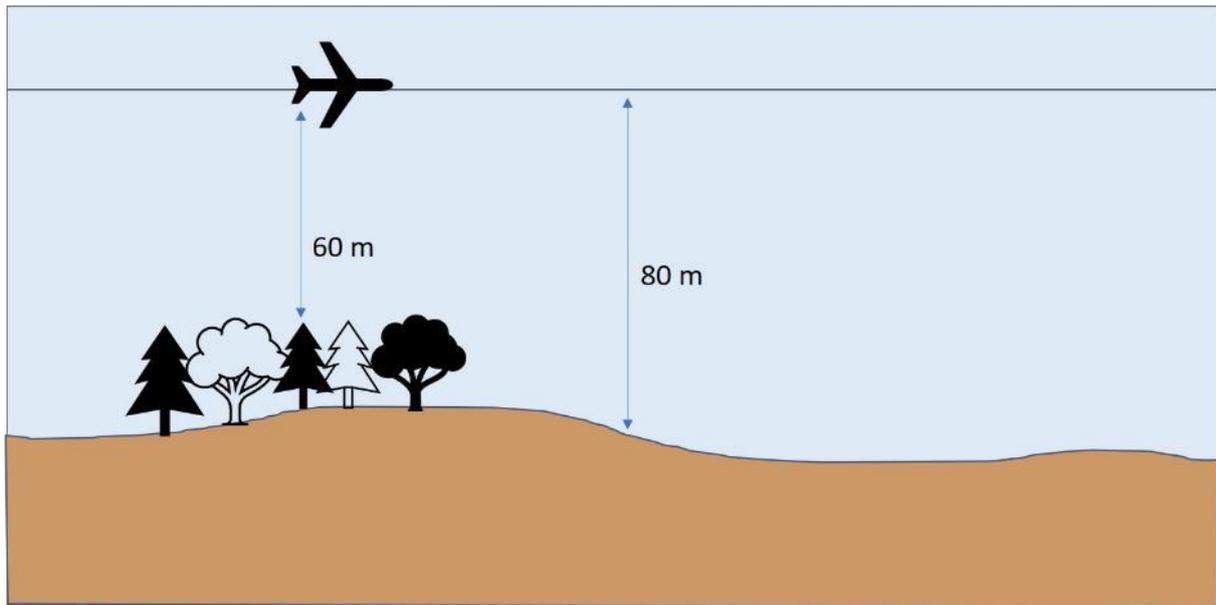


Abbildung 17: Unterschied der Flughöhe und der tatsächlichen Oberfläche (hier Baumkronen)

So kann es durchaus vorkommen, dass ein Flug zwar mit einer durchschnittlichen Höhe von 80 m über dem Geländemodell berechnet wird, aber die tatsächliche Höhe nur 60 m über den Baumwipfeln stattfindet, da die Bäume nicht im verwendeten Geländemodell abgebildet sind und daher die voreingestellte Überlappung für die tatsächlich abgebildete Oberfläche (die Baumkronen) nicht ausreicht.

### **Flug 3:**

Vier Flugstreifen, 70m Flughöhe, Überlappung (forward / side) 75 / 70%, nur nadir

Bei einer Flughöhe von nur 70 m würde sich die GSD auf 1,86 cm verringern und damit schon eine sehr gute Auflösung liefern. Die oben beschriebenen Schwierigkeiten kommen in diesem Setting noch deutlich verstärkt zum Vorschein.

### **Flug 4:**

Vergleich mit 42 MP Kamera (Sony RX1RII), 90m, Überlappung (forward / side) 72% / 70%, nur nadir

Als Referenz mit einer hochauflösenden Vollformat Kamera wurde auch ein Flug mit einer Sony RX1RII durchgeführt. Die Sony RX1 verfügt über eine Auflösung von 42 MP und ist in der Lage aus einer Flughöhe von 90 m Bilder mit einer Auflösung von 1,16 cm zu liefern. Die geringere Vorwärtsüberlappung resultiert aus der etwas geringeren Auslösezeit der Kamera. Dadurch limitiert sich die maximale Vorwärtsüberlappung in geringen Flughöhen.

## 5.2.2 Experimenteller Ansatz – Zwei Flugstreifen nadir und oblique kombiniert

Die Befliegung einer Bahnstrecke mit vier Flugstreifen, bei denen die Kamera rein nadir ausgerichtet ist, birgt die oben beschriebenen Nachteile einer längeren Flugzeit und der mitunter lückenhaften Darstellung des U – bzw. V-Profiles gegenüber der Kombination aus nadir und oblique-Aufnahmen in einem Flug mit nur zwei Flugstreifen.

Der bestmögliche Winkel für die obliquen Aufnahmen kann über den Satz des Pythagoras bestimmt werden, da drei Variablen bekannt sind:

- Die Entfernung des Flugstreifens von der Gleismitte  $\hat{=}$  20 m+ Rückschnittszone + 6m
- Die Entfernung von Boden zu UAV  $\hat{=}$  90 m
- Der Winkel zwischen Boden und UAV  $\hat{=}$  90°

Damit lassen sich alle anderen Winkel wie insbesondere der hier benötigte Winkel zwischen Ankathete und Hypotenuse für die Schwenkung der Kamera.

Da aber der Blickwinkel der Kamera nicht auf die Gleismitte gerichtet sein soll, sondern etwa auf die Mitte der gegenüberliegenden ersten Baumreihe wird hier nicht mit 20 m gerechnet, sondern mit 33 m (20m Abstand zur Gleismitte + 6m Rückschnittszone + 6m zusätzlich).

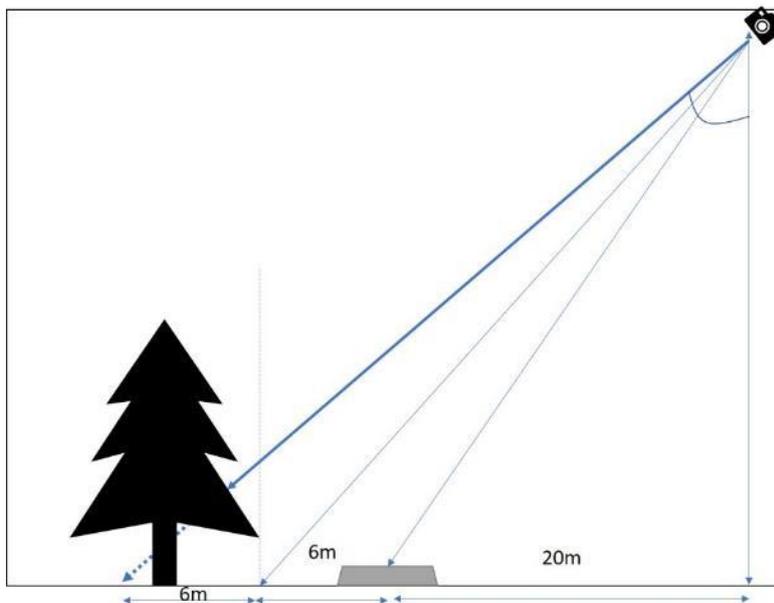


Abbildung 1 & Schematische Darstellung der Berechnung des Winkels für die Schrägluftaufnahmen

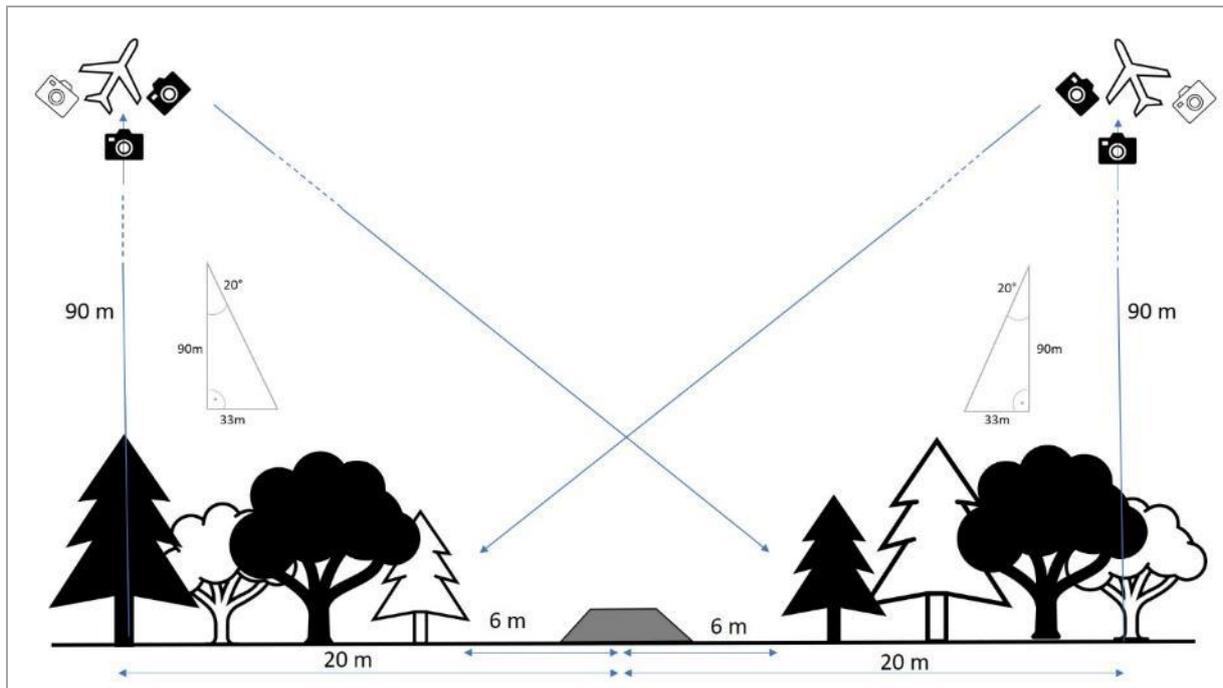


Abbildung 19. Schematische Darstellung der Kamerageometrie für nadir und oblique Aufnahmen mit einem UAV

### Flug 5:

2 Flugstreifen, 90m, Überlappung (forward / side) 80% / 70%, Abstand 40m, nadir und oblique – Winkel 20°

Dieser Flug wurde drei Mal unmittelbar hintereinander durchgeführt, um für alle drei verwendeten Kameraausrichtungen annähernd gleiche Windbedingungen und gleiche Belichtungsbedingungen zu haben. Einmal wurde der Flugplan mit einer nadir ausgerichteten Kamera abgeflogen, einmal mit einer Kamera in Flugrichtung 20° nach rechts ausgerichtet (zum Gleis hin) und einmal mit einer Kamera in Flugrichtung 20° nach links (vom Gleis weg) ausgerichtet.

Die ursprüngliche Idee der Datenaufnahme sah nur zwei Kameraausrichtungen – nadir und 20° in Flugrichtung nach rechts ausgerichtet – vor, aber es wurde auch ein Flug mit einer dritten Kameraausrichtung durchgeführt, um ein zusätzliches Szenario auswerten zu können.

Abbildung 20 zeigt die Flugplanung für den Flug mit nur zwei Flugstreifen in der Planungs- und Auswertesoftware QBase 3D. Start und Landung sind an einem Weg, ca. 100 m neben dem Gleis geplant. Hier kann das zum Transport der Drohne notwendige Auto geparkt werden und nach Nordosten steht genug Platz ohne Hindernisse wie Bäume oder Gebäude zur Verfügung um die Transition bzw. Re-Transition der Trinity F90+ zu ermöglichen.

Laut Flugplanung beträgt die gesamte Flugzeit für die in etwa 800 m lange Strecke nur etwas mehr als vier Minuten. Der Bereich „Plots“ im unteren Bereich des Bildes zeigt die geplante Flughöhe der Drohne über der Take-Off Höhe.



Abbildung 20 Flugplanung mit zwei Flugstreifen

Um den Nachteil der wenigen, sich überlappenden Bildern bei nur zwei Flugstreifen wurde die Vorwärtsüberlappung auf den maximal möglichen Wert von 80% erhöht. Der Seitenabstand kann nicht höher als 70% gesetzt werden, da die beiden Flugstreifen sonst zu nahe beieinander liegen müssten und die Gefahr bestünde, dass nicht die komplette, doppelte Stabilisierungszone von 60m beidseits der Gleismitte abgebildet werden würde.

### 5.3 Anwendung des PPK Verfahrens

Für das Postprocessing mit PPK wird ein so genanntes FlyLOG aus der Trinity F90+ selbst benötigt, welches die Kamerapositionen mit normaler GNSS-Genauigkeit gespeichert hat, sowie eine RINEX-Datei mit den Korrekturdaten für die Kamerapositionen und die Bilder selbst. Mit dem in QBase 3D implementierten Postprocessing kann die Positionskorrektur durchgeführt werden. Es kann hierdurch eine absolute Genauigkeit der Bilder von bis zu 2 – 5 cm erreicht werden.

### 5.4 Durchführung der Befliegung

#### 5.4.1 Auswahl der Strecke

Die Befliegungen fanden entlang der Strecke der S8 MVV zwischen München und Herrsching am Ammersee bei Streckenkilometer 21 südlich der Ortschaft Weißling statt. Die Gleise führen hier in südwestlicher Richtung von Gilching zum nächsten Bahnhof in Steinebach. Die Bahnstrecke ist eingleisig angelegt und vollständig elektrifiziert.

Die Strecke der S-Bahn führt an der beflogenen Stelle zuerst über eine Straßenbrücke über die St2349, rund 130 Meter über offenes Gelände sowie 500 Meter durch ein dichtes Waldstück. Auf der Nordseite, bzw. in Fahrtrichtung Herrsching auf der rechten Seite setzt sich der Wald überwiegend aus Laubbäumen zusammen, wohingegen auf der linken Seite, südlich der Gleise, fast ausschließlich Fichten zu finden sind. Somit konnten auf diesem kurzen Abschnitt viele für die Auswertung interessante Gegebenheiten in die Untersuchung miteinbezogen werden. Das sind unter Anderem Bauwerke, Offenland, dichter (Nadel)-Wald, unbelaubter Wald und Oberleitungsmasten.



Abbildung 21: Befliegungsgebiet mit Bahngleisen der Münchner Verkehrsbetriebe bei Streckenkilometer 21

#### 5.4.2 Durchführung der Datenerhebung

Der Großteil der ausgewerteten Daten wurde an zwei Befliegungsterminen (13.11.2020 und 18.11.2020) unter ähnlichen äußeren Bedingungen erhoben. Aufgrund des im November sehr niedrigen Sonnenhöchststandes wurde darauf geachtet, die Flüge zur Mittagszeit durchzuführen, um so viel Licht wie möglich für die aufgenommenen Bilder zur Verfügung zu haben. An beiden Befliegungsterminen herrschte klares, sonniges Wetter, so dass trotz der eher ungünstigen Jahreszeit ausreichend viel Licht zur Verfügung stand. Die Versuche mit größeren Abständen zwischen den beiden Flugstreifen und den damit einhergehenden weniger steilen Winkeln fanden bei Schneebedeckung des Bodens am 11.02.2021 statt. Der Himmel war an diesem Tag wolkenlos und es wehte nur ein sehr mäßiger Wind.

Der gewählte Streckenabschnitt liegt komplett in der Kontrollzone des Sonderflugplatzes Oberpfaffenhofen (EDMO). Daher bedurfte es einer Genehmigung seitens der EDMO-Flugbetrieb GmbH um die Flüge nach vorheriger telefonischer Anmeldung innerhalb der Kontrollzone durchführen zu können.

Die Flüge wurden so geplant und durchgeführt, dass für alle Flüge ähnliche äußere Umstände zu erwarten waren. Das sind in erster Linie die Tageszeit und die Windstärke. Die Befliegungen fanden um die Mittagszeit von ca. 11:30 Uhr bis 14:00 Uhr bei annähernd Windstille statt.

Zuerst wurden mit einem Emlid Reach RS2 jeweils fünf Checkpoints für die anschließende Betrachtung der Genauigkeit eingemessen. Um eine PPK Genauigkeit erreichen zu können, muss auf das Einmessen der Punkte mit einer Fix-Solution geachtet werden, weil ansonsten nur eine „normale“ GPS-Genauigkeit, mit den üblichen Abweichungen gemessen wird. Beispielsweise sind GPS-fähige Smartphones unter freiem Himmel in der Regel bis auf einen Radius von 4,9 m (16 ft.) genau (NOAA 2020).

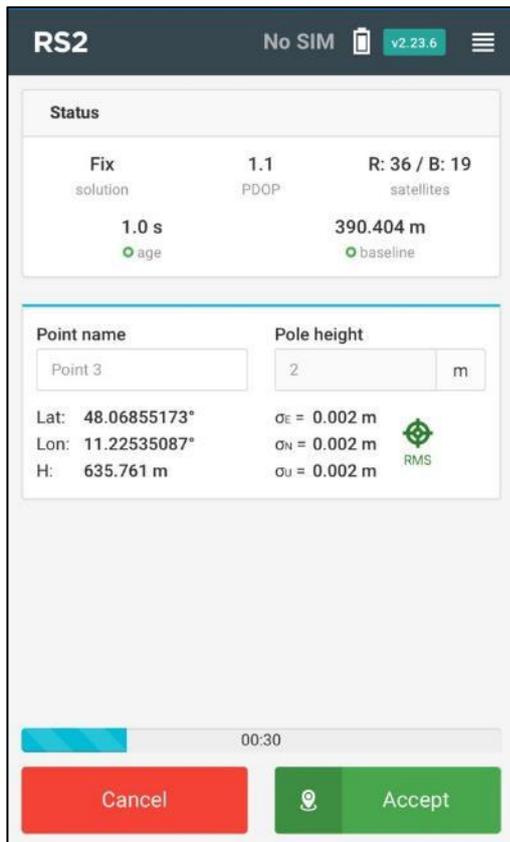


Abbildung 23 Hochgenaue Einmessung der Checkpoints mit einem Emlid Reach RS2



Abbildung 22 Verteilung der eingemessenen Checkpoints entlang der Versuchsstrecke

Zum Erhalt der Korrekturdaten für den PPK-Prozess wurde die iBase-Referenzstation auf einen zuvor mit dem Emlid Reach RS2 genau eingemessenen Punkt gelegt. Hierfür wurde Point 1 verwendet. Der PPK-Prozess wurde nach dem Flug durch Verwendung des auf der Trinity F90+ gespeicherten FlyLogs mit den unkorrigierten Bildpositionen und den mit der iBase aufgezeichneten Korrekturdaten durchgeführt. Mit dieser Methode ließ sich eine zentimetergenaue Korrektur der Bildpositionen sowohl in horizontaler wie auch in vertikaler Richtung erzielen. Die Entwicklung hochwertiger Technologien für Inertiale Messeinheiten (IMU) und globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) sowie spezielle RTK-Technologien (real-time kinematic) und PPK (post-processing kinematic) Lösungen für UAVs hat die genaue Messung von UAV-Kameraposition und -ausrichtungen ermöglicht (Zhang, Aldana-Jague et al. 2019). Mit der von Quantum-Systems entwickelten und vertriebenen Software QBase 3D lässt sich der PPK Workflow mit jedem zum entsprechenden Ort und Zeit passenden RINEX-file ausführen.



Abbildung 24 Checkpoint dargestellt in Agisoft Metashape

Die Befliegungen selbst wurden nach zuvor festgelegten Missionen von der Drohne automatisch durchgeführt. Dafür wurden festgelegte Korridormissionen mit zwei oder vier Flugbahnen in unterschiedlicher Höhe geplant. Die rein nadir ausgelegten Referenzflüge konnten in einem einzigen Flug mit je vier Flugstreifen abgeschlossen werden.

Für die Messflüge, die eine Kombination aus nadir und in bestimmten Winkeln oblique ausgerichteten Kameras zum Ziel hatten, musste aufgrund der Auslegung der UAV-Payload mehrmals pro Flughöhe geflogen werden. Wie oben beschrieben, verfügt die verwendete Payload aktuell nur über eine, manuell schwenkbar montierte Kamera vom Typ Sony UMC-R10C. So wurde der Flugplan zuerst mit der nadir ausgerichteten Kamera abgeflogen und nach der Landung wurde der entsprechende Winkel an der Payload eingestellt um den gleichen Flugplan im Anschluss mit der nun geneigt ausgerichteten Kamera erneut abzufliegen. Die nacheinander, verschieden ausgerichteten Bilder, der gleichen Flugstreifen können in entsprechender Photogrammetriesoftware wie Agisoft Metashape oder Pix4Dmapper getrennt voneinander betrachtet werden, oder zu einem Gesamtprojekt zusammengefügt werden, um einen Flug mit verschiedenen ausgerichteten Kameras zu simulieren.

#### 5.4.3 Besonderheiten und Fotos

Während der Bearbeitung und Auswertung der Flüge an der Bahnstrecke ist eine Besonderheit aufgetreten, die in Zusammenhang mit dem von QBase 3D standardmäßig verwendeten Geländemodell steht. Der Referenzflug mit vier Flugstreifen und rein nadir gerichteter Kamera wurde aufgrund der in oben erwähnten Richtlinie 883.7200 Vermessungsflüge der DB Netz AG vorgegebenen maximalen GSD von 2,5 cm in 90m Flughöhe geplant und geflogen. Für die Flugplanung im richtigen Abstand von der Erdoberfläche verwendet QBase 3D SRTM-Daten mit 30 m Auflösung. Diese Daten haben den Vorteil, dass sie nahezu weltweit (zwischen 60° Nord und 58° Süd) kostenlos zur Verfügung stehen und im proprietären .hgt-Format sehr wenig Speicherplatz beanspruchen. Hgt steht als Abkürzung für „height“.

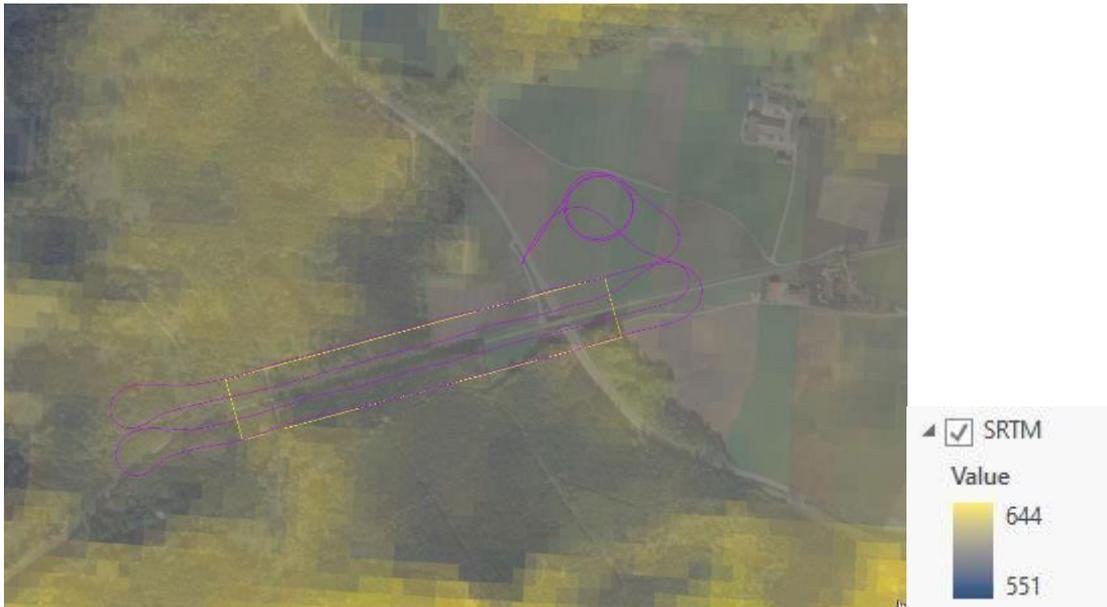


Abbildung 25 Überlagerung von SRTM-Daten und dem ESRI World Imagery Service, sowie Anzeige eines Flugpfades als KML-Datei



Abbildung 26 Überlagerung von Höhendaten der Bayerischen Vermessungsverwaltung und dem ESRI World Imagery Service, sowie Anzeige eines Flugpfades als KML-Datei



Wird dagegen die tatsächliche Höhe über Grund gemessen, welche durch Verwendung des Geländemodells der Bayerischen Vermessungsverwaltung ermittelt werden kann, fliegt das UAV an dieser Stelle tatsächlich 102 m über Grund.

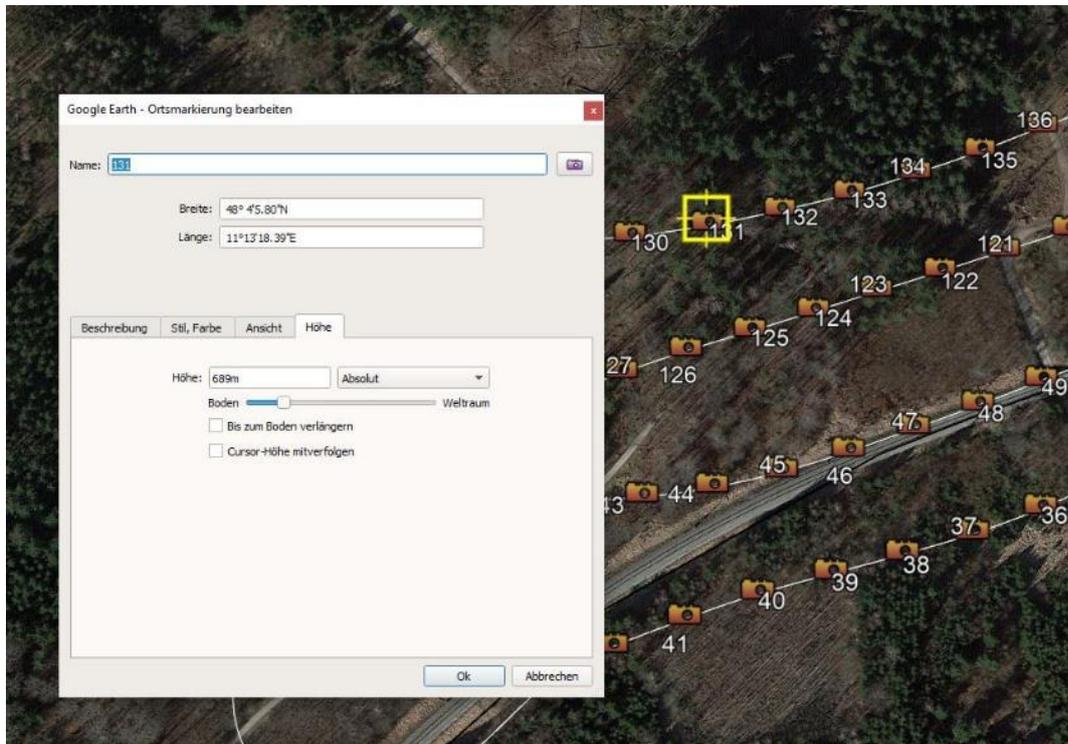


Abbildung 29 Höhe der Kameraposition über der Bodenoberfläche nach Google Earth

Verantwortlich dafür ist die Tatsache, dass SRTM-Daten nicht wirklich ein von Vegetation und Bebauung bereinigtes Geländemodell darstellen, sondern teilweise eher einem Oberflächenmodell gleichen. Denn anhand der Flugplanungs- und Monitoring Software befand sich die Trinity F90+ an der in Abb. 28 beschriebenen Stelle in 685 m MSL exakt 90 m Flughöhe über Grund. Tatsächlich waren es an dieser Stelle jedoch rund 100 m AGL. QBase 3D verfügt über die Möglichkeit andere Höhendaten für die Planung zu verwenden. Diese müssen im geodätischen Referenzsystem WGS1984 vorliegen und für die Verwendung als Planungsgrundlage in einen speziellen Unterordner der QBase 3D Ordnerstruktur kopiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden in allen Tabellen und Abbildungen die geplanten Flughöhen angegeben. In der Praxis muss aber sehr auf diese Besonderheiten der verwendeten Höhendaten geachtet werden, um etwaig bestehende Vorschriften zur maximalen GSD einzuhalten. Das kann mitunter das Ausweichen auf andere, genauere Höhendaten notwendig werden lassen.



Abbildung30 Screenshot von QBase während eines Fluges über dem Untersuchungsgebiet

Unmittelbar vor den Flügen mit der Trinity F90+ in den verschiedenen Flughöhen und mit unterschiedlichen Kameraausrichtungen wurden die fünf GCPs, die in der Auswertung nur als Checkpoints Verwendung fanden, mit einem Emlid Reach RS2 Multi-band RTK GNSS Receiver eingemessen.

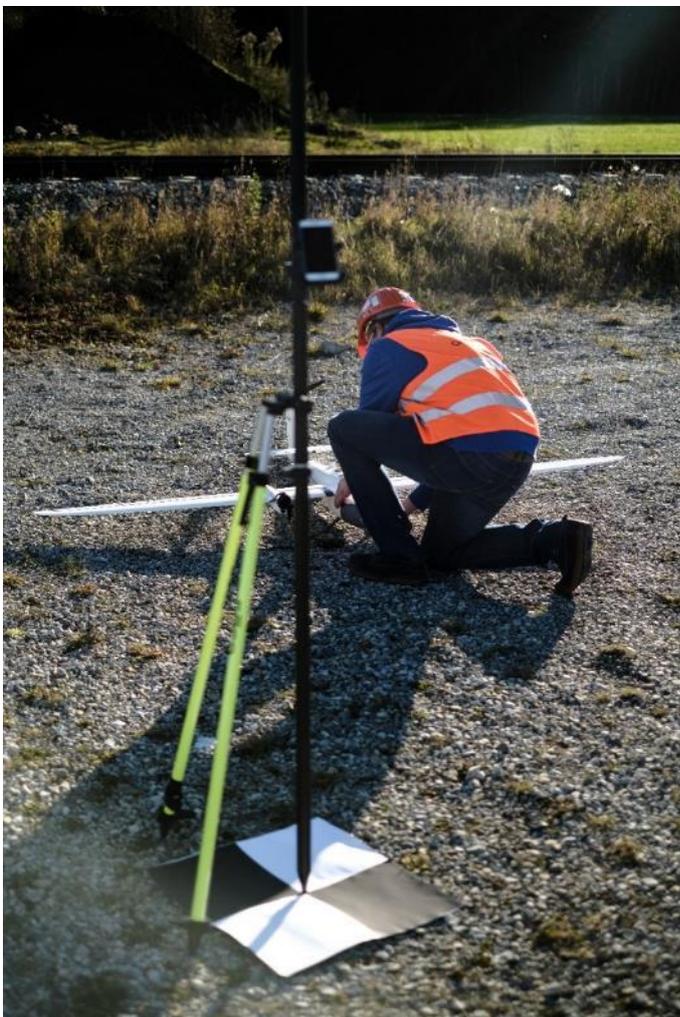


Abbildung31: Einmessen eines Checkpoints an der Bahnstrecke

Für die Flüge mit unterschiedlicher Kameraausrichtung wurde die Trinity F90+ mehrmals hintereinander mit dem exakt gleichen Flugplan, aber jeweils anders ausgerichteter Kamera gestartet. Hier im Bild die Kamera in Nadir-Position direkt nach unten gerichtet. Alle drei Propeller sind in der Abbildung bereits nach oben gerichtet und das UAV befindet sich im Landeanflug.



Abbildung 32 Trinity F90+ Schwebeflügler



Als Checkpoints kamen selbstgebaute schwarz-weiße Marker zum Einsatz.

Abbildung 33 Vermessung von Checkpoint mit Leica Reach RS2

## 6. Ergebnisse

### 6.1 Photogrammetrische Auswertung

Für die photogrammetrische Auswertung wurde die weit verbreitete, kommerzielle SfM-Software Agisoft Metashape in der aktuellen Version 1.6.5 verwendet. Für die vorausgehende Georeferenzierung der jeweils aufgenommenen Bilder, wurde die von Quantum-Systems entwickelte Flugplanungs- und Postprozessierungssoftware QBase 3D in der aktuellen Version 2.3.22 verwendet.

QBase 3D ermöglicht die Korrektur der Positionierung der aufgenommenen Bilder nach dem Flug, beispielsweise unter Verwendung der Korrekturdaten, die während des Fluges von der Basisstation iBase von Quantum-Systems aufgezeichnet wurden. Auch jede andere RINEX2 oder RINEX3 (Receiver Independent Exchange Format) Datei der entsprechenden Örtlichkeit und mit dem richtigen Zeitstempel kann für die PPK-Korrektur verwendet werden. Beispielhaft sei hier die Möglichkeit des Bezugs einer RINEX-Datei einer virtuellen Referenzstation über SAPOS genannt. QBase 3D kann das PPK-korrigierte Geotagging sowohl in die EXIF-Daten der Bilder schreiben (dafür wird eine Kopie aller Bilder abgespeichert) oder eine CSV-Tabelle mit den korrigierten Bildkoordinaten sowie den Lagewinkeln des UAV ausgeben. Um Speicherplatz zu sparen, wurde hier die zweite Methode angewendet.

Für die Auswertung in Agisoft Metashape wurden für die Auswertungen aller Flüge immer die gleichen Einstellungen verwendet.

#### 1. Import der CSV-Tabelle mit Lagewinkeln

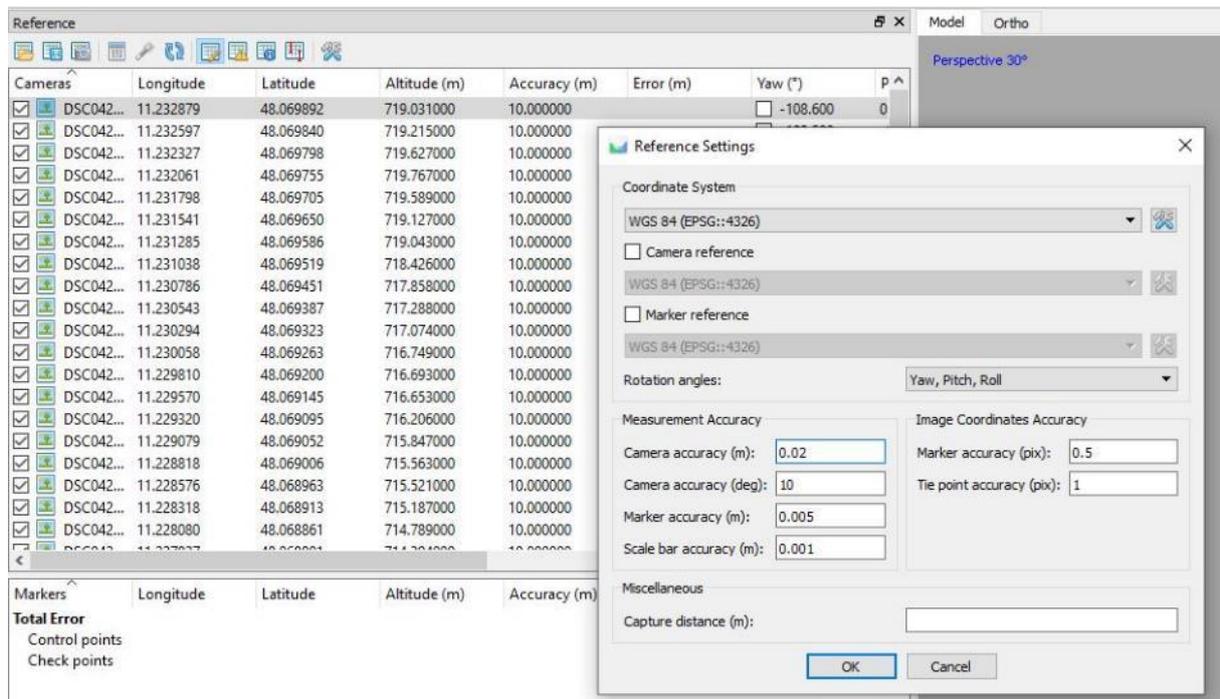
The screenshot shows the 'Import CSV' dialog box in Agisoft Metashape. The dialog is configured with the following settings:

- Coordinate System:** WGS 84 (EPSG:4326)
- Rotation angles:** Yaw, Pitch, Roll
- Ignore labels:**
- Threshold (m):** 0.1
- Delimiter:** Comma
- Columns:**
  - Label: 1
  - Longitude: 2
  - Latitude: 3
  - Altitude: 4
  - Yaw: 5
  - Pitch: 6
  - Roll: 7
  - Accuracy:
  - Rotation:
  - Accuracy:
  - Enabled flag: 10
- Start import at row:** 1
- Items:** All

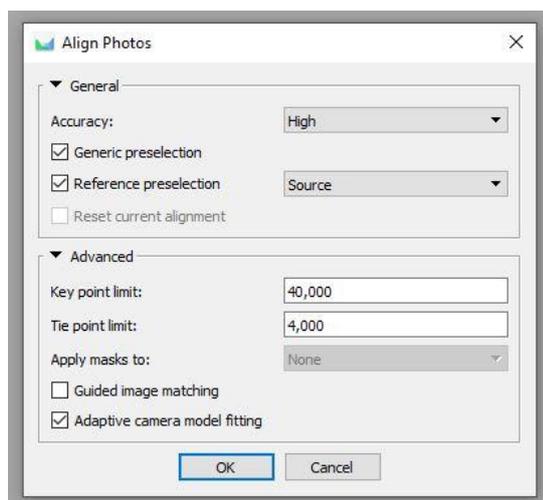
The 'First 20 lines preview' table is as follows:

	Label	Longitude	Latitude	Altitude	Yaw	Pitch	Roll
1	image	lon	lat	alt	yaw	pitch	roll
2	DSC04274.JPG	11.232879046	48.069892181	719.031	-108.6	0.4	8.8
3	DSC04275.JPG	11.232596731	48.069839663	719.215	-103.5	-0.2	3.0
4	DSC04276.JPG	11.232327474	48.069797732	719.627	-104.4	-0.6	-2.3
5	DSC04277.JPG	11.232061219	48.069754521	719.767	-105.0	-1.2	-4.2
6	DSC04278.JPG	11.231798084	48.069705428	719.589	-106.8	-1.5	-3.7
7	DSC04279.JPG	11.231540553	48.069649791	719.127	-108.6	-0.6	-4.2

- Der Wert „Camera Accuracy“ wurde jeweils auf 0,02 m gesetzt, um die Genauigkeit der Messwerte in das Alignment miteinzubeziehen



- Das Alignment der Bilder wurde jeweils in der Genauigkeit „High“ mit den von Agisoft empfohlenen Key point limits von 40.000 und Tie point limits von 4.000 durchgeführt



### 6.1.1 Referenzflug – Sony UMC-R10C – Vier Flugstreifen – 90 m – nadir

Dieser Flug wurde nach den Parametern durchgeführt, wie die Mitarbeiter der DB Fahrwegdienste GmbH aktuell Befliegungen mit der Trinity F90+ und der Sony UMC-R10C durchführen. Für die Flughöhe wurde in der Planungssoftware 90m festgelegt, um die geforderte GSD von unter 2,5 cm zu erreichen.



Abbildung 34 Dichte Punktwolke aus Agisoft Metashape Flug mit vier Flugstreifen in 90 m Höhe ausgerichteter Kamera

Mit diesem Flug wurden auf vier rund 875 m langen Flugbahnen insgesamt 170 Bilder aufgenommen. Die GSD lag mit durchschnittlich 2,51 cm tatsächlich etwas über dem geforderten Grenzwert von 2,5 cm. Das ist vermutlich Ungenauigkeiten in dem der Planung zugrunde liegenden SRTM-Höhenmodell geschuldet und der Berechnung der Flughöhe in Agisoft Metashape.

PhotoScan schätzt den durchschnittlichen Abstand zwischen den Kameras und den Punkten der Sparse Cloud. Der Abstand kann aufgrund des stochastischen Elements im Ausrichtungsprozess leicht variieren. Bei den Projekten ohne GCPs wird die Brennweite möglicherweise nicht so genau geschätzt (PASUMANSKY 2016)

Auch wenn hier die Rede von der Vorgängersoftware Agisoft Photoscan ist, hat sich an diesem Umstand grundlegend nichts geändert und die Aussage behält ihre Gültigkeit auch für Agisoft Metashape.

Aus der Flugplanung mit QBase 3D ergibt sich durchgängig eine Flughöhe von rund 90 m bei Nutzung der Terrain Following Option. Siehe Erklärung Kapitel 5.4.3

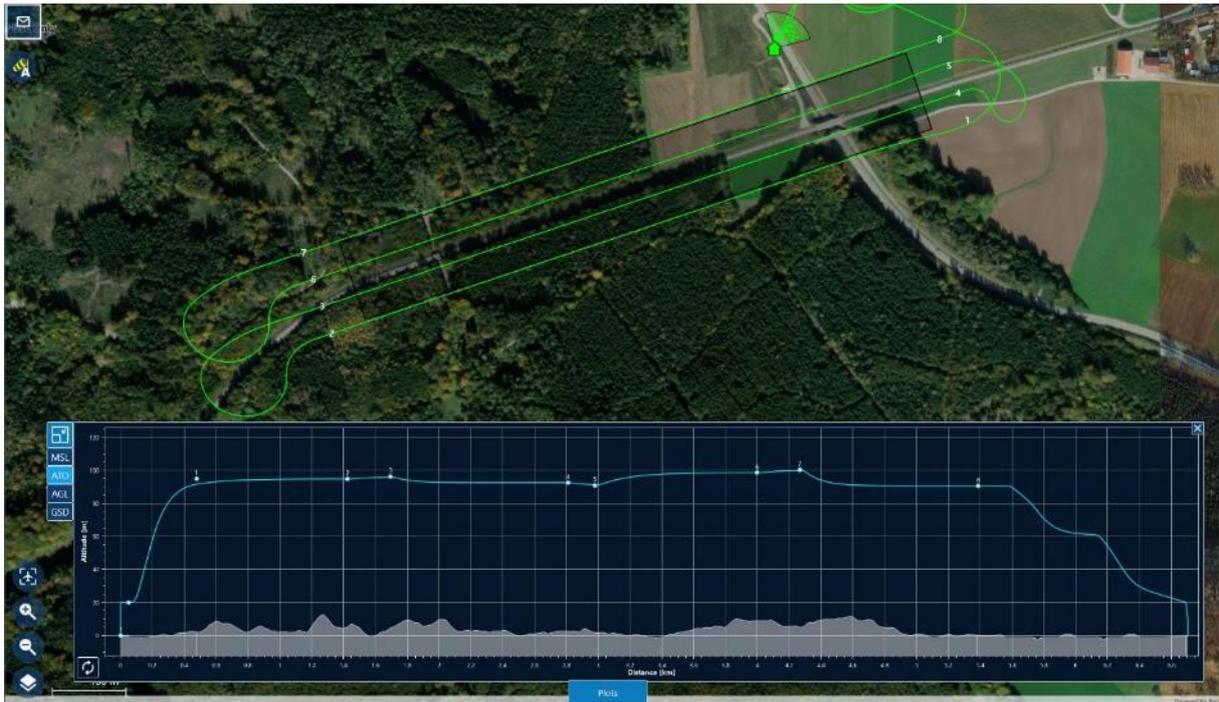


Abbildung 35 Screenshot der Planungssoftware Base 3D mit geöffnetem Plot und Anzeige der geschätzten Flughöhe über Startpunkt (ATO)

Alle 170 Bilder konnten während des in der photogrammetrischen Auswertung initialen Alignment-Prozesses zugeordnet werden und so für die Berechnung der Punktwolke, der Dichten Punktwolke, des DEMs und des Orthomosaiks miteinbezogen werden.

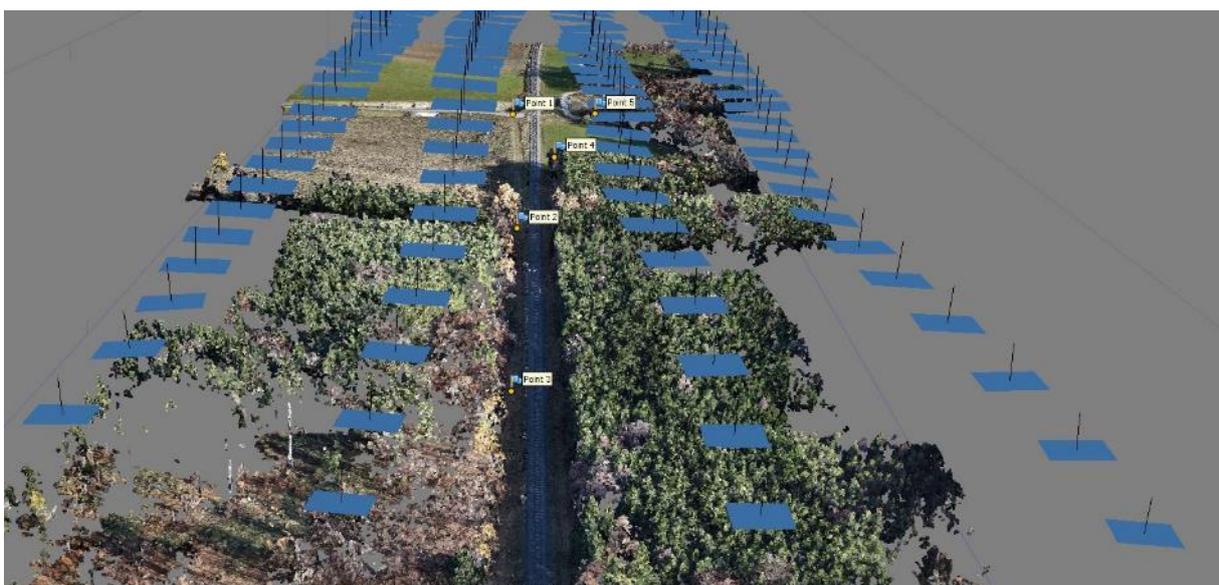


Abbildung 36 Perspektivischer Blick auf dichte Punktwolke mit Fotopositionen in Agisoft Metashape

Den Korridor, 60 m links und rechts der Gleise kann das aus diesem Ergebnis abgeleitete Orthomosaik komplett und ohne Lücken darstellen. Die gesamte Breite des Orthomosaiks beträgt rund 230 m, wobei die lückenlose Generierung des Orthomosaiks bis etwa 80 m beiderseits des Bahngleises gelingt.



Abbildung 37 Orthomosaik der Befliegung mit vier Flugstreifen in 90 m Flughöhe, begrenzt auf einen 120 m breiten Korridor



Abbildung 38 Das komplette Orthomosaik der Befliegung mit vier Flugstreifen in 90 m Höhe mit den Bildpositionen

Abbildung 39 zeigt die aus der photogrammetrischen Analyse mit Agisoft Metashape abgeleitete Dichte Punktwolke. Wie erwartet, weist der Waldrand bei dieser Konfiguration des Fluges und der Kameraausrichtung einige Lücken im unteren Stammbereich der Bäume auf. Es ist einer Nadir

ausgerichteten Kamera nicht möglich Aufnahmen der unteren Äste und des Stammbereichs der Bäume zu machen, da diese Oberflächen von der darüberliegenden Baumkrone verdeckt werden und sich so zwangsläufig Lücken in der photogrammetrischen Punktwolke ergeben.

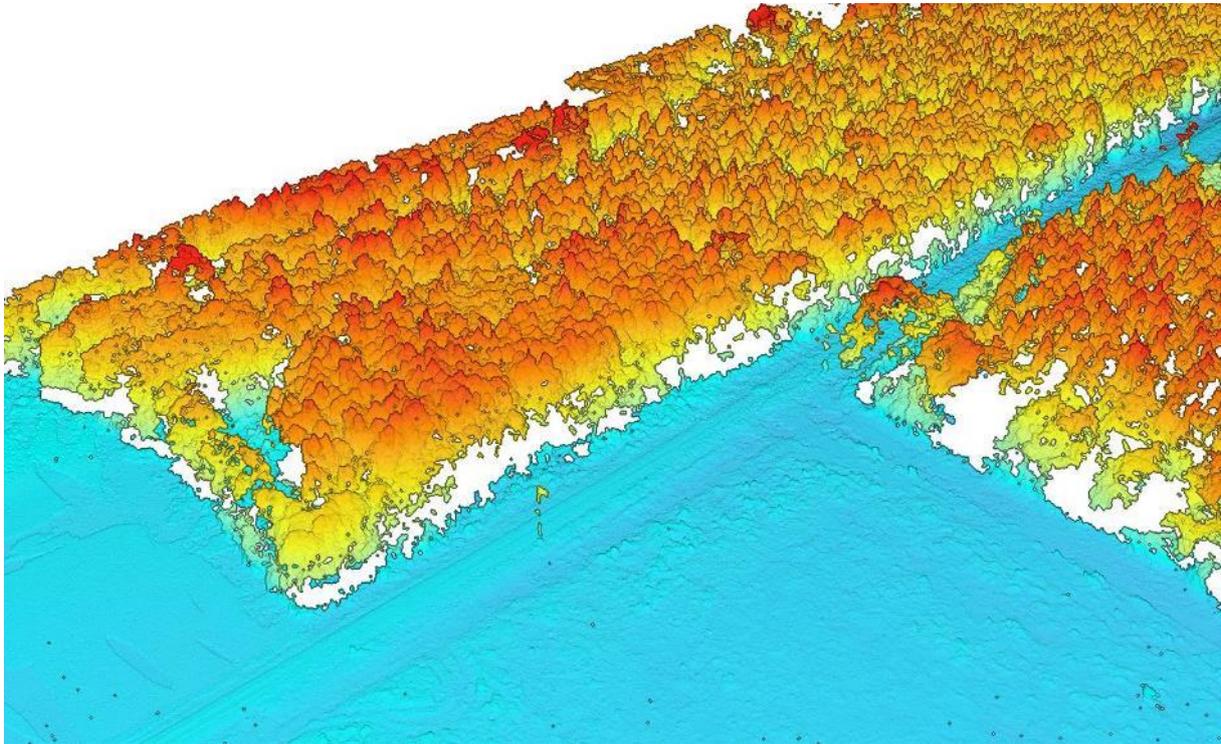


Abbildung 39 Perspektivische Darstellung der Punktwolke der Befliegung mit vier Flugstreifen in 90 m Flughöhe in ArcGIS Pro

Zusammenfassung Referenzflug mit Sony UMC-R10C – 90 m - nadir	
Flugzeit	6 min 14 s
Anzahl Bilder	170
Abdeckung	24,2 ha
GSD	2,51 cm
Durchschnittliche Punktdichte / m <sup>2</sup>	ca. 463
Tie Points	74.866
Reprojection Error	0,464 pix
Error estimates in cm	1,98 (x/y/z - 1,06964/1,26521/1,08523)
RMSE checkpoints in cm	10,62 (x/y/z - 2,93942/3,87851/9,43737)

Tabelle 3 Zusammenfassung der wichtigsten Größen der Befliegung mit vier Flugstreifen in 90 m Flughöhe

### 6.1.2 Vergleichsflug Sony UMC-R10C– Vier Flugstreifen – 80 m – nadir

Zum Vergleich wurde auch ein vom Setting her unveränderter Flug in einer Flughöhe von 80 m durchgeführt. Denn auch die optimale Flughöhe für die Kombination aus Trinity F90+ und Sony UMC-R10C ist von Interesse für weitere Planungen.

Auch die Befliegung der Fläche mit einer vordefinierten Korridormission mit rund 80 m Flughöhe ergibt ein genügend breites Orthomosaik, jedoch in einer besseren Auflösung von ca. 2,2 cm.



Abbildung 40 Orthomosaik der Befliegung mit vier Flugstreifen in 80 m Flughöhe, begrenzt auf einen 120 m breiten Korridor

Diese Befliegung fand an einem anderen Tag statt als die restlichen hier ausgewerteten Flüge. Daher weichen die Messwerte teils gravierend voneinander ab.

Zusammenfassung Referenzflug mit Sony UMC-R10C – 80 m - nadir	
Flugzeit	6 min 25 s
Anzahl Bilder	172
Abdeckung	18,2 ha
GSD	2,22 cm
Durchschnittliche Punktdichte / m <sup>2</sup>	ca. 581
Tie Points	79.653
Reprojection Error	0,572 pix
Error estimates in cm	8,43 (x/y/z – 6,62712/4,19066/3,09529)
RMSE checkpoints in cm	24,53 (x/y/z – 2,51846/6,19516/23,5995)

Tabelle 4: Zusammenfassung der wichtigsten Größen der Befliegung mit vier Flugstreifen in 80 m Flughöhe

### 6.1.3 Vergleichsflug Sony UMC-R10C – Vier Flugstreifen – 70 m – nadir

Zum Test der Verwendung einer deutlich niedrigeren Flughöhe als sie bisher in der Praxis der DB Fahrwegdienste zum Einsatz kommt, wurde am gleichen Tag der oben beschriebenen Flüge noch ein

weiterer Flug mit dem gleichen Setting und einer eingestellten Flughöhe von 70 m AGL durchgeführt. Ziel dieses Testflugs war die Überprüfung der grundsätzlichen Möglichkeit des Einsatzes der Sony UMC-R10C bei niedrigeren Flughöhen um eine deutlich bessere Auflösung als die geforderte von 2,5 cm zu erhalten.

Auch diese niedrige Flughöhe ermöglicht bei einer genügend hohen Überlappung der Bilder noch die Erstellung eines lückenlosen Orthomosaiks. Gerade über dem bewaldeten Bereich im westlichen Bereich der Befliegung liegt die effektive Flughöhe über der Oberfläche der Bäume bei gerade noch rund 50 m.



Abbildung 41: Orthomosaik der Befliegung mit vier Flugstreifen in 70 m Flughöhe, begrenzt auf einen 120 m breiten

Zusammenfassung Referenzflug mit Sony UMC-R10C – 70 m - nadir	
Flugzeit	6 min 41 s
Anzahl Bilder	196
Abdeckung	19,4 ha
GSD	2,11 cm
Durchschnittliche Punktdichte / m <sup>2</sup>	ca 564
Tie Points	85.903
Reprojection Error	0,52 pix
Error estimates in cm	1,72 (x/y/z – 1,01441/1,05942/0,902557)
RMSE checkpoints in cm	16,92 (x/y/z – 3,64932/5,36174/15,6304)

Tabelle 5: Zusammenfassung der wichtigsten Größen der Befliegung mit vier Flugstreifen in 70 m Flughöhe

#### 6.1.4 Vergleichsflug Sony RX1RII – Vier Flugstreifen – 90 m – nadir

Zum Vergleich wurde auch ein Flug mit einer Sony RX1RII Vollformatkamera mit einer Auflösung von 42MP Auflösung durchgeführt.

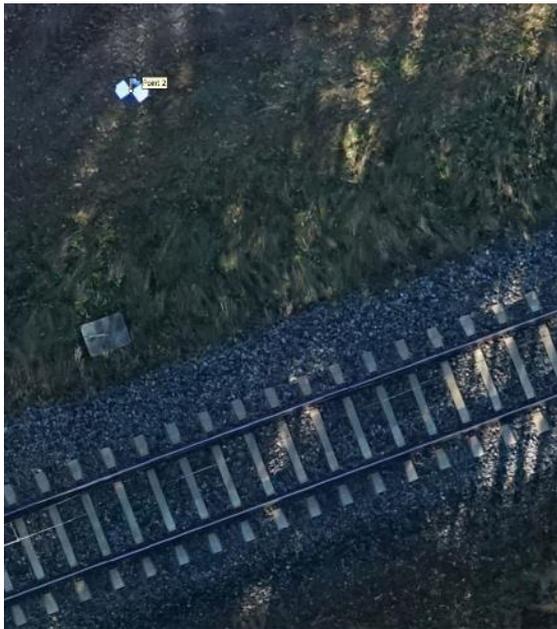


Abbildung 43 Detailaufnahme mit Sony RX1RII



Abbildung 42 Detailaufnahme mit Sony UR10C

Mit der Sony RX1RII kann dank der deutlich höheren Auflösung eine wesentliche bessere Detailschärfe erreicht werden, wie sie beispielsweise zur Inspektion von Bauwerksschäden unabdingbar ist. Auch im Rahmen des Vegetationsmanagements kann die Sony RX1RII ihre hohe Auflösung ausspielen und extrem detailreiche Aufnahmen für die anschließende Analyse liefern. Jedoch soll die Sony RX1RII hier nur stellvertretend für die Möglichkeiten hochauflösender Kameras im drohnengestützten Vegetationsmanagement entlang von linearer Infrastruktur dienen, da dieser Kamerateyp aufgrund seines Gewichts von rund 500g und seiner größeren Dimensionen nicht geeignet, geschweige denn mehrfach in der Trinity F90+ verbaut werden kann.



Abbildung 44 Aufnahme eines unbelaubten Laubbaumes und mehrerer Nadelbäume mit der Sony RX1RII aus ca. 100m Flughöhe

Zusammenfassung Vergleichsflug mit Sony RX1RII – 90 m – nadir	
Flugzeit	6 min 45 s
Anzahl Bilder	191
Abdeckung	17,4 ha
GSD	1,27 cm
Durchschnittliche Punktdichte / m <sup>2</sup>	ca. 1732
Tie Points	100.526
Reprojection Error	0,28 pix
Error estimates in cm	1,33 (x/y/z – 0,487791/1,00832/0,718308)
RMSE checkpoints in cm	9,64 (x/y/z – 3,86495/2,38062/8,4993)

Tabelle 6: Zusammenfassung der wichtigsten Größen der Befliegung mit Sony RX1RII mit vier Flugstreifen in 90 m Flughöhe

## 6.1.5 Messflug Sony UMC-R10C – Zwei Flugstreifen – 90 m – nadir und oblique

## 1. Zwei Kameraausrichtungen – nadir und 20° geneigt zum Gleis

Das erste Ergebnis mit einer Kombination aus nadir und oblique ausgerichteter Kamera wurde durch den gleichen, zweimal unmittelbar hintereinander durchgeführten Flug ermittelt. Zuerst mit der nadir ausgerichteten Kamera und unmittelbar im Anschluss daran mit einem 20° in Richtung Gleis ausgerichteter Kamera. Diese aus den beiden Flügen erhaltenen Bilder inklusive der mittels PPK korrigierten Bildpositionen konnten ohne Probleme mit Agisoft Metashape prozessiert werden.



Abbildung 45 Dichte Punktwolke aus Agisoft Metashape-Flug mit zwei Flugstreifen in 90 m mit nadir und ca. 20° oblique ausgerichteter Kamera

Die folgende Abbildung zeigt die beiden jeweils nahezu übereinstimmenden Kamerapositionen der beiden aufeinanderfolgenden, identischen Flüge nach der Auswertung in Agisoft Metashape mit der Dichten Punktwolke.

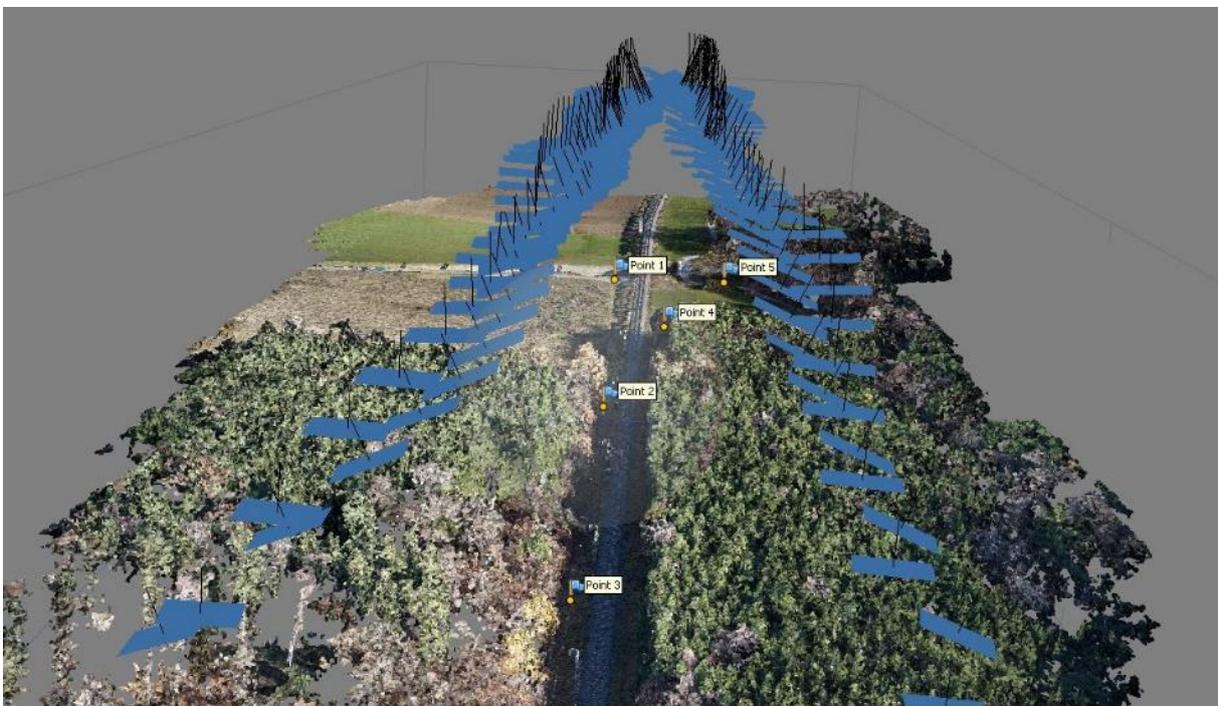


Abbildung 46 Perspektivischer Blick auf die Dichte Punktwolke mit nadir und 20° geneigten Fotopositionen in Agisoft Metashape

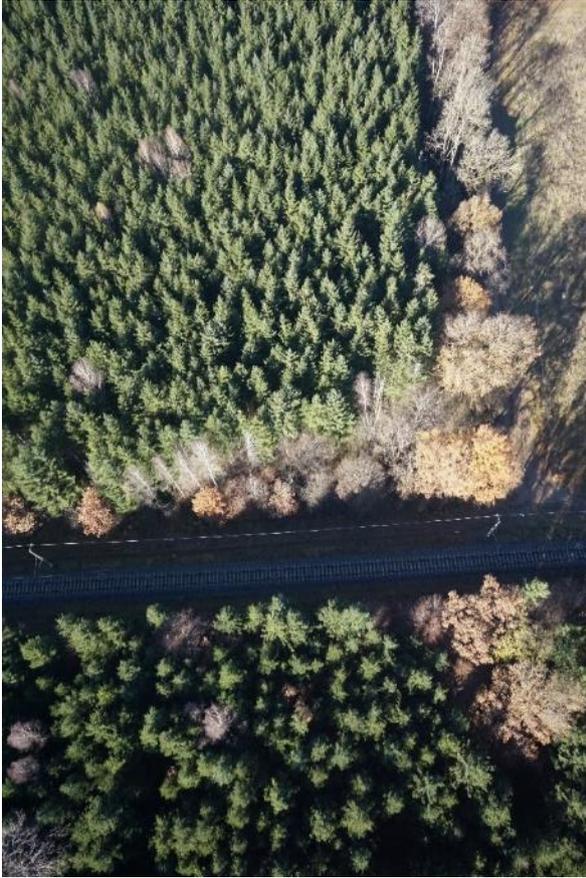
Am Rand des Orthomosaiks, insbesondere in den Bereichen mit hohen Bäumen, zeigen sich Lücken. Somit kann die von der DB Fahrwegdienste GmbH geforderte doppelte Breite der Stabilisierungszone von 60 m beiderseits der Gleise nicht eingehalten werden.



Abbildung 47: Orthomosaik der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Flughöhe, begrenzt auf einen 120 m breiten Korridor

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch eine Originalaufnahme (hier DSC03825) mit einem Aufnahmewinkel von  $20^\circ$ . Die Bäume auf der hier im Bild oberen Seite des Bahngleises werden nicht durch die Bäume von der anderen Seite verdeckt. Damit kann eine Verdeckung der unteren Bereiche der ersten Baumreihe, inklusive der Stämme, bei einer Flughöhe von 90 m und dem steilen Oblique-Winkel von  $20^\circ$  ausgeschlossen werden. Deutlich erkennbar wird der oben beschriebene Unterschied zwischen Bildvordergrund und Bildhintergrund bei oblique aufgenommenen Bildern. Während der Bildvordergrund nadir aufgenommen wird, zeigt der Bildhintergrund einen deutlichen Kippwinkel und einen geänderten Bildmaßstab an.

Ungünstig wirkt sich dagegen der jahreszeitlich bedingte niedrige Sonnenstand und die damit einhergehenden ungünstigen Belichtungsverhältnisse auf das Ergebnis aus. Mittags, zum Zeitpunkt der Datenaufnahme lag der Sonnenstand bei rund  $22,5^\circ$  über dem Horizont (SONNENVERLAUF.DE 2021). Der Gleisbereich selbst und die angrenzenden Flächen inklusive der ersten Baumreihen liegen komplett im Schatten, so dass eine photogrammetrische Auswertung nur schwer möglich ist. Viele Lücken im U-Profil im beidseits des Gleises dicht bewaldeten Abschnitt der Untersuchungsstrecke, insbesondere bei den oblique-Flügen, lassen sich auf den Schatten an diesen Stellen zurückführen.



*Abbildung 48 Mit Sony UMR10C aufgenommenes Bild (DSC03825) aus 90m Flughöhe mit einem Neigung von ca. 20°*

Abbildung 48 zeigt obige Originalaufnahme eingepasst in die Agisoft Metashape Dense Point Cloud. Deutlich wird in dieser Abbildung die hohe Überlappung der Aufnahmen, da das einzelne Bild (hier DSC03825) bereits nahezu die gesamte Breite des Korridors abzubilden vermag.



Abbildung 49 Das typische Bild (DSC03825), dargestellt an der richtigen Stelle in der Dichten Punktwolke

#### Mit ArcGIS Pro

ESRI ArcGIS Pro bietet mit der Funktion Sichtfeld berechnen eine einfach zu nutzende Möglichkeit an, den potenziell sichtbaren Bereich von einer festgelegten Position grafisch darzustellen. Als Beobachterposition wurde exemplarisch die Kameraposition des Bildes DSC03825 gewählt. Aus dieser Analyse geht hervor, dass der gesamte Bereich des U-Profiles auf der dem Flugpfad gegenüber liegenden Gleisseite im sichtbaren Bereich liegt. Aufgrund der im Vergleich zu den Bäumen relativ großen Flughöhe und dem verwendeten steilen Winkel von rund  $20^\circ$  ist klar zu erkennen, dass keine Bäume direkt neben dem Gleis durch mögliche Objektverdeckung nicht sichtbar sein könnten.

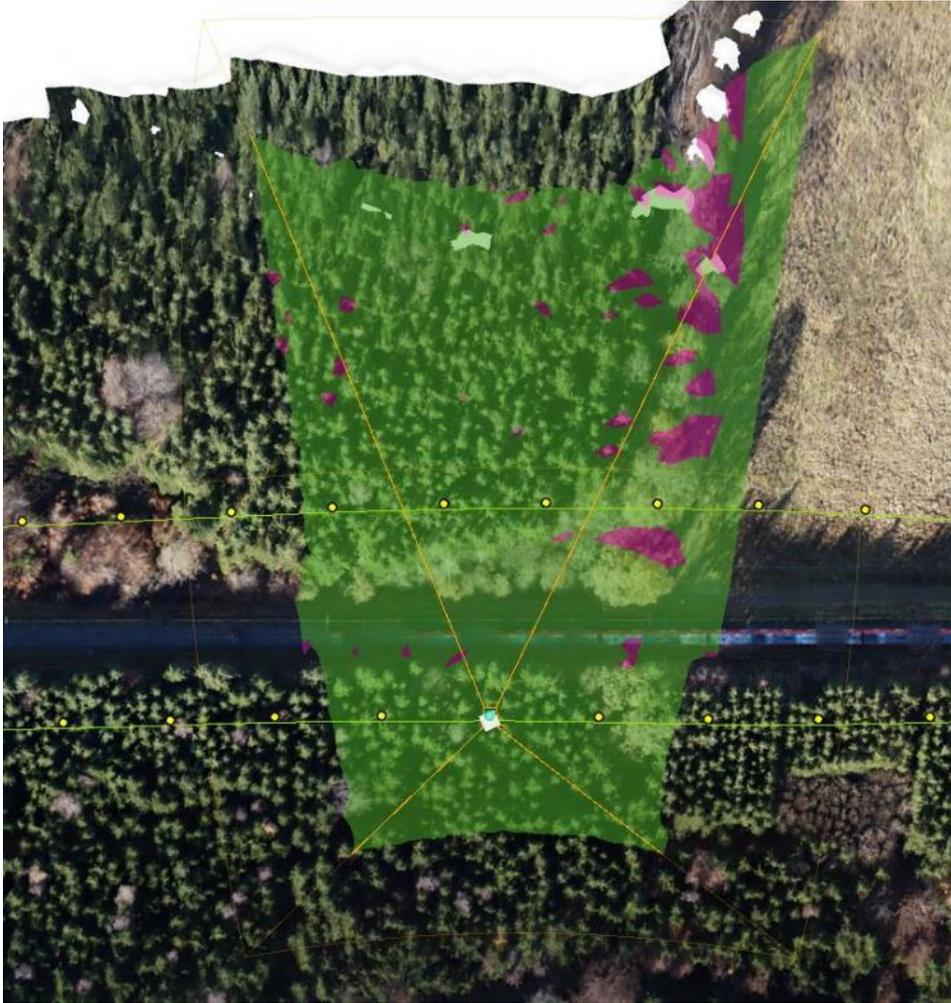


Abbildung 50 Anzeige des Sichtfeldes für die Abbildung (DSCO3825) in ArcGIS Pro

ArcGIS Pro bietet die Möglichkeit die Dichte Punktwolke, die in Agisoft Metashape als .las Datei herausgeschrieben werden kann als lokale Szene in 3D darzustellen. Mit dieser Methode lässt sich am besten überprüfen, ob es Lücken im U-Profil gibt und wie dicht die Punktwolke dargestellt werden kann.

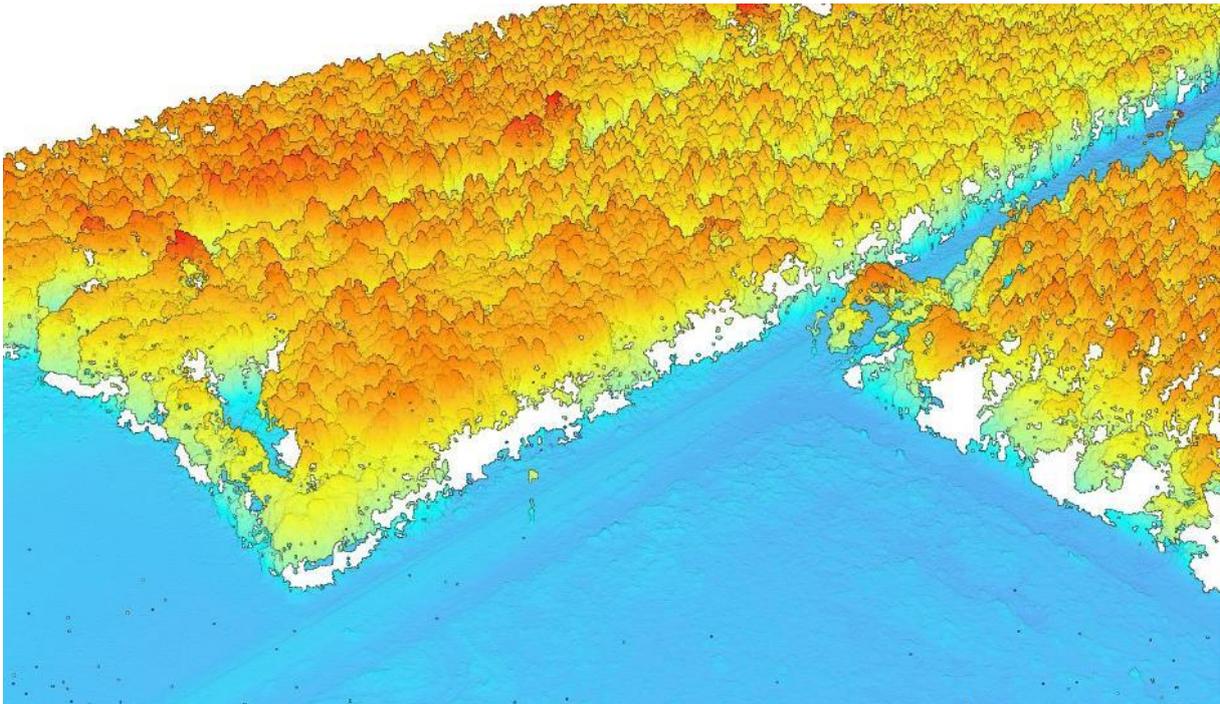


Abbildung 51: Perspektivische Darstellung der Punktwolke der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Flughöhe mit zwei Kameraausrichtungen (nadir und 20° oblique) zum Gleis geneigt. (GIS Pro)

Zusammenfassung Messflug mit Sony UMC-R10C – 90 m – nadir und 20° oblique rechts	
Flugzeit	4 min 17 (hier 2x)
Anzahl Bilder	206
Abdeckung	28 ha
GSD	2,65 cm
Durchschnittliche Punktdichte / m <sup>2</sup>	ca. 518
Tie Points	105.217
Reprojection Error	0,465 pix
Error estimates in cm	1,88 (x/y/z – 1,20532/1,0595/0,990936)
RMSE checkpoints in cm	25,89 (x/y/z – 3,1072/6,34461/24,9091)

Tabelle 7: Zusammenfassung der wichtigsten Größen der Befliegung mit Sony UMC mit zwei Flugstreifen in 90 m Flughöhe nadir und 20° zur Bahnstrecke geneigt

## 2. Drei Kameraausrichtungen – nadir und 20° geneigt zum Gleis und 20° weg vom Gleis



Abbildung 52 Dichte Punktwolke aus Agisoft Metashape Flug mit zwei Flugstreifen in 90 m mit nadir und ca. 20° oblique ausgerichteter Kamera zum Gleis und weg vom Gleis

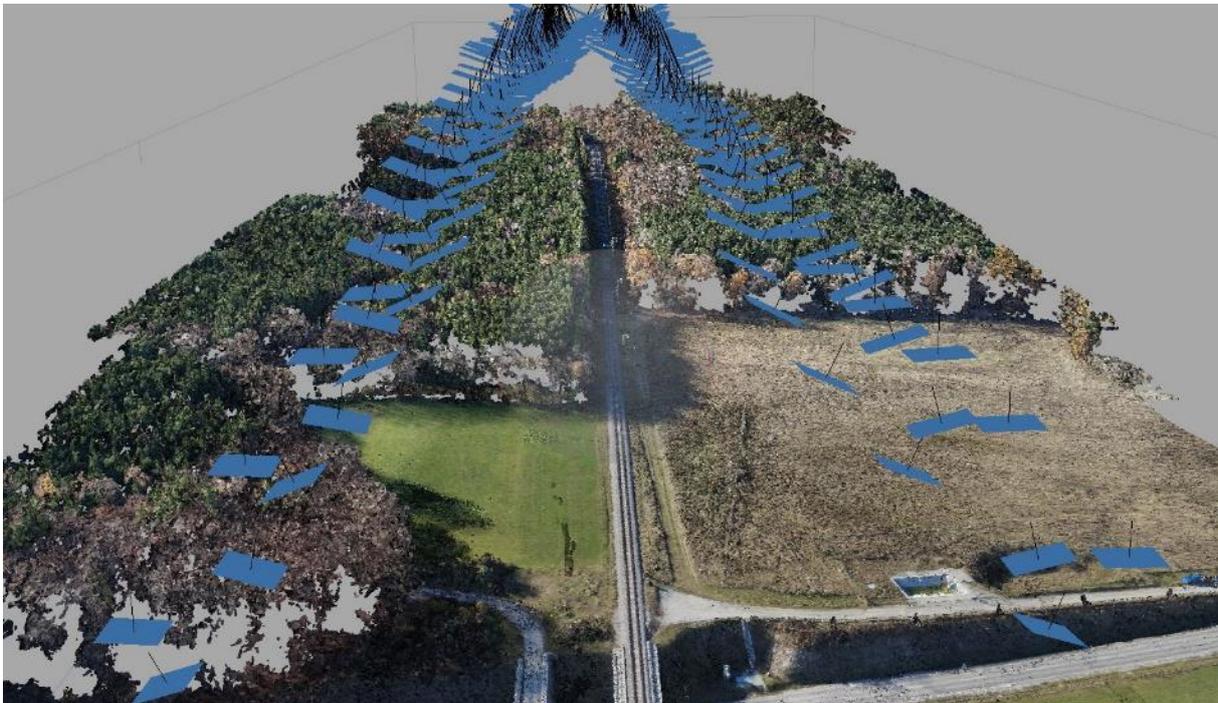


Abbildung 53 Perspektivischer Blick auf die Dichte Punktwolke mit nadir und 20° geneigten Fotopositionen zum Gleis und weg vom Gleis in Agisoft Metashape

Auch bei der Kombination aus nadir und 20° geneigt aufgenommenen Bildern bleiben Lücken in der Punktwolke im unteren Stammbereich der Bäume. Diese Kombination mit drei Kamerapositionen erlaubt jedoch die Darstellung eines breiten Streifens links und rechts der Gleise und verdichtet die Punktwolke zu den Rändern hin, so dass eine deutlich geringere Gefahr von Lücken weiter entfernt von den Gleisen besteht, obwohl nur mit zwei Flugstreifen geplant wird. Diese Option ist aber zumindest mit der aktuellen Kamera, der Sony UMC und der Trinity F90+ aufgrund des begrenzten

Platzes in der Payloadhalterung nicht zu verwirklichen. Dieser interessante Ansatz kann mit kleineren und leichteren Kameras weiterverfolgt werden, da er sehr brauchbare Ergebnisse verspricht.

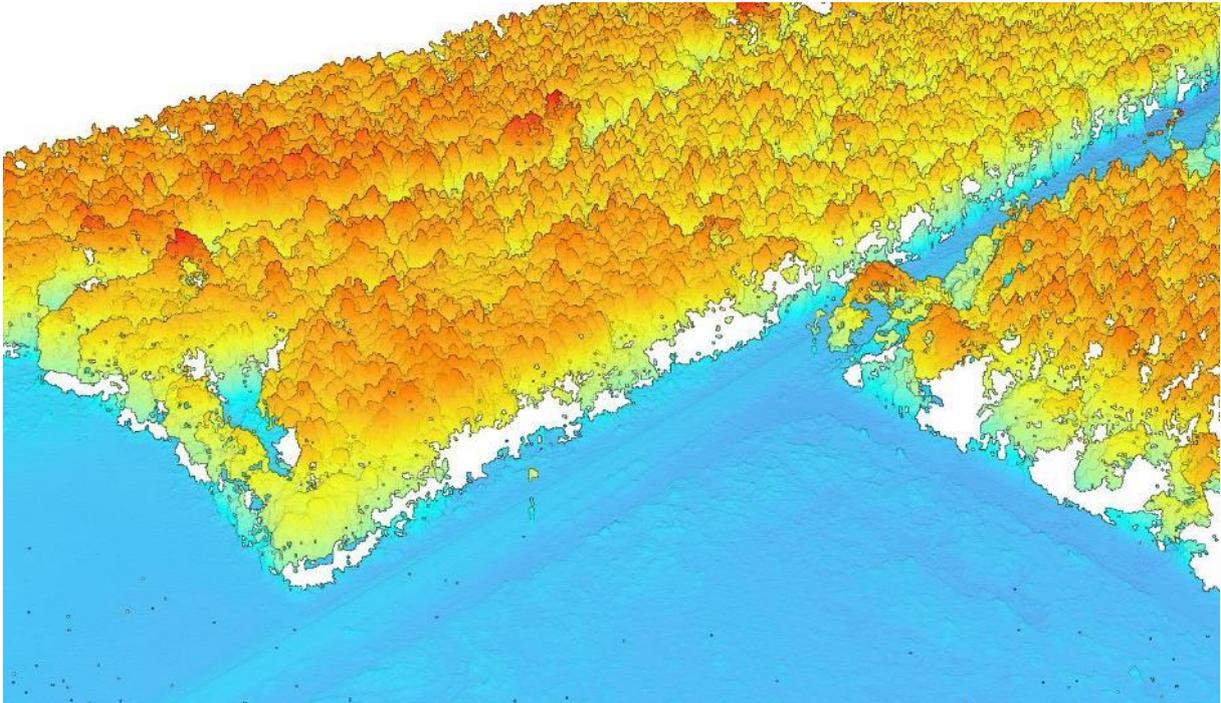


Abbildung 54 Perspektivische Darstellung der Punktwolke der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Flughöhe mit drei Kameraausrichtungen (gerad, 20° oblique zum Gleis und 20° oblique vom Gleis) mit Aruco Pro



Abbildung 55 Orthomosaik der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Flughöhe, mit drei Kamerablickrichtungen, begrenzt auf einen 120 m breiten Korridor

Zusammenfassung Messflug mit Sony UMC-R10C – 90 m – nadir und 20° oblique rechts und links	
Flugzeit	4 min 17 (hier 3x)
Anzahl Bilder	310
Abdeckung	32,3 ha
GSD	2,67 cm
Durchschnittliche Punktdichte / m <sup>2</sup>	ca. 576
Tie Points	175.188
Reprojection Error	0,475 pix
Error estimates in cm	2,089 (x/y/z – 1,25946/1,20749/1,14862)
RMSE checkpoints in cm	26,92 (x/y/z – 2,76694/8,9896/25,2242)

Tabelle 8: Zusammenfassung der wichtigsten Größen der Befliegung mit Sony UMC mit zwei Flugstreifen in 90 m Flughöhe nadir und 20° zum Gleis und 20° weg vom Gleis geneigt

### 6.1.6 Ermittlung des optimalen Winkels

Die oben beschriebenen Flüge wurden allesamt in einer Konfiguration ausgeführt, wie es die Planungssoftware QBase 3D für einen Korridorflug mit einer Sony UMC-R10C oder Sony RX1RII vorsieht. Um eine für die photogrammetrische Auswertung notwendige Seitenüberlappung von 70% gewährleisten zu können, dürfen die beiden Flugstreifen bei einer Flughöhe von 90 m nicht weiter als 40 m auseinander liegen. Das bedeutet jeweils nur einen Abstand von ca. 20 m zur Gleismitte. Daraus resultiert der oben beschriebene steile Winkel der Schrägaufnahmen und eine mitunter unzureichende Neigung, um die gewünschte Schrägsicht auf die Bäume in der Nähe der Gleise zu haben, um Lücken in der Punktwolke vermeiden zu können.

Die im Folgenden beschriebenen Flüge wurden vornehmlich mit dem Ziel ausgeführt, verschiedenen schräge Winkel zu testen, auch unter der Gefahr, dass die Überlappung der Aufnahmen für die ordentliche Erstellung von Punktwolken, DEMs und Orthomosaiken nicht mehr ausreichend sein wird.

Ziel sollte in erster Linie die Evaluierung des optimalen Aufnahmewinkels für die Schrägansicht sein und eine lückenloses U-Profil zu erhalten. Dafür wurde der Winkel mit zunehmendem Abstand der Flugbahn des UAV von der Gleismitte immer schräger gestellt.

Hierfür kommen in der Planungssoftware QBase 3D zwei verschiedene Methoden in Frage

1. Herabsetzung der seitlichen Überlappung bis auf minimal mögliche 10°, um den gewünschten Abstand der beiden Flugstreifen von der Gleismitte zu erhalten. Die maximal mögliche Distanz zwischen den Flugstreifen beträgt bei 10° Überlappung von Bildern der Sony UMC-R10C 120m. Das heißt es sind zwei Flugstreifen mit einer jeweiligen Entfernung zum Gleis von 60m möglich.

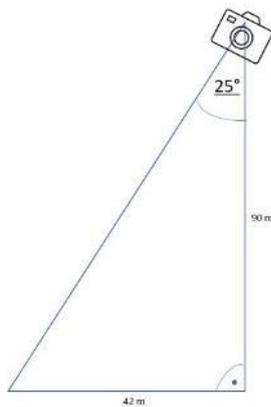
- Planung von zwei parallel verlaufenden, voneinander unabhängigen Korridoren mit jeweils einem Flugstreifen, die einem frei wählbaren Abstand zum Bahngleis verlaufen. Mit dieser Methode wären theoretisch deutlich größere Abstände als mit Methode 1 planbar.

Die folgenden drei Flüge wurden mit der zweiten oben beschriebenen Methode geplant. Die Abstände wurden frei in 30, 40 und 50 m Entfernung der Gleismitte geplant und der Winkel der Schrägaufnahmen jeweils entsprechend angepasst.

Es hat sich dabei herausgestellt, dass sowohl die Punktdichte als auch die Konfidenz der Ergebnisse trotz des mitunter großen Abstands von bis zu 100 m und der damit kaum noch gegebenen Seitwärtsüberlappung (bei 100m Abstand rund 20%) überraschend gut und brauchbar waren.

### **Entfernung des Flugstreifens von der Gleismitte 30 m**

Für diesen Flug wurde eine Entfernung der Flugstreifen zur Gleismitte von rund 30 m gewählt. Im Unterschied zu den ca. 20 m Abstand, die für die Flüge oben als Planungsgrundlage galten. Wie oben beschrieben werden auch hier die 6 m Rückschnittszone plus weitere 6m hinzuaddiert, um den passenden Aufnahmewinkel zu bestimmen.



In diesem Beispiel ergibt das einen Neigungswinkel von ca. 25°, um in etwa die Mitte der ersten Baumreihe auf der jenseitigen Gleisseite im Bildmittelpunkt zu erfassen.



Abbildung 56 Dichte Punktwolke bei 90m AGL in 30m Abstand vom Gleis, nadir und 25° geneigt

Das U-Profil mit den Bäumen unmittelbar entlang der Bahnstrecke kann besser dargestellt werden, als bei den oben beschriebenen höheren Seitwärtsüberlappung der Flüge und den steileren Kamerawinkeln.

#### **Entfernung des Flugstreifens von der Gleismitte 40m**

Um einen weiteren Test mit einem noch flacheren Aufnahmewinkel durchführen zu können, wurde eine Entfernung der Flugstreifen zur Gleismitte von 40 m gewählt.

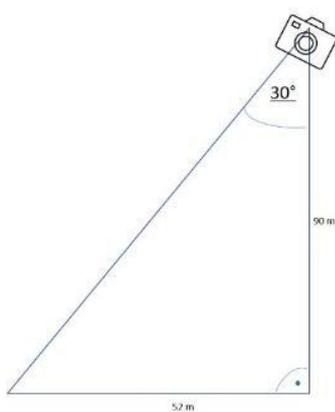




Abbildung 57: Dichte Punktwolke bei 90m AGL in 40m Abstand vom Gleis, niedrig

Durch die Betrachtung der Dichten Punktwolke konnte festgestellt werden, dass sich eine noch weitere Entfernung der Flugstreifen von 40 m von der Gleismitte durch den damit verbundenen noch schrägeren Aufnahmewinkel positiv auf die Darstellung der Bäume in unmittelbarer Umgebung des Gleises auswirkt.

#### **Entfernung des Flugstreifens von der Gleismitte 50m**

Für einen sehr flachen Aufnahmewinkel von  $35^\circ$  wurde ein sehr weiter Abstand der beiden Flugstreifen von jeweils 50 m von der Gleismitte geplant

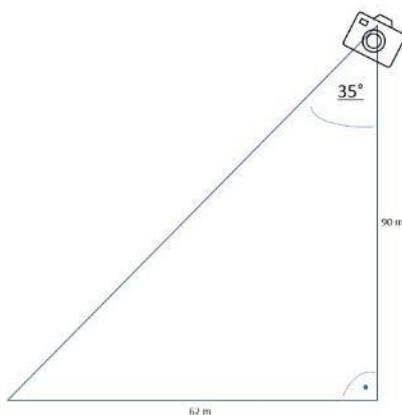




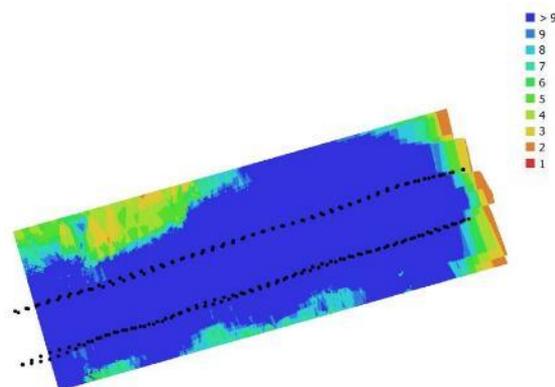
Abbildung 58 Dichte Punktwolke durch einen Flug in 90m AGL in 50m Abstand vom Gleis, nadir und 35° geneigt

Deutlich erkennbar auf diesem Screenshot der Dichten Punktwolke ist neben der im Vergleich zu allen anderen Aufnahmen größeren Breite der Punktwolke auch eine hohe Verzerrung hin zum Rand. Hier insbesondere am rechten, unteren Bildrand zu erkennen.

Der Bereich jedoch, der von besonderem Interesse für die Ermittlung des optimalen Aufnahmewinkels ist, zeigt ein sehr gutes Resultat. Die erste Baumreihe neben dem Gleis kann mit dieser Konfiguration nahezu ohne Lücken abgebildet werden.



Mit einem einzigen Flug kann ein Bereich von über 300m Breite aufgenommen werden.



Dank des flachen Aufnahmewinkels ist die Überlappung der Einzelbilder bis zum Rand sehr hoch

Der Vergleich der Abbildungen 58 und 59 zeigt die Auswirkung des hohen Anteils der schräg aufgenommenen Bilder auf die Bildung eines Orthomosaiks im Vergleich zu einem Orthomosaik erstellt aus der aktuell gebräuchlichen Aufnahmeconfiguration von vier Flugstreifen in 90 m Flughöhe mit rein senkrecht ausgerichteter Kamera. Wie oben beschrieben, lässt sich aus der Kombination der mit 35° Neigung und der Senkrechtaufnahmen eine sehr gute Dichte Punktwolke erzeugen aber die Erstellung des Orthomosaiks muss hier einige Abstriche hinnehmen. Wie im Vergleich der beiden Abbildungen zu sehen ist, werden die Bäume unter Einfluss der Schrägaufnahmen sehr plastisch dargestellt. Daneben kommt es dadurch aber auch zu einer Reihe von fehlerhaften Darstellungen wie im Bereich der Gleise zu sehen ist. Hier sind einige Fehlinterpretationen zu sehen und die Bäume werden regelrecht auf die Gleise projiziert.



Abbildung 59 Detailansicht des Orthomosaiks der herkömmlichen Flugplanung mit vier Flugstreifen und rein senkrecht ausgerichteten Bildern



Abbildung 60 Detailansicht des Orthomosaiks der experimentellen Flugplanung mit zwei Flugstreifen im Abstand von 100 m zueinander mit zwei unterschiedlichen Kameraausrichtungen.

## 6.2 Konfidenz der Ergebnisse

Im Bereich der Gleise sowie auf den Freiflächen im nordöstlichen Teil der Befliegung ermittelt Agisoft Metashape einen hohen bis sehr hohen Konfidenzwert. Hierbei gilt bei Auswahl der Ansicht Dense Cloud Confidence ein der Modellansicht von Agisoft Metashape, dass bedenkliche Bereiche in Rot und Bereiche mit hohem Vertrauen in Grün- / Blau-Tönen dargestellt werden. Die Point Confidence wird auf der Grundlage der Anzahl der Depth Maps in denen der betreffende Punkt vorkommt, zugewiesen und entsprechend abgestuft. 1 ist die niedrigste Vertrauenswürdigkeit und 255 die höchste.

Die Anzeige der Konfidenz ist ein gutes Hilfsmittel bei der Auswertung der Qualität von Befliegungsergebnissen. Für jeden Punkt in der endgültigen dichten Punktwolke wird die Anzahl der beteiligten, kombinierten Depth Maps erfasst und als Konfidenzwert gespeichert. Je höher dieser Wert ist, desto vertrauenswürdiger ist das Ergebnis an dieser Stelle der Punktwolke. Hierbei gilt, dass die Legende eine nicht-lineare Skala zeigt, da die größten Schwankungen im Konfidenzniveau im Bereich von 1-5 beobachtet werden. In der Legende liegt der 255 ziemlich nahe an 100. Das bedeutet, hier treten keine bedeutenden Veränderungen mehr auf (PASUMANSKY, A. 2019).

### 1. 90m, vier Flugstreifen, nadir

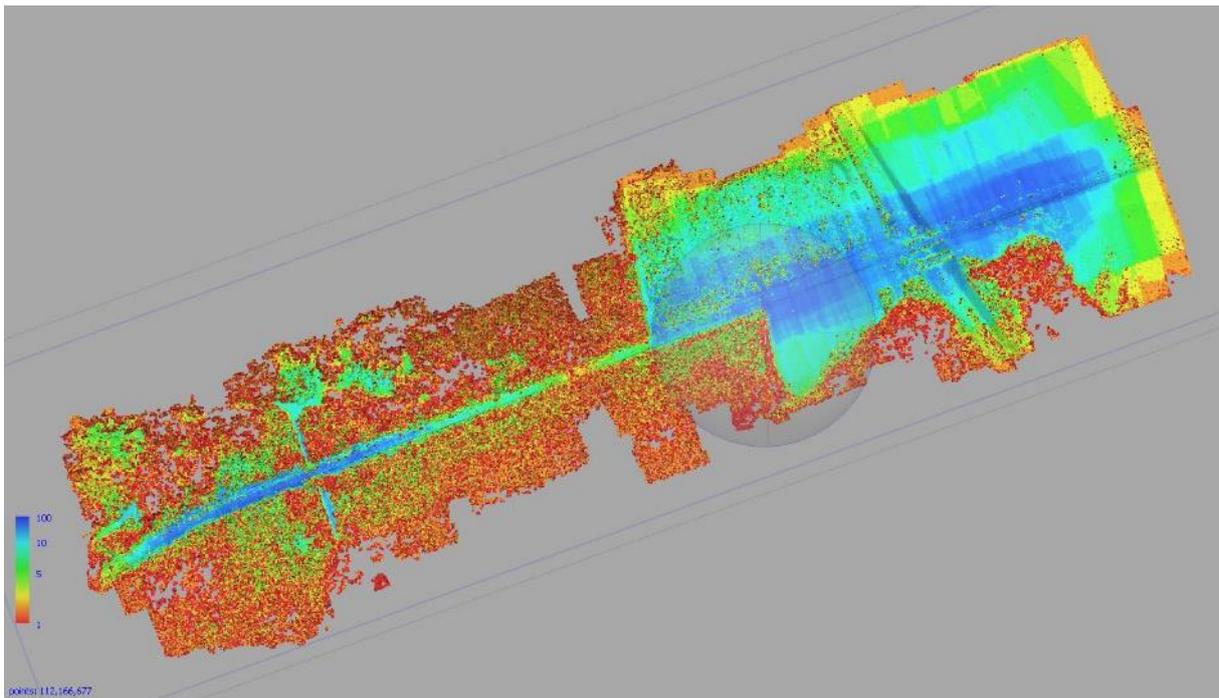


Abbildung 61: Konfidenzniveau der Dichten Punkte der Befliegung mit vier Flugstreifen in 90 m Höhe

Begrenzung der Punktwolke auf Punkte mit einem hohen bis sehr hohen Konfidenzniveau auf der logarithmischen Skala von 10 – 100. Alle Punkte mit einem niedrigeren Konfidenzniveau wurden von der Darstellung ausgeschlossen.

Deutlich ist die Lücke bei den hochkonfidenten Punkten in der Mitte der Befliegung im stark beschatteten Bereich (vgl. Abbildung 36) zu erkennen. Der Rest der des Gleisbereichs sowie die Straße

im rechten Bildbereich und die Wiesen links und rechts der Gleise sind im Bereich hoher Überlappung mit einem hohen bis sehr hohen Konfidenzniveau berechnet worden (siehe Abbildung 55).

In den mit Wald bestandenen Bereichen der Aufnahme kann nahezu keine hohe Konfidenz erreicht werden. Daher wurden diese Punkte für Abbildung 55 allesamt herausgefiltert.

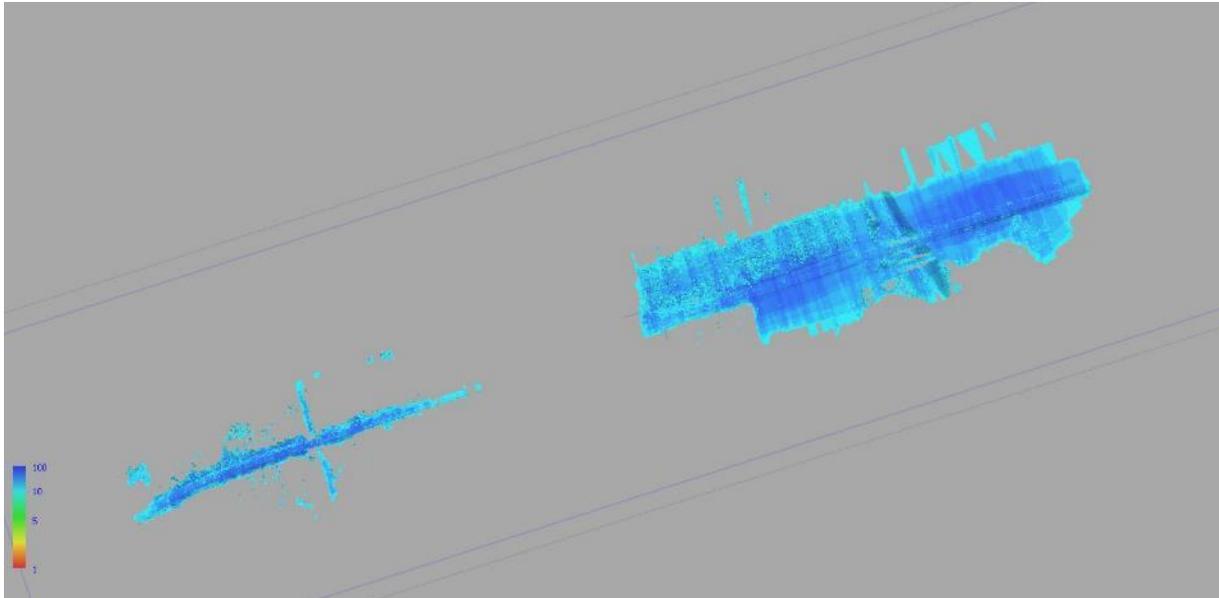


Abbildung 62 Ausschließlich Bereiche mit oder sehr hohem Konfidenzwert

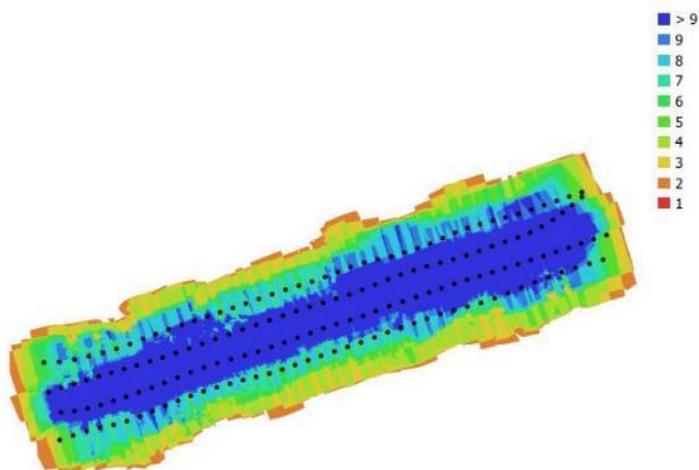


Abbildung 63 Anzeige der Überlappungsbereich der Befliegung

## 2. 80m, vier Flugstreifen, nadir

Trotz einer niedrigeren Flughöhe lässt sich insgesamt kein wesentlicher höherer Konfidenzwert bei 80 m AGL feststellen. Der beschattete Gleisbereich in der Mitte der Flugstreifen zeigt indes mehr grüne oder blaue Bereiche, also jene Bereiche mit einer höheren Konfidenz.

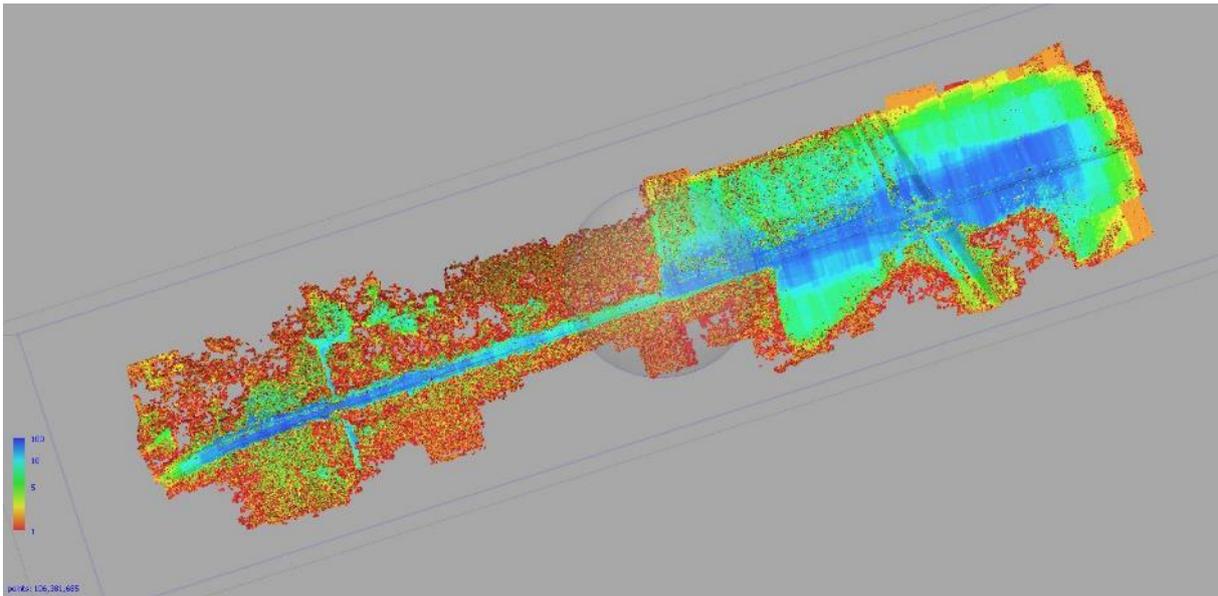


Abbildung 64 Konfidenzniveau der Dichten Punktwolke der Befliegung mit vier Flugstreifen in 100m Höhe

### 3. 70m, vier Flugstreifen, nadir

Für die Befliegung in 70 m Höhe jedoch gilt diese Beobachtung nicht mehr. Hier weist der Bereich direkt am Bahngleis bereits wieder weniger hochkonfidente Bereiche auf.

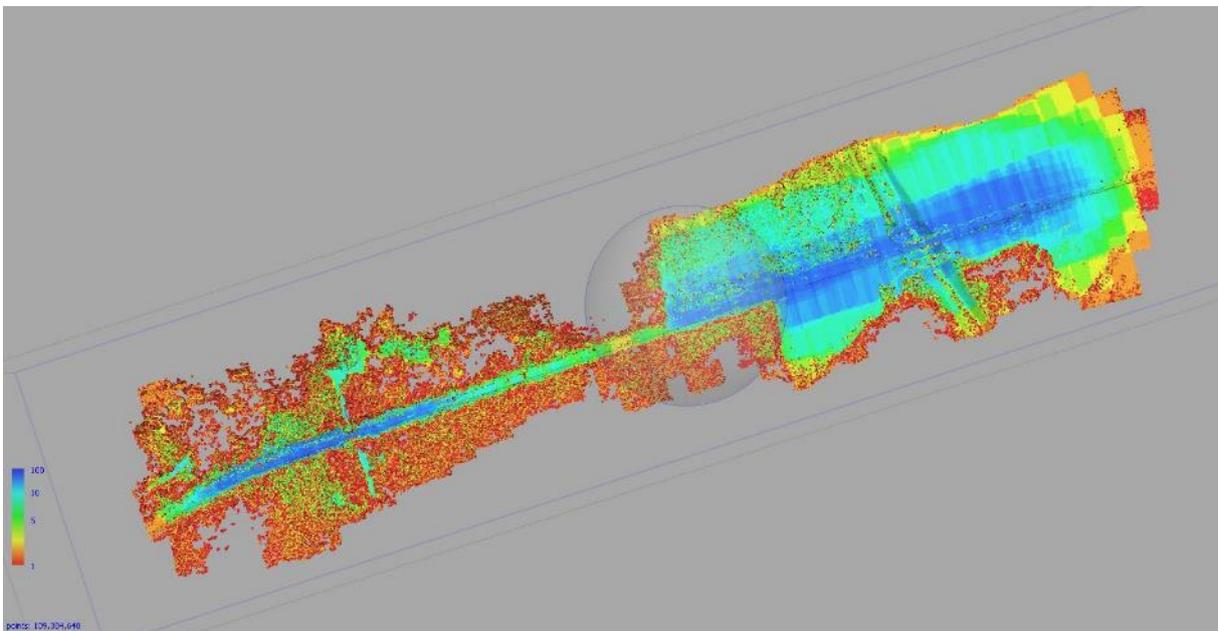


Abbildung 65 Konfidenzniveau der Dichten Punktwolke der Befliegung mit vier Flugstreifen in 70 m Höhe

### 4. 90m, zwei Flugstreifen, nadir + 20° oblique (in Richtung Bahngleis)

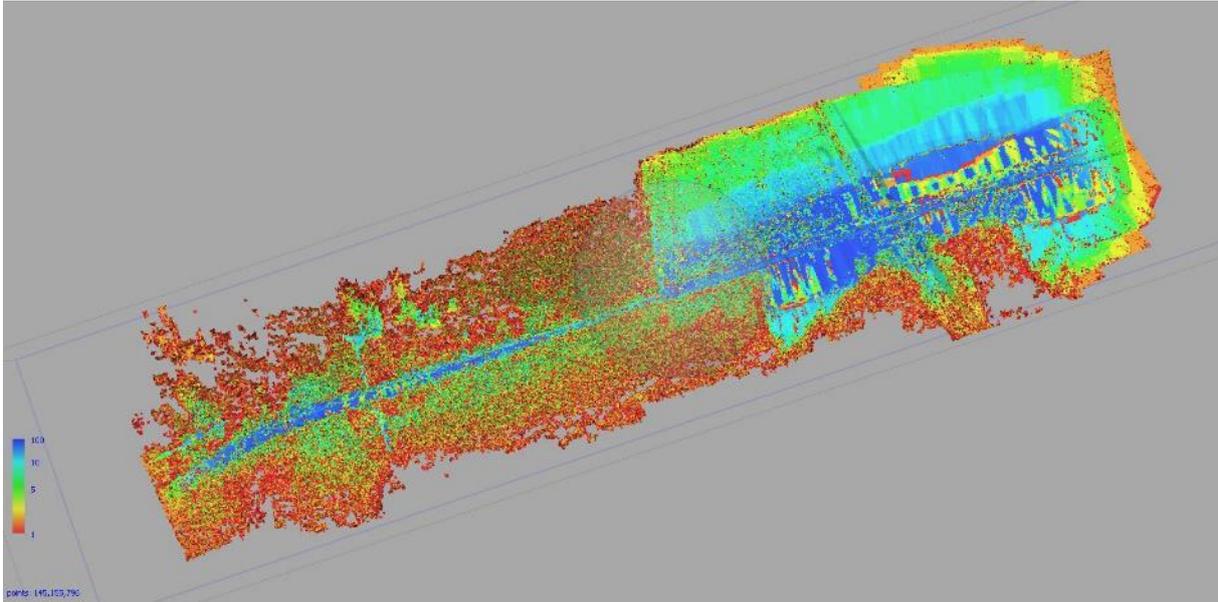


Abbildung 66: Konfidenzniveau der Dichten Punktwolke der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Höhe  
Blickrichtungen der Kamera

5. 90m, zwei Flugstreifen, nadir + 20° oblique (in Richtung Bahngleis und weg von Bahngleis)

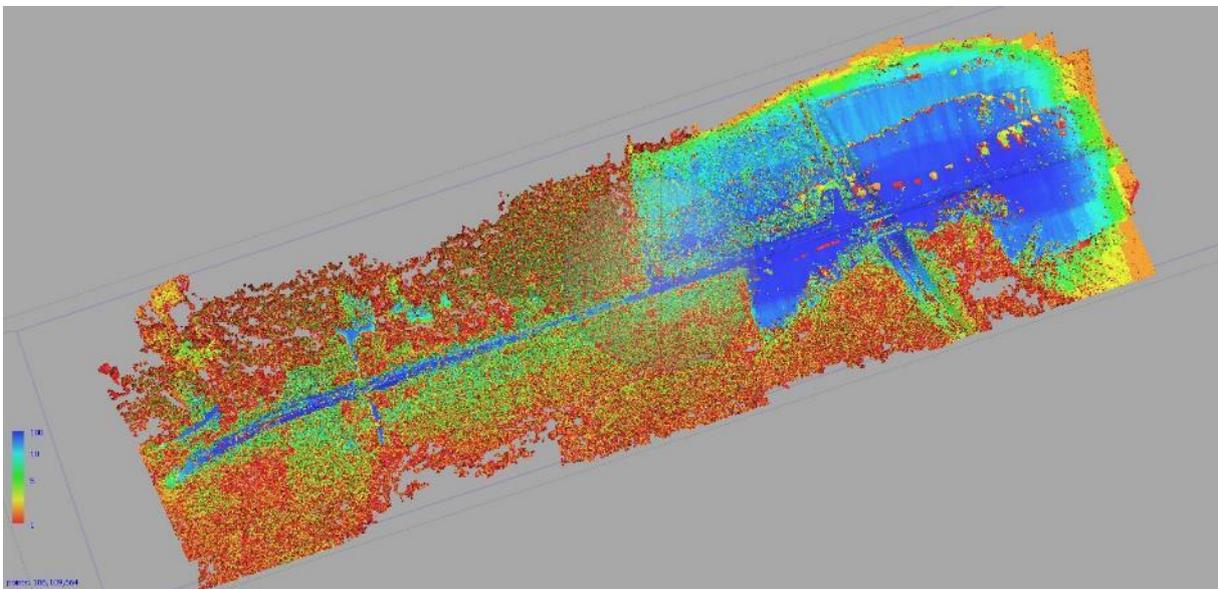


Abbildung 67: Konfidenzniveau der Dichten Punktwolke der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Höhe  
Blickrichtungen der Kamera

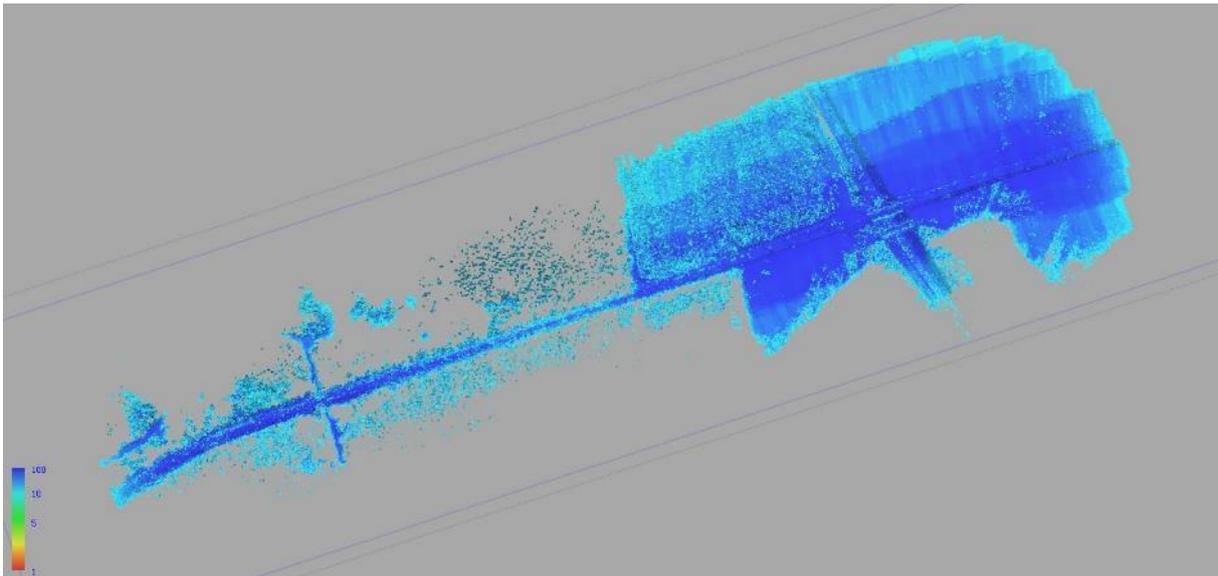


Abbildung 68 Ausschließlich Bereiche mit ~~mit~~ oder sehr hohem Konfidenzwert

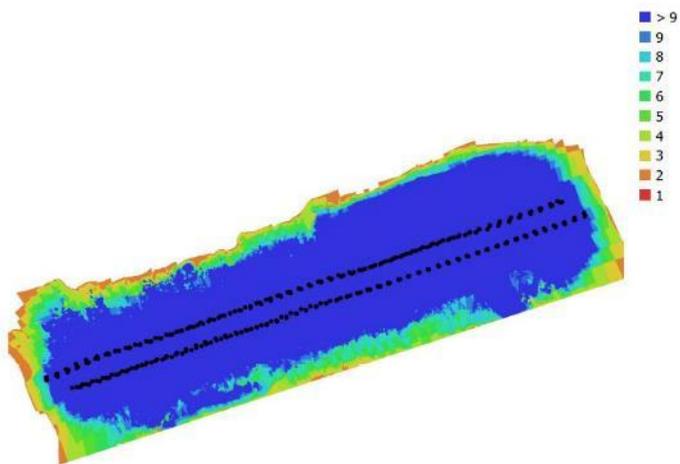


Abbildung 69 Anzeige der Überlappungen Bereich der Befliegung

6. 90m, zwei Flugstreifen, nadir + 25° oblique (in Richtung Bahngleis)

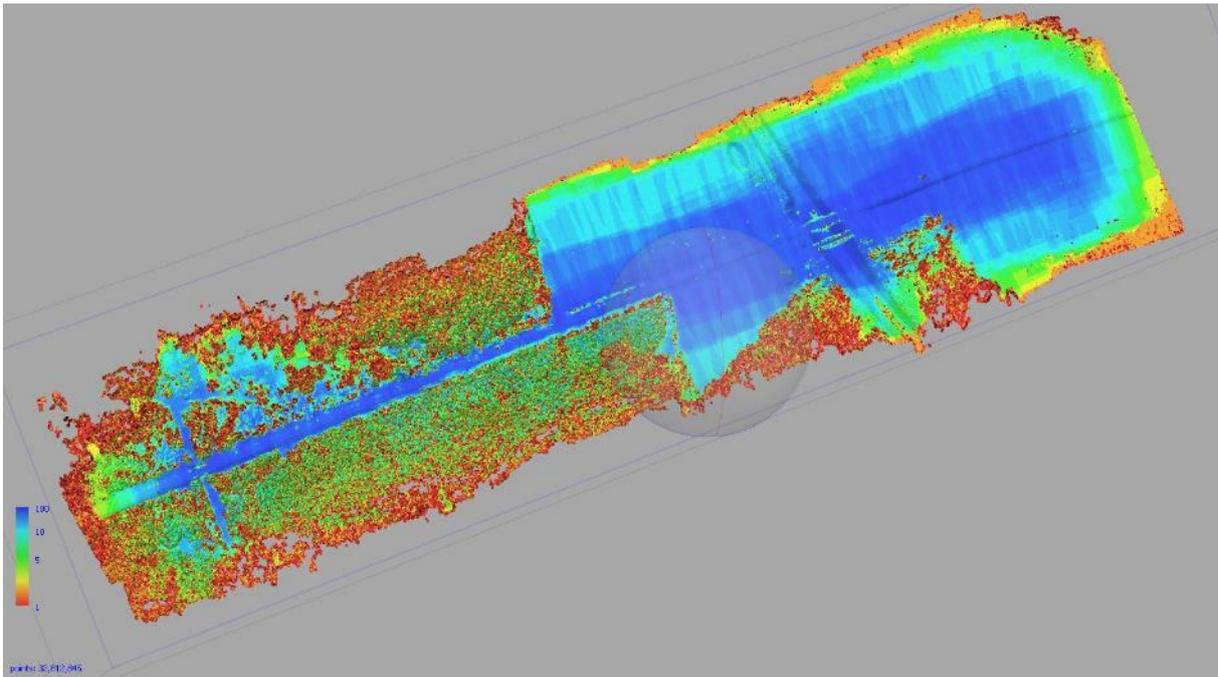


Abbildung 70: Konfidenzniveau der Dichten Punktwolke der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Höhe. Blickrichtungen der Kamera. Abstand der Flugstreifen ca. 60m

#### 7. 90m, zwei Flugstreifen, nadir + 30° oblique (in Richtung Bahngleis)

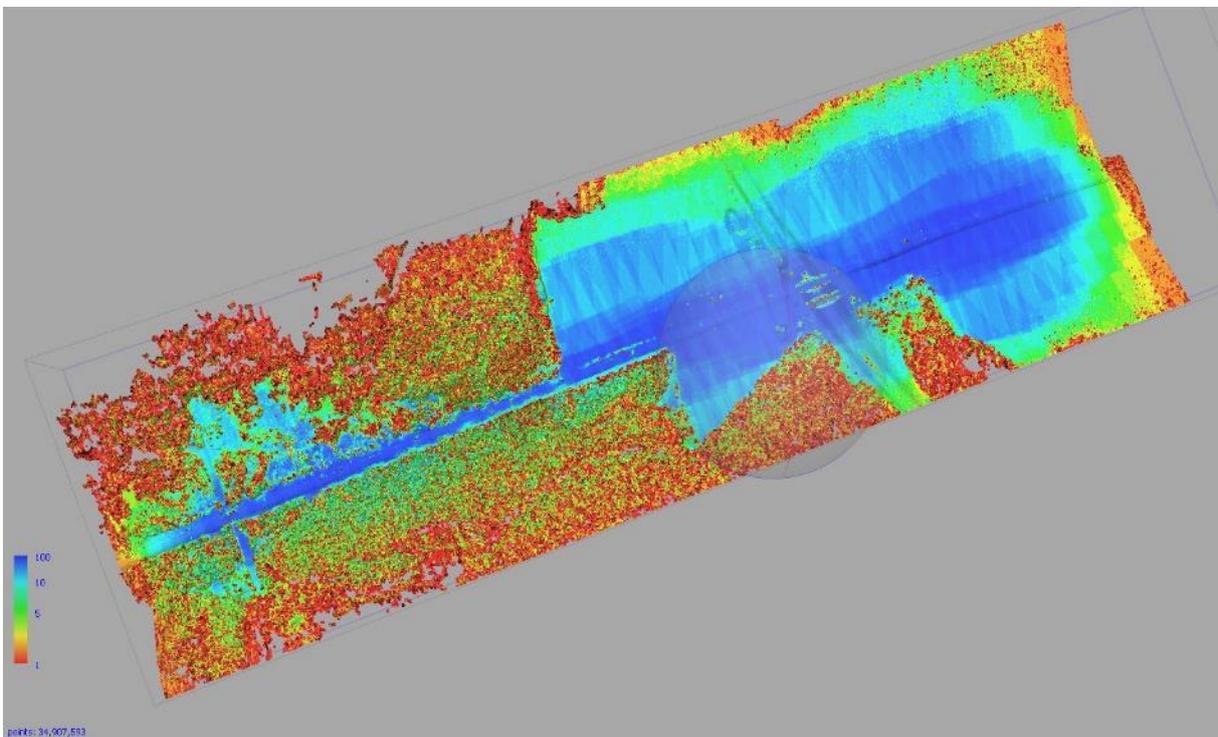


Abbildung 71: Konfidenzniveau der Dichten Punktwolke der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Höhe. Blickrichtungen der Kamera. Abstand der Flugstreifen ca. 80m

## 8. 90m, zwei Flugstreifen, nadir + 35° oblique (in Richtung Bahngleis)

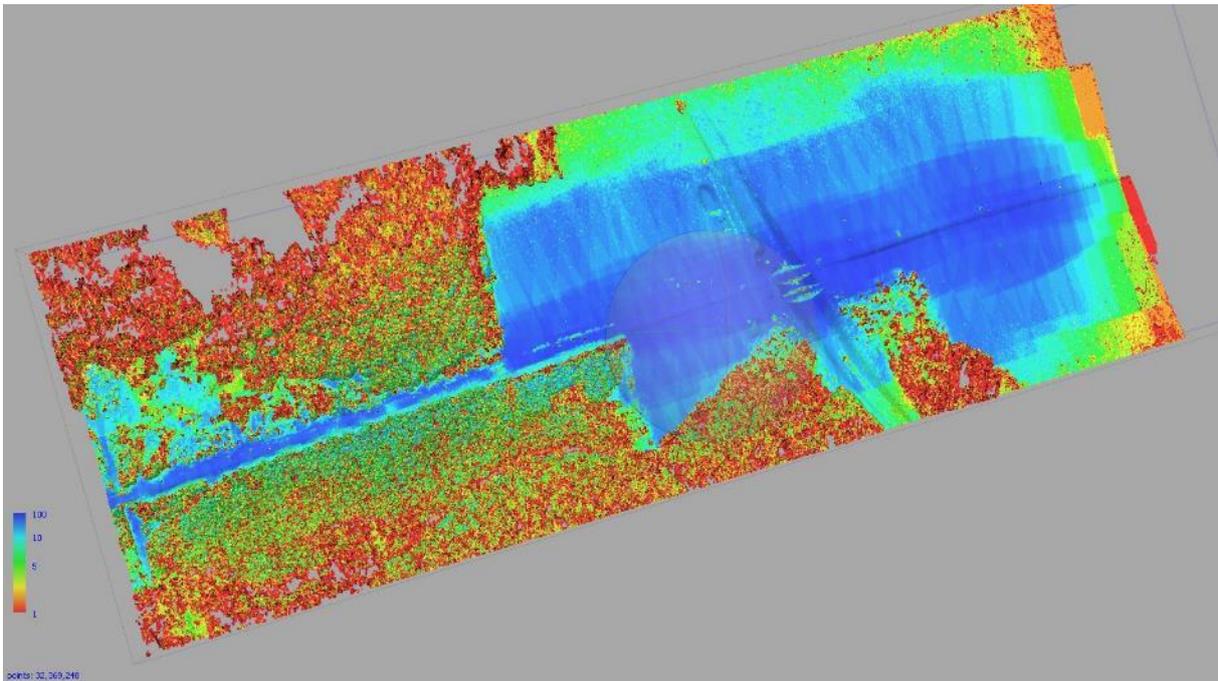


Abbildung 72 Konfidenzniveau der Dichten Punkt der Befliegung mit zwei Flugstreifen in 90 m Höhe  
 Blickrichtungen der Kameras Abstand der Flugstreifen ca. 100m

## 6.3 Genauigkeit der Ergebnisse

Ganz allgemein ist eine ausreichende Überlappung der Bilder bei Korridormissionen immer ein kritischer Punkt. Denn anders als bei Flächenmissionen, wo üblicherweise sehr viele Flugstreifen nebeneinander liegen oder die entsprechende Fläche sogar kreuzweise beflogen werden kann, um eine möglichst hohe Überlappung der Bilder zu erreichen und so ein möglichst gutes Ergebnis zu erzielen mit einer dichten Punktwolke ohne signifikante Lücken, stehen hierfür bei Korridormissionen wie oben aufgezeigt nur zwei bis vier Flugstreifen zur Verfügung. Das führt mitunter zu deutlichen Lücken in der Punktwolke. Insbesondere wenn das UAV in einer relativ niedrigen Höhe von 80 oder 90 m AGL fliegt und bewaldete Gebiete abgebildet werden sollen. Dadurch kann sich der reelle Abstand zwischen Kamerasensor und Oberfläche (hier Baumkronen) leicht auf nur noch 50 – 60m verringern, was bei der hohen Fluggeschwindigkeit der Trinity F90+ zu einer mitunter ungenügenden Überlappung führt. In Kombination mit der für jede Form der SfM-Auswertung herausfordernden Oberfläche eines Waldes, mit sich bewegenden Zweigen und schnell abwechselnden Licht- und Schattenverhältnissen, führt das oftmals zu Lücken in der Punktwolke. Durch die Verwendung mehrerer Kameras in einer Payload, die das überflogene Gelände gleichzeitig aus mehreren Richtungen aufnehmen können hier zu einer besseren Überlappung und einer Steigerung der Ergebnisqualität beitragen.

Wälder können sich als herausfordernde Szenen für die Feature-Matching-Algorithmen erweisen, die einem SfM-Workflow zugrunde liegen. Ihre feine, gleichmäßige Textur, sich wiederholende Muster und potenzielle Bewegung (z. B. Äste im Wind) können zu Unsicherheiten beim Abgleich führen, was

wiederum eine unvollständige Rekonstruktion und/oder verrauschten Punktwolken führen. In solchen Fällen wird die Wahrscheinlichkeit, visuelle Ähnlichkeiten in überlappenden Bildern zu erkennen, erhöht, indem der Abstand zum Boden erhöht wird, wodurch die Anzahl der Merkmale pro Bild erhöht und perspektivische Verzerrungen verringert werden (IGLHAUT, CABO ET AL. 2019). Größere GSDs und höhere Bildüberlappungen haben nach IGLHAUT, CABO ET AL. (2019) demnach einen positiven Einfluss auf das Bild Matching. Die Überlappung sollte also erhöht werden, wenn die GSD verringert wird.

## 7 Diskussion

### 7.1 Unterschiede

Interessant für die Beantwortung der Forschungsfrage ist insbesondere, inwieweit sich die Ergebnisse der unterschiedlichen Aufnahmekonfigurationen unterscheiden und ob es Unterschiede in der absoluten Lagegenauigkeit der erhobenen Daten, der Dichte der Punktwolke oder beim Zeitbedarf pro Streckeneinheit gibt.

#### 7.1.1 In der Genauigkeit der erhobenen Daten

Wie in Kapitel 5.3 beschrieben, wurde für die Bilddaten aller Flüge eine Lagekorrektur nach dem PPK-Verfahren durchgeführt, und die absolute Lagegenauigkeit der Bilder anhand von jeweils fünf hochgenau eingemessenen Checkpoints mit Agisoft Metashape bestimmt.

- |    |               |  |
|----|---------------|--|
| 1. | Sony UMC-R10C | 90 m, vier Flugstreifen, nadir   |
| 2. | Sony UMC-R10C | 70 m, vier Flugstreifen, nadir   |
| 3. | Sony RX1RII   | 90 m, vier Flugstreifen, nadir   |
| 4. | Sony UMC-R10C | 90 m, zwei Flugstreifen, nadir, oblique 20° zum Gleis                    |
| 5. | Sony UMC-R10C | 90 m, zwei Flugstreifen, nadir, oblique 20° zum Gleis, 20° weg vom Gleis |

	X Fehler (cm)	Y Fehler (cm)	Z Fehler (cm)	XY Fehler (cm)	Total (cm)
1.	2.93942	3.87851	9.43737	4.86653	10.6182
2.	3.64932	5.36174	15.6304	6.48582	16.9226
3.	3.86495	2.38062	8.4993	4.5393	9.63553
4.	3.1072	6.34461	24.9091	7.06462	25.8916
5.	2.76694	8.9896	25.2242	9.40579	26.9208

Tabelle 9. Vergleich des RMSEs der durchgeführten Flüge

#### 7.1.2 In der Dichte der Punktwolke

In der Punktdichte der Dichten Punktwolke gibt es keine bedeutende Veränderung zwischen den rein nadir aufgenommenen Flügen 1 und 2 zu den nadir und oblique aufgenommenen Flügen 4 und 5. Eine deutliche Abweichung in der Punktdichte gibt es dagegen, wie zu erwarten war zwischen der Sony UMC-R10C mit 20,1 MP und der Sony RX1RII mit 42 MP. Das heißt, trotz der verschiedenen Perspektiven in einer Datenaufnahme und dem damit einhergehenden höheren Informationsgehalt der einzelnen Aufnahmen, wird keine wesentlich dichtere Punktwolke berechnet.

	Durchschnittliche Punktdichte /m <sup>2</sup>
1.	ca. 463
2.	ca 564
3.	ca 1732
4.	ca. 518
5.	ca 576

Tabelle10 Vergleich der durchschnittlichen Punktdichte einiger durchgeführter Flüge

Betrachtet man jedoch auch die Flüge mit einer sehr geringen seitlichen Überlappung der Bilder (Abstände der Flugstreifen 60, 80 oder 100 m) und dafür einer deutlich schräger gestellten Kamera (25, 30 oder 35°) fällt eine deutliche Verringerung der Punktdichte auf:

- Flug in 90 m Flughöhe, zwei Flugstreifen, nadir, oblique 25° zum Gleis, Abstand der Flugstreifen zueinander 60 m  
Ø 141
- Flug in 90 m Flughöhe, zwei Flugstreifen, nadir, oblique 25° zum Gleis, Abstand der Flugstreifen zueinander 80 m  
Ø 113
- Flug in 90 m Flughöhe, zwei Flugstreifen, nadir, oblique 25° zum Gleis, Abstand der Flugstreifen zueinander 100 m  
Ø 111

Diese Flüge fanden unter Schneebedingungen statt, was durchaus auch Auswirkungen auf die Punktdichte haben kann.

## 7.2 Verringerung des Zeitbedarfs

Ganz eindeutig messbar ist der Vorteil einer Kombination aus nadir- und oblique gerichtetem Sensor in einem Payload-Compartment beim Zeitbedarf. Obwohl die Befliegung linearer Infrastruktur mit vier Flugstreifen mit einer VTOL-fixed-wing-Drohne wie der Trinity F90+ gegenüber herkömmlichen terrestrischen Aufnahmemethoden oder der Befliegung mit Multikopterdrohnen bereits eine große Zeiteinsparung mit sich bringt, kann der Zeiteinsatz durch die Verringerung auf nur zwei Flugstreifen nochmal nahezu halbiert werden. Gerade bei der in naher Zukunft wahrscheinlichen Option von BVLOS-Flügen kann damit ein großer Zugewinn in Sachen Wirtschaftlichkeit des Drohneneinsatzes zum Vegetationsmonitorings erreicht werden.

Die Befliegung von einem Kilometer Bahngleisen mit wie bisher vier Flugstreifen ergibt einen Zeitbedarf von etwa acht Minuten pro Flug inklusive Start und Landung, ohne Flugvorbereitung. Dieser Wert gilt dann, wenn jeweils nur Teilstücke von einem Kilometer beflogen werden. Hochgerechnet auf das gesamte Schienennetz der Deutschen Bahn in Deutschland würde das folgenden Zeitbedarf ergeben:

$$8 \text{ min} \times 34.000 \text{ km} = 272.000 \text{ min (4533 h)}$$

Angenommen, die gleiche Strecke würde unter gleichen Rahmenbedingungen mit nur jeweils zwei statt vier Flugstreifen pro Teilstück beflogen, ergibt sich ein Zeitbedarf für einen Kilometer von rund fünf Minuten, was hochgerechnet folgenden Zeitbedarf ergeben würde:

$$5 \text{ min} \times 34.000 \text{ km} = 170.000 \text{ min (2833 h)}$$

Auch wenn diese Berechnung rein hypothetischer Natur ist, zeigt sie doch deutlich das Einsparpotential, welches sich durch eine Nutzlastkonfiguration mit zwei in verschiedenen Aufnahmewinkeln gleichzeitig auslösenden Kameras an einem VTOL-Starrflügel-UAV erreichen ließe.

### 7.3 Unterschiede in der Planung

Für einen herkömmlichen Flug mit der Trinity F90+, mit einem der für dieses UAV verfügbaren Sensoren, sind fast alle notwendigen Parameter in der Flugplanungssoftware QBase 3D bereits voreingestellt. Das gilt unter anderem für die ideale Überlappung der Bilder oder minimal mögliche Auslösezeit der jeweiligen Kamera. Der Nutzer muss den Flugplan nur den jeweiligen Windbedingungen anpassen und darauf achten, dass die minimale Auslösezeit der jeweiligen Kamera nicht unterschritten wird.

Für die Planung einer Mission mit nadir und oblique Aufnahmen muss aber auch der richtige Aufnahmewinkel der Kamera mit in Betracht gezogen werden. Wird eine Standard-Korridormission geplant, die eine hohe Seitwärtsüberlappung der Aufnahmen vorsieht, ist der Winkel für die Schrägaufnahmen meist so steil zu wählen, dass der eigentliche Vorteil der Kombination aus Senkrecht- und Schrägaufnahmen nicht zum Tragen kommt. Die Objekte, deren Seitenansicht von besonderem Interesse wären, wie Gebäude oder Bäume, werden nach wie vor zu steil aufgenommen und deren Seiten können nicht in die Verarbeitung der Punktwolke mitaufgenommen werden.

Wie in Kapitel 6.1.6 beschrieben, kommen zwei unterschiedliche Möglichkeiten in Frage, wie der Abstand zwischen den Flugstreifen so vergrößert werden kann, dass ein flacherer Aufnahmewinkel verwendet werden kann, der eine bessere Schrägansicht verspricht. Entweder kann hierfür die Seitwärtsüberlappung der Bilder auf bis zu 10% herabgesetzt werden kann, oder es werden zwei einzelne Flugstreifen in einem beliebigen Abstand zueinander geplant. Die erste Methode lässt einen Abstand der Flugstreifen von rund 120 m zu. Die zweite Methode dagegen birgt keine solche Restriktion auf einen bestimmten Abstand, sondern lässt den Abstand frei wählen. Die Erfahrung der durchgeführten Versuche zeigt aber, dass ein Abstand der zwei Flugstreifen von der Gleismitte von 50 m mehr als genug ist. Damit ist es ausreichend, in QBase 3D wie gehabt eine Korridormission zu erstellen, auf zwei Flugstreifen zu begrenzen und lediglich die Seitwärtsüberlappung auf 10 – 20% zu verringern, um einen Flug mit kombinierten Senkrecht- und Schrägaufnahmen so zu planen, dass ein brauchbares Ergebnis dabei herauskommt.

### 7.4 Bewertung der Ergebnisse

Bei gewähltem Kameramodell ist die Flughöhe aufgrund der Richtlinie (Einhaltung max. GSD) auf 90 m begrenzt. Das heißt es darf nur ein bestimmter Abstand zwischen den beiden Flugstreifen geplant werden, um eine für die photogrammetrische Auswertung übliche seitliche Überlappung der Bilder von mind. 70% gewährleisten zu können. Bei diesem vorgegebenen geringen Abstand der beiden Flugstreifen muss der Winkel der Schrägaufnahmen aber entsprechend steil gewählt werden, um das Zentrum des Bildes mit der geringsten Maßstabsverzerrung auf die erste Baumreihe neben den Gleisen gerichtet zu haben. Damit kann zwar mit nur zwei Flugstreifen eine ausreichend dichte Punktwolke erzeugt werden, um ein Orthomosaik für die doppelte Breite der Stabilisierungszone von ca. 60 m abzuleiten, aber dennoch bleiben Lücken in der Punktwolke im unteren Stammbereich der Bäume. So kann das U-Profil trotz Hinzunahme von Schrägaufnahmen nicht ohne Lücken in der Punktwolke

erstellt werden. Für die angestrebte Kombination aus Senkrecht- und Schrägaufnahmen für die Erfassung der gleisnahen Vegetation entlang von Bahnstrecken muss daher auf eine hohe seitliche Überlappung verzichtet werden, um genügend schräge Winkel zu erhalten, um das U-Profil nahezu lückenlos abbilden zu können.

Die Versuche mit veränderten Winkeln der Schrägaufnahmen zeigen, dass ein flacherer Aufnahmewinkel ein wie erwartet, besseres Ergebnis in Hinblick auf Lücken in der Punktwolke im Stammbereich der ersten Baumreihe gibt, aber gleichzeitig sinkt durch die geringere Seitwärtsüberlappung der Bilder und die stärkere Maßstabsverzerrung der Oblique-Aufnahmen auch die Genauigkeit des Ergebnisses insgesamt und der GSD im Speziellen. Die Punktdichte indes ändert sich durch die verschiedenen Aufnahmesettings nicht wesentlich. Hierfür spielt die Auflösung der eingesetzten Kamera eine wesentlich größere Rolle als die Ausrichtung der Kamera, wie der Vergleich mit der Sony RX1RII mit 42 MP zeigt.

Mit der Hinzunahme von schräg aufgenommenen Bildern kann das Ergebnis einer UAV-Befliegung im Rahmen des Vegetationsmanagements entlang einer Bahnstrecke wesentlich verbessert werden, wie die oben angeführten Ergebnissen zeigen. Jedoch ist es schwierig, alle dafür notwendigen Parameter in einem einzigen Flug mit nur zwei Flugstreifen zu vereinen. Es sollte eine gewisse Seitwärtsüberlappung bei der Flugplanung ebenso beachtet werden wie der notwendige Abstand zwischen den beiden Flugstreifen, um die oblique Aufnahmen mit einem geeigneten Winkel vornehmen zu können, um die Stammbereiche der gleisnahen Bäume erfassen zu können. Wird allerdings eine für die anschließende photogrammetrische Auswertung übliche Seitwärtsüberlappung von 70% gewählt kann durch den geringen Abstand der Flugstreifen nur ein sehr steiler Winkel gewählt werden und die erhofften Vorteile der schrägen Aufnahmen kommen kaum zum Tragen. Andersherum wird der Abstand zwischen den Flugstreifen für ein ordentliches Stitching der Bilder zu groß, wird ein hohes Augenmerk auf einen flacheren Winkel gelegt und der Abstand dementsprechend vergrößert.

Weiterhin lässt sich feststellen, dass die GSD größer wird, je flacher der Winkel der Schrägaufnahmen ist, die an der Berechnung der Punktwolke und des Orthomosaiks beteiligt sind.

Flug	GSD
90(m Flughöhe)4 (Streifen)	2,51 cm
80 4	2,22 cm
70 4	2,11 cm
90 2 nr	2,65 cm
90 2 nrl	2,67 cm
90 2 nr 30 m Abstand	2,60 cm
90 2 nr 40 m Abstand	2,78 cm
90 2 nr 50 m Abstand	2,84 cm

Tabelle11: Auflistung der GSDs bei Flügen

In Anbetracht dieser Ergebnisse ist es daher nicht möglich, ein einziges, allgemeingültiges und für alle Anwendungszwecke optimales Setting mit zwei Flugstreifen und der Kombination aus Senkrecht- und Schrägaufnahmen festzulegen. Vielmehr kommt es darauf an, ob das U-Profil der Bahnstrecke mit einer möglichst lückenlosen, dichten Punktwolke im Mittelpunkt des Interesses steht, oder die absolute Genauigkeit der aufgenommenen Daten, oder die Ableitung eines möglichst fehlerfreien und hochgenauen Oberflächenmodells oder Orthomosaiks.

Für ersteres, die möglichst dichte und lückenlose Punktwolke, auch im Stammbereich der Bäume entlang der Bahnlinie, dürfen die Flugstreifen in der Kombination Trinity F90+, Sony UMC-R10C und Agisoft Metashape durchaus bis zu 80 oder 100m auseinander liegen und nurmehr eine seitliche Überlappung von 10 – 20% aufweisen. Wie die oben beschriebenen Versuche gezeigt haben, kann damit eine sehr dichte Punktwolke erzeugt werden, die im gesamten U-Profil kaum noch nennenswerte Lücken aufweist.

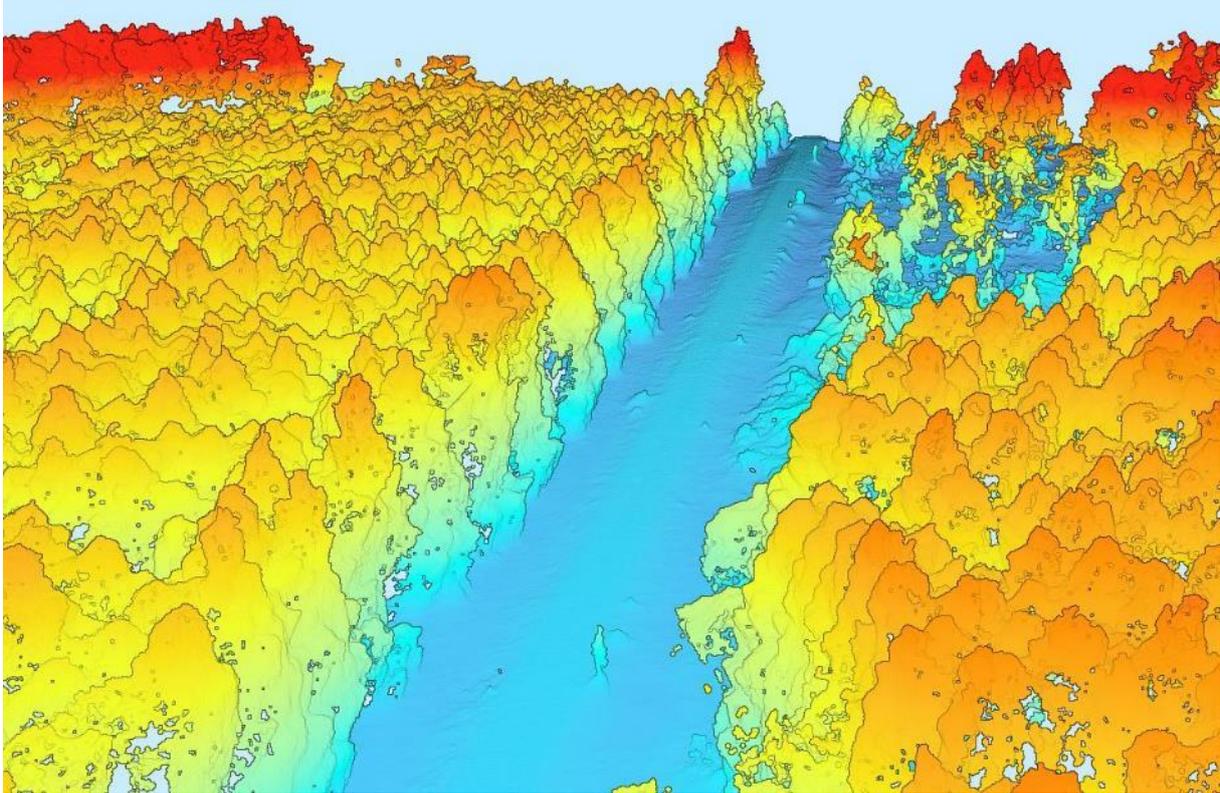


Abbildung 73 Dichte Punktwolke mit zwei Flugstreifen im Abstand von 100m, Neigungswinkel der Kamera 35°

Für zweiteres sollte die Aufnahmekonfiguration nicht so weit von der bisher üblichen Konfiguration abweichen. Das bedeutet in erster Linie eine deutlich höhere seitliche Überlappung als im oben beschriebenen Beispiel. Ein Abstand der beiden Flugstreifen von 40 m, was einer seitlichen Überlappung von rund 70% entspricht, und einem Neigungswinkel der Kamera von 20° hat sich hierfür als praktikabel herausgestellt.

Damit konnte ein sehr hoher Konfidenzwert für den unmittelbaren Gleisbereich erreicht werden, eine Dichte Punktwolke mit wenigen Lücken generiert werden und ein Orthomosaik abgeleitet werden, das nur an den Rändern der 60 Meter Zone beiderseits der Gleise kleine Lücken aufweist.

## 7.5 Tabellarische Zusammenfassung

Flug	Neigungs- winkel	Abstand in m	GSD in cm	Punktdichte $\varnothing / m^2$	RMSE Total in cm	Pro	Contra
UMC 90 - 4	-	40	2,51	ca. 463	10,6	- bewährter Ansatz - gute Darstellung des Orthomosaiks	- Lücken in der Punktvolke
RX1 90 - 4	-	30	1,27	ca. 1732	9,6	- sehr niedrige GSD	- Lücken in der Punktvolke
UMC 80 - 4	-	35	2,22	ca. 600	24,5	- niedrige GSD	- Lücken in der Punktvolke - nicht alle Bilder können aligned werden
UMC 70 - 4	-	30	2,11	ca. 564	16,9	- niedrige GSD	- Lücken in der Punktvolke - nicht alle Bilder können aligned werden
UMC 90 - 2 nr*	20°	40	2,65	ca. 518	25,9	- gute Darstellung des Orthomosaiks	- Wenig Änderung in der Darstellung der Dichten Punktvolke zur reinen Nadir-Aufnahme
UMC 90 - 2 nrl**	20° / 20°	40	2,67	ca. 576	26,9	- guter Kompromiss zwischen Lücken in der Punktvolke und Darstellung des Orthomosaiks	- drei Kameras aktuell nicht umsetzbar - wenig Änderung in der Darstellung der Dichten Punktvolke zur reinen Nadir-Aufnahme
UMC 90 - 2 nr*	25°	60	2,60	ca. 141	-	- gute Darstellung der gleisnahen Bäume in der Dichten Punktvolke	- verzerrte Darstellung des Orthomosaiks
UMC 90 - 2 nr*	30°	80	2,78	ca. 113	-	- nahezu lückenlose Punktvolke - sehr gute Schrägansicht der Bäume	- verzerrte Darstellung des Orthomosaiks - hohe GSD
UMC 90 - 2 nr*	35°	100	2,84	ca. 111	-	- nahezu lückenlose Punktvolke - sehr gute Schrägansicht der Bäume	- verzerrte Darstellung des Orthomosaiks - hohe GSD

Tabelle12: Zusammenfassung der Ergebnisse

\* nadir / rechts – ein Flug mit nadir gerichteter Kamera und ein Flug mit in Flugrichtung rechts schräg ausgerichteter Kamera zum Gleis hin

\*\* nadir / rechts / links - ein Flug mit nadir gerichteter Kamera, ein Flug mit in Flugrichtung rechts schräg ausgerichteter Kamera zum Gleis hin und ein Flug mit in Flugrichtung links ausgerichteter Kamera vom Gleis weg

## 8 Schlussfolgerung und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit der Kombination aus Senkrecht- und Schrägaufnahmen die UAV-Befliegung einer Bahnstrecke mit nur zwei Flugstreifen zum Zweck des Vegetationsmanagements durchaus möglich und sinnvoll ist.

Die Versuche mit verschiedenen Flughöhen haben gezeigt, dass eine niedrigere Flughöhe als die derzeit gebräuchliche Höhe von 90 m wenig Verbesserung der Ergebnisse verspricht. Zwar ist die Sony UMC-R10C durchaus in der Lage, auch in niedrigeren Flughöhen trotz der hohen minimalen Fluggeschwindigkeit der Trinity F90+ von 17 m/s schnell genug auszulösen und eine erforderliche Vorwärtsüberlappung von über 75% zu gewährleisten, jedoch wird die tatsächliche Flughöhe über den Baumkronen über bewaldeten Streckenabschnitten so niedrig, dass Lücken in der Punktwolke entstehen, da die verwendete Software Agisoft Metashape nicht mehr genügend viele Keypoints zuordnen kann. Daher wurden die Versuche mit einer Kombination aus Senkrecht- und Schrägaufnahmen auf die Flughöhe von 90 m AGL begrenzt.

Die Kombination von senkrecht und schräg aufgenommenen Bildern zeigt in allen durchgeführten Versuchen einen gewissen Einfluss auf die Höhengenaugigkeit. Während sich die Genauigkeit in XY-Richtung durch die Kombination von Bildern mit unterschiedlicher Aufnahmeausrichtung nur marginal verändert, zeigt die Genauigkeit in Z-Richtung eine deutliche Verschlechterung durch die Hinzunahme von schräg aufgenommenen Bildern. Beträgt der Z error für den Flug mit vier Flugstreifen mit nur senkrecht aufgenommenen Bildern 9,4 cm, ist er bei der Kombination aus senkrecht und schräg aufgenommenen Bildern mit 24,9 cm mehr als zweieinhalbmal so hoch.

Die Bildüberlappung war in allen durchgeführten Versuchen groß genug, um im Zentrum der Aufnahmen, dem Bahngleis selbst, jeweils eine hohe Konfidenz zu erreichen und ein lückenloses Orthomosaik erstellen zu lassen. Obwohl für den Flug mit 50 m Abstand vom Gleis und einem Aufnahmewinkel von 35° lediglich noch eine Seitwärtsüberlappung der Nadir-Aufnahmen von 10% zur Anwendung kam, konnte diese mangelnde Überlappung der senkrechten Aufnahmen durch die in den Überlappungsbereich gerichteten schrägen Aufnahmen problemlos ausgeglichen werden. Es konnte jeweils eine genügend dichte Punktwolke für weiterführende Analysen erzeugt werden, wie auch ein nahezu lückenloses Orthomosaik (für den doppelten Bereich der Stabilisierungszone von 60 m beiderseits der Gleise) abgeleitet werden.

### 8.2 Ausblick und Fortführung

#### 8.2.1 FreeRail

Die überwiegend positiven Ergebnisse der versuchsweisen Befliegung von Bahnstrecken im Rahmen meiner Masterarbeit mit einer VTOL Starrflüglerdrohne und einer Kombination aus nadir und in veränderlichen Winkeln oblique angebrachten, hochauflösenden EO-Kameras bieten die Basis auch über eine weitergehende Anwendung dieser Konfiguration nachzudenken.

So müssen alle Bestandspläne mit ihren sicherheitsrelevanten Objekten (Gleismagnete, Signale, Achszähler, Masten, Schilder etc.) aktuell gehalten und nach Vorgaben des Eisenbahnbundesamtes

(EBA) von Zeit zu Zeit abgeglichen werden. Bis 2026 werden ca. 4,9 Millionen Bestandspläne der baulichen Infrastruktur auf den neuesten Stand gebracht. Der zeitlich und räumlich flexible Einsatz von UAV, je nach aktuellem Bedarf, kann hier sehr vorteilhaft sein. Drohneneinsätze sollen die Produktionsdurchführungen dabei unterstützen, Bahnanlagen aus der Luft zu erfassen und durch Orthofotos die Informationsgrundlage für den Planabgleich zu schaffen.

Neben der genauen Verortung der Objekte ist es auch wichtig, die Objekte selbst identifizieren zu können. Hierfür könnten Oblique-Aufnahmen dienen, um beispielsweise Signale und Schilder zu erkennen und einordnen zu können.

Weiterhin müsste dafür der Gefahrenbereich an Bahnstrecken von Personen nicht mehr betreten werden und auch die Erfassung der Objekte mittels Messzüge mit entsprechenden Kamerasystemen könnte eingespart werden.

Gerade der kombinierte Einsatz eines drohnengestützten LiDAR-Systems und die Ergebnisse einer hochauflösenden EO-Kamera mit kombinierter nadir- und oblique-Ausrichtung zur Kolorierung der LiDAR-Punktwolke könnten in Zukunft von großer Bedeutung für die Erfassung von Bauwerken, Signalanlagen und Schildern sein. Mit dieser Technik kann noch ein höherer Detailgrad erreicht werden als mit der rein photogrammetrisch erstellten Punktwolke. Ein wichtiger Vorteil von LiDAR-Systemen ist die direkte Erfassung von 3D-Koordinaten von Bodenobjekten. Die erfassten Punktwolken enthalten jedoch keine photometrische Informationen außer der Intensität des zurückgesendeten Lasersignals (GHANBARI PARMEHR, FRASER ET AL. 2013). Üblicherweise wird für jeden Punkt in einer 3-D-Punktwolke eine Farbe in Abhängigkeit von einer vordefinierten Variable, wie z.B. der Höhe, ausgewählt. Dementsprechend werden die Variationen in der Farbe in der Regel dazu verwendet, Punkte in unterschiedlichen Höhen oder in Höhen über dem Boden zu identifizieren. Ungeachtet der Verwendung solcher herkömmlichen Farbskalen sind 3D-Punktwolkendaten nach wie vor schwierig zu interpretieren (MINEAR AND SMITH 2011). Dafür können die Bilddaten verwendet werden, um Farben auf die gemessenen Oberflächenpunkte anzuwenden, was eine farbige, dreidimensionale Darstellung der physikalischen Oberfläche ergibt (POLLOCK 2014). Mit der Anzeige von LAS-Punkten mithilfe von RGB-Informationen lässt sich eine einzigartig immersive, fotorealistische Anzeige erreichen. Das visuelle Feedback von echten Bilddaten, die über LAS-Punkte gelegt werden, kann Informationen über die diskontinuierlichen Eigenschaften der Punktwolke liefern. Das kann bei der interaktiven Klassifizierung von Daten, bei der Digitalisierung neuer Features sowie bei der Einrichtung eines Bezugspunktes hilfreich sein, wenn 3D-Entfernungsmesswerte verwendet werden (ARCGIS PRO 2021). Am besten werden die für die Kolorierung von LiDAR-daten erhobenen RGB-Bilder zur selben Zeit gewonnen, um bei den erfassten Objekten die höchstmögliche Übereinstimmung zu erzielen. Zumindest sollten aber Bilddaten verwendet werden, die möglichst nah am Zeitpunkt der LiDAR Vermessung aufgenommen wurden um Unterschiede aufgrund von Ereignissen wie Bauarbeiten oder die jahreszeitliche Veränderung von Laub an Bäumen und anderen Pflanzen zu minimieren (ARCGIS PRO 2021).

Gerade bei einer Anwendung wie der Kolorierung von LiDAR-Punktwolken können RGB-Daten, die aus einer Kombination von nadir und oblique aufgenommenen Bildern bestehen von besonderem Interesse sein, da Vegetations- oder Bauwerkspunkte in verschiedenen Höhen noch realistischer eingefärbt werden können als dies mit nur Nadir-Aufnahmen der Fall wäre. Seit Januar 2021 ist ein leistungsfähiger LiDAR-Sensor für die Trinity F90+ verfügbar, so dass dieses Setting in naher Zukunft auf seine Praxistauglichkeit getestet werden wird.

In der Zukunft sind auch vollkommen autonome Flugkampagnen mit Drohen zum Monitoring von Bahnstrecken denkbar. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur geförderten Projektes Freerail entwickelt die Firma Quantum-Systems einen mobilen Drohnenhangar (der sog. Droneport, aus dem Drohen zu unterschiedlichen Einsätzen vollkommen autonom werden agieren können).

**Projektziel:**

*Im Projekt sollen die wissenschaftlichen Grundlagen eines zukünftigen vollautomatisierten drohnenbasierten Systems digitalisierten Vegetationskontrolle und Registrierung von Schäden nach Unwetterereignissen entlang des Streckennetzes der Deutschen Bahn erarbeitet werden. Ziel ist zum einen die Konzeptionierung und Untersuchung der hierfür benötigten Technologien und Betriebsprozesse. Zum anderen soll ein funktionsfähiger Demonstrator entwickelt und an einem ausgewählten Streckenabschnitt erprobt werden.*

**Durchführung:**

*Mit Hilfe einer senkrechtstartfähigen Langstreckendrohne werden unterschiedliche Sensordaten entlang der Strecke erhoben. Die Drohne startet und landet vollautomatisch aus einem autarken Drohnenhangar, der in unmittelbarer Nähe zur Teststrecke dauerhaft stationiert ist. Mit einem speziellen Kommunikations- und Datenverarbeitungssystem werden die erhobene Daten automatisiert ausgewertet und das Ergebnis an den verantwortlichen Mitarbeiter übertragen.*

**(BMVI 2020)**

In der praktischen Umsetzung könnte jedem Droneport ein fester Flugkorridor zugewiesen werden, so dass irgendwann eine hohe Abdeckung des Schienennetzes erreicht werden kann. Das ermöglicht das Einmessen fester GCPs, die für die Positionskorrektur im PPK-Verfahren verwendet werden können. Die Vision sieht eine KI-gestützte Flugplanung vor, die aktuelle Gegebenheiten wie Windgeschwindigkeit und -richtung ebenso berücksichtigt, wie die notwendige Überlappung und den Winkel der obliquen Aufnahmen für den jeweiligen Anwendungszweck.

Durch ein ebenso automatisiert ablaufendes Bildmanagement nach dem Flug, welches neben dem Geotagging evtl. auch schon erste Ableitungen von Ergebnissen beinhaltet können und Hindernisse im Gleisraum erkannt werden. So werden unter Zuhilfenahme obliquen Aufnahmen U-Profile und V-Profile ebenso erstellt wie umgestürzte Bäume oder beschädigte Signalanlagen erkannt.

### 8.2.2 Oblique

Aktuell kann der Neigungswinkel der verwendeten Kamera nur manuell und für einen ganzen Flug fix eingestellt werden. Perspektivisch ist es aber durchaus denkbar und überlegenswert, ob der Neigungswinkel mittels eines kleinen Elektromotors im Flug schwenkbar gemacht werden sollte. Somit kann der Neigungswinkel der Kamera besser auf aktuelle Gegebenheiten angepasst werden. Die Neigungswinkel könnten in der Planungssoftware QBase 3D auswählbar gemacht werden und sich im Flug automatisch an die Voreinstellung entsprechend der gewählten Flughöhe und Distanz von den Gleisen justiert werden.

## Literaturverzeichnis

- Campbell, J. and R. Wynne (2011). Introduction to Remote Sensing.
- Cledat, E., L. V. Jospin, D. A. Cucci and J. Skaloud (2020). "Mapping quality prediction for RTK/PPK-equipped micro-drones operating in complex natural environment." ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **167**: 24-38.
- Colomina, I. and P. Molina (2014). "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review." ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **92**: 79-97.
- Dinkov, D. and A. Kitev (2020). ADVANTAGES, DISADVANTAGES AND APPLICABILITY OF GNSS POST-PROCESSING KINEMATIC (PPK) METHOD FOR DIRECT GEOREFERENCING OF UAV IMAGES.
- Eisenbeiss, H. and M. Sauerbier (2011). "Investigation of uav systems and flight modes for photogrammetric applications." The photogrammetric record **26**: 421.
- Ferrer-González, E., F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez and P. Martínez-Carricondo (2020). "UAV Photogrammetry Accuracy Assessment for Corridor Mapping Based on the Number and Distribution of Ground Control Points." Remote sensing (Basel, Switzerland) **12**(ISSN: 2072-4292).
- Flammini, F., C. Pragliola and G. Smarra (2016). Railway infrastructure monitoring by drones.
- Fonstad, M. A., J. T. Dietrich, B. C. Courville, J. L. Jensen and P. E. Carbonneau (2013). "Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement." Earth Surface Processes and Landforms **38**(4): 421-430.
- Gerke, M. (2010). "Dense matching in high resolution oblique airborne images." International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **38**.
- Gerke, M. and G. Vosselman (2016). Auswertung von Schrägluftaufnahmen: 1-22.
- Ghanbari Parmehr, E., C. Fraser, C. Zhang and J. Leach (2013). Automatic co-registration of satellite imagery and LiDAR data using local Mutual Information.
- Gregory-Lederer, M. (2020). "NADIR AND OBLIQUE UAV PHOTOGRAMMETRY TECHNIQUES FOR QUANTITATIVE ROCK FALL EVALUATION IN THE RIMROCKS OF SOUTH-CENTRAL MONTANA."
- Grenzdörffer, G., M. Guretzki and I. Friedlander (2008). "Photogrammetric image acquisition and image analysis of oblique imagery." The Photogrammetric Record **23**: 372-386.
- Grubestic, T. H. and J. R. Nelson (2020). UAVs and Urban Spatial Analysis : An Introduction, Cham : Springer International Publishing : Imprint: Springer: 1 Online-Ressource (XIV, 206 Seiten), 268 Illustrationen, 266 Illustrationen.
- Haala, N. and M. Rothermel (2012). "DENSE MULTIPLE STEREO MATCHING OF HIGHLY OVERLAPPING UAV IMAGERY." ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **XXXIX-B1**: 387-392.
- Heipke, C. (2017). Photogrammetrie und Fernerkundung: Handbuch der Geodäsie, Herausgegeben Von Willi Freeden und Reiner Rummel. Berlin, Heidelberg, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg.
- Höhle, J. (2008). "Photogrammetric Measurements in Oblique Aerial Images." Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation: 7-14.
- Iglhaut, J., C. Cabo, S. Puliti, L. Piermattei, J. O'Connor and J. Rosette (2019). "Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review." Current Forestry Reports **5**.

- Iizuka, K., M. Itoh, S. Shiodera, T. Matsubara, M. Dohar and K. Watanabe (2018). "Advantages of unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry for landscape analysis compared with satellite data: A case study of postmining sites in Indonesia." Cogent Geoscience **4**(1): 1498180.
- Koenderink, J. J. and A. J. van Doorn (1991). "Affine structure from motion." Journal of the Optical Society of America A **8**(2): 377-385.
- Krause, S. (2016). Master Thesis Defence: UAV-Based Flight Planning Methodologies for Forest Photogrammetry.
- Krause, S., F. Hartmann and J.-P. Mund (2016). UAV Workflow Optimization for the Acquisition of High-Quality Photogrammetric Point Clouds in Forestry.
- Langley, R. B., P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck (2017). Introduction to GNSS. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck. Cham, Springer International Publishing: 3-23.
- Minear, K. and A. O. N. Smith (2011). Method for colorization of point cloud data based on radiometric imagery, Google Patents.
- Nex, F., E. Rupnik and F. Remondino (2013). Building Footprints Extraction from Oblique Imagery.
- Ollero, A., J. R. Martínez-de-Dios and L. Merino (2006). "Unmanned aerial vehicles as tools for forest-fire fighting." Forest ecology and management **234**(**ISSN: 0378-1127**): S263.
- Phiesel, D. (2019) Einfache und quantitative Risikobewertung des Betriebs kleiner unbemannter Fluggeräte im untersten Luftraum. Dissertation. Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
- Ranquist, E., M. Steiner and B. Argrow (2017). Exploring the range of weather impacts on UAS operations.
- Rossi, P., F. Mancini, M. Dubbini, F. Mazzone and A. Capra (2017). "Combining nadir and oblique UAV imagery to reconstruct quarry topography: methodology and feasibility analysis." European Journal of Remote Sensing **50**: 211-221.
- Sanz-Ablanedo, E., J. H. Chandler, J. R. Rodríguez-Pérez and C. Ordóñez (2018). "Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used." Remote Sensing **10**(10).
- Senthilnath, J., M. Kandukuri, A. Dokania and K. N. Ramesh (2017). "Application of UAV imaging platform for vegetation analysis based on spectral-spatial methods." Computers and Electronics in Agriculture **140**: 8-24.
- Shen, X., L. Cao, B. Yang, Z. Xu and G. Wang (2019). "Estimation of Forest Structural Attributes Using Spectral Indices and Point Clouds from UAS-Based Multispectral and RGB Imageries." Remote Sensing **11**(7): 800.
- Snavely, N., S. M. Seitz and R. Szeliski (2008). "Modeling the World from Internet Photo Collections." International Journal of Computer Vision **80**(2): 189-210.
- Tomaščík, J., M. Mokroš, P. Surový, A. Grznárová and J. Merganič (2019). "UAV RTK/PPK Method—An Optimal Solution for Mapping Inaccessible Forested Areas?" Remote Sensing **11**(6).
- Toro, F. G. and A. Tsourdos (2018). UAV-Based Remote Sensing Volume 1, MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Toth, C. and B. Jutzi (2017). Plattformen und Sensoren für die Fernerkundung und deren Geopositionierung: 29-64.

- Turner, D., A. Lucieer and C. Watson (2012). "An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds." *Remote Sensing* **4**: 1392-1410.
- Vacca, G., A. Dessì and A. Sacco (2017). "The Use of Nadir and Oblique UAV Images for Building Knowledge." *ISPRS International Journal of Geo-Information* **6**: 393.
- Wang, B. H., D. B. Wang, Z. A. Ali, B. Ting Ting and H. Wang (2019). "An overview of various kinds of wind effects on unmanned aerial vehicle." *Measurement and Control* **52**(7-8): 731-739.
- Westoby, M., J. Brasington, N. Glasser, M. Hambrey and J. Reynolds (2012). "'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications." *Geomorphology* **179**: 300-314.
- Wierzbicki, D. (2018). "Multi-Camera Imaging System for UAV Photogrammetry." *Sensors* **18**(8): 2433.
- Zhang, H., E. Aldana-Jague, F. Clapuyt, F. Wilken, V. Vanacker and K. Van Oost (2019). "Evaluating the potential of post-processing kinematic (PPK) georeferencing for UAV-based structure- from-motion (SfM) photogrammetry and surface change detection." *Earth surface dynamics* **7**(**<b>ISSN: </b>2196-632X**): 827.

## **Internetquellen**

BMJV (1967) Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO). Abgerufen am 20.12.2020 von <https://www.gesetze-im-internet.de/ebo/BJNR215630967.html#BJNR215630967BJNG000100328>

BMJV (2015) Luftverkehrsordnung (LuftVO)  
Abgerufen am 12.01.2021 von [https://www.gesetze-iminternet.de/luftvo\\_2015/inhalts\\_bersicht.html](https://www.gesetze-iminternet.de/luftvo_2015/inhalts_bersicht.html)

BMVI. (2020). mFUND im Überblick. Abgerufen am 02. 11. 2020, von <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-ueberblick.html>

BMVI (2020) Validierung und Integration von sicheren und effizienten Drohnensystemen in den unteren Luftraum – VISA-BVLOS. Abgerufen am 02.12.2020, von <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/UAV-Projekte/visa-bvlos.html>

BMW (2020) ... mit Drohnen Unbemanntes Fliegen im Dienst von Mensch, Natur und Gesellschaft. Abgerufen am 09.11.2020, von [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/drohnen-unbemanntes-fliegen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=14](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/drohnen-unbemanntes-fliegen.pdf?__blob=publicationFile&v=14)

DB Netz AG (2019), DB Fahrwegdienste GmbH – Leistungsspektrum. Abgerufen am 02.11.2021 von [https://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg-de/unternehmen/db\\_netz\\_ag/externe\\_organisationen/fahrwegdienste-1368662](https://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg-de/unternehmen/db_netz_ag/externe_organisationen/fahrwegdienste-1368662)

Deutsche Bahn Verkehrsmeldungen. „Ein umgestürzter Baum im Gleis beeinträchtigt den Bahnverkehr zwischen #Hamburg und #Lübeck. Züge des Fernverkehrs werden über Büchen umgeleitet. Verspätungen von etwa 90 Minuten sind leider die Folge.“ 15. März 2019, 11.20 Uhr, Tweet

EASA – European Union Aviation Safety Agency (2021) Civil drones (Unmanned aircraft)

Abgerufen am 12.01.2021 von <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas>

ESRI (2021) Technical Support – GIS Dictionary

Abgerufen am 22.01.2021 von

<https://support.esri.com/en/other-resources/gis-dictionary/term/cf6c5e7c-0ca6-4e03-bfc1-5fbc94898344>

Europäische Kommission (2020) DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2020/639 DER KOMMISSION.

Abgerufen am 23.12.2020 von [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_impl/2020/639/oj](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2020/639/oj)

GEAVIS (2018). What are the characteristics and differences between RTK and PPK drone?

Abgerufen am 25.02.2021, von

<https://www.geavis.si/en/2018/03/characteristics-differences-rtk-and-ppk-drone/>

Lexikon der Fernerkundung (2020)

Abgerufen am 13.01.2021 von [Lexikon der Fernerkundung \(fe-lexikon.info\)](http://www.fe-lexikon.info)

NOAA (2020) GPS Accuracy

Abgerufen am 29.11.2020, von

<https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>

Northrop Grumman (2021) Global Hawk

Abgerufen am 11.01.2021 von <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/air/globalhawk/>

Pix4D (2020) Step 1. Before Starting a Project > 1. Designing the Image Acquisition Plan > a. Selecting the Image Acquisition Plan Type. Abgerufen am 17.12.2020 von

<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557459-Step-1-Before-Starting-a-Project-1-Designing-the-Image-Acquisition-Plan-a-Selecting-the-Image-Acquisition-Plan-Typ>

Sonnenverlauf.de (2021) Berechnung Sonnenverlauf für Gilching, Bayern, 18.Nov.2020, 12:11 UTC+1.

Abgerufen am 27.02.2021 von:

<https://www.sonnenverlauf.de/#/48.1091,11.3001,3/2020.11.18/12:11/1/3>

## Verwendete Software

Agisoft Metashape Professional. Software. Version 1.6.5. - 2020. Available online:

<http://www.agisoft.com/downloads/installer/>

ESRI ArcGIS Pro. Software. Version 2.5.0. – 2020. Available online:

<https://pro.arcgis.com/de/pro-app/latest/get-started/install-and-sign-in-to-arcgis-pro.htm>

QBase 3D. Software. Version 2.3.23. Available online:

<https://www.quantum-systems.com/qbase-3d/>

## Anhang

Processing Reports aus Agisoft Metashape

# 20201118\_UMC\_90\_4

Processing Report  
20 December 2020



# Survey Data

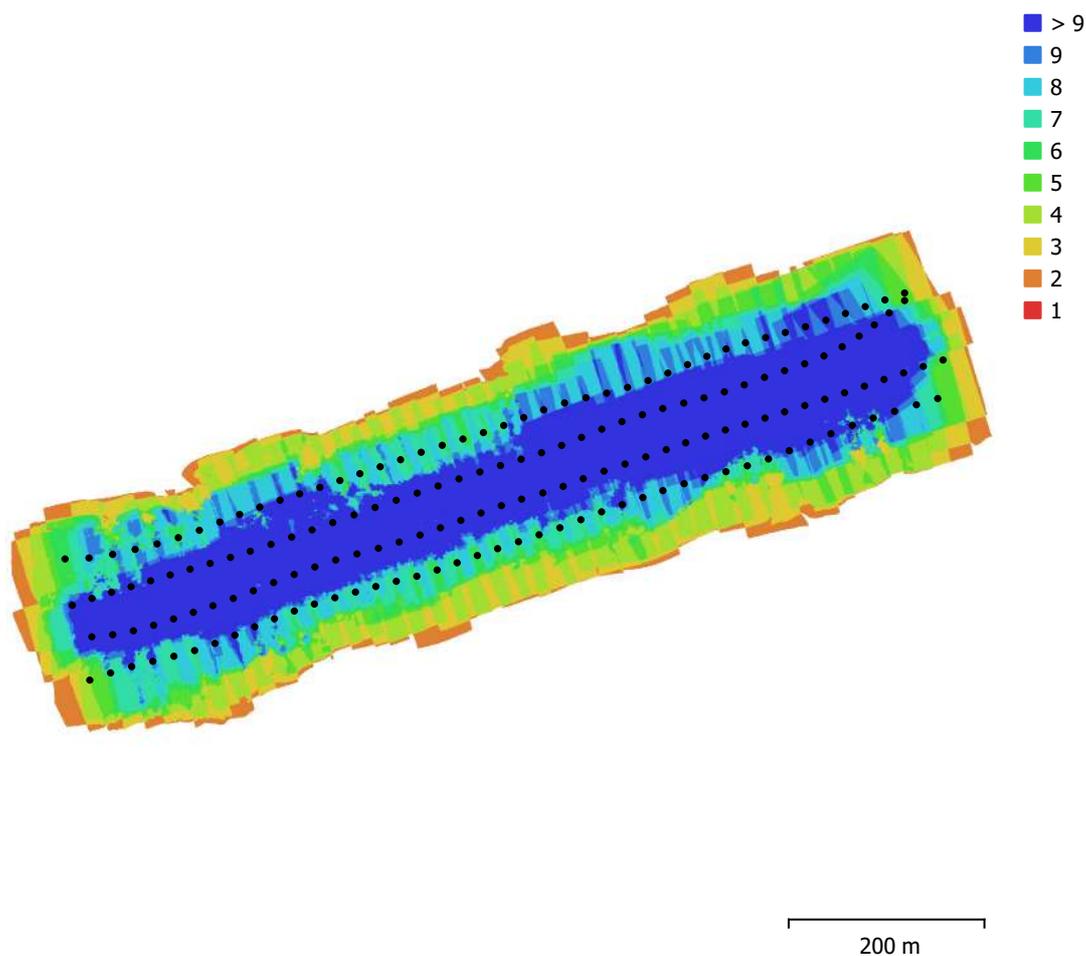


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	170	Camera stations:	170
Flying altitude:	104 m	Tie points:	74,866
Ground resolution:	2.51 cm/pix	Projections:	230,692
Coverage area:	0.242 km <sup>2</sup>	Reprojection error:	0.464 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)	5456 x 3632	16 mm	4.4 x 4.4 μm	No

Table 1. Cameras.

# Camera Calibration

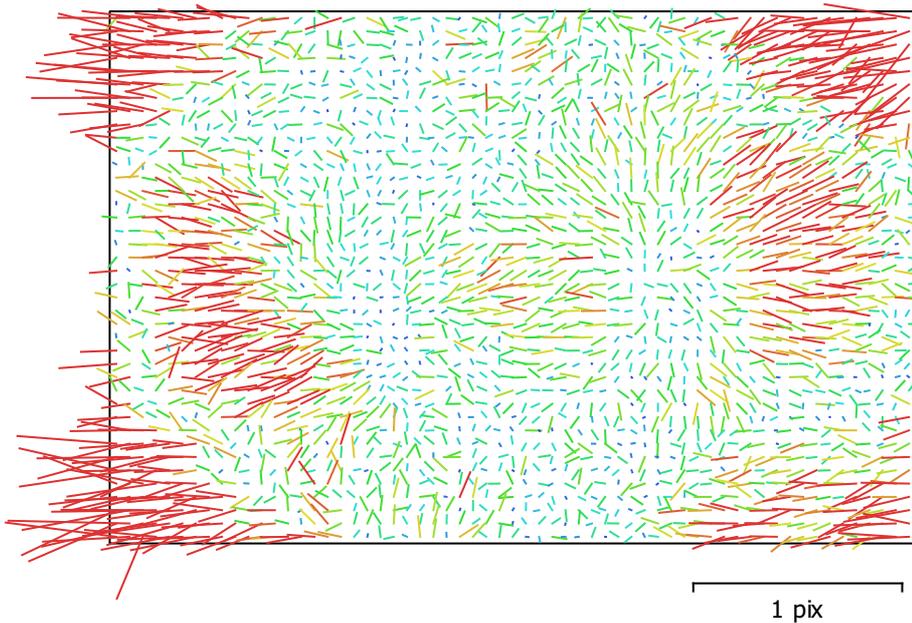


Fig. 2. Image residuals for UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm).

## UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)

170 images

Type  
Frame

Resolution  
5456 x 3632

Focal Length  
16 mm

Pixel Size  
4.4 x 4.4  $\mu\text{m}$

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
<b>F</b>	<b>3738.1</b>	0.12	1.00	0.11	-0.25	-0.11	0.03	-0.22	0.20	-0.09	-0.03	-0.00
<b>Cx</b>	<b>-37.1918</b>	0.031		1.00	-0.06	-0.11	-0.01	-0.00	-0.00	0.03	0.80	-0.04
<b>Cy</b>	<b>0.316176</b>	0.027			1.00	0.01	-0.15	0.03	-0.04	0.01	-0.02	0.72
<b>B1</b>	<b>-1.93222</b>	0.03				1.00	0.03	-0.01	0.04	-0.03	-0.01	-0.01
<b>B2</b>	<b>-0.108722</b>	0.029					1.00	0.01	-0.01	0.02	-0.00	-0.01
<b>K1</b>	<b>-0.0656275</b>	4.1e-05						1.00	-0.96	0.90	0.02	-0.02
<b>K2</b>	<b>0.0837072</b>	0.00013							1.00	-0.98	-0.04	-0.00
<b>K3</b>	<b>0.0136157</b>	0.00012								1.00	0.04	0.00
<b>P1</b>	<b>0.00101664</b>	3e-06									1.00	-0.03
<b>P2</b>	<b>-0.000870512</b>	2.4e-06										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

# Camera Locations

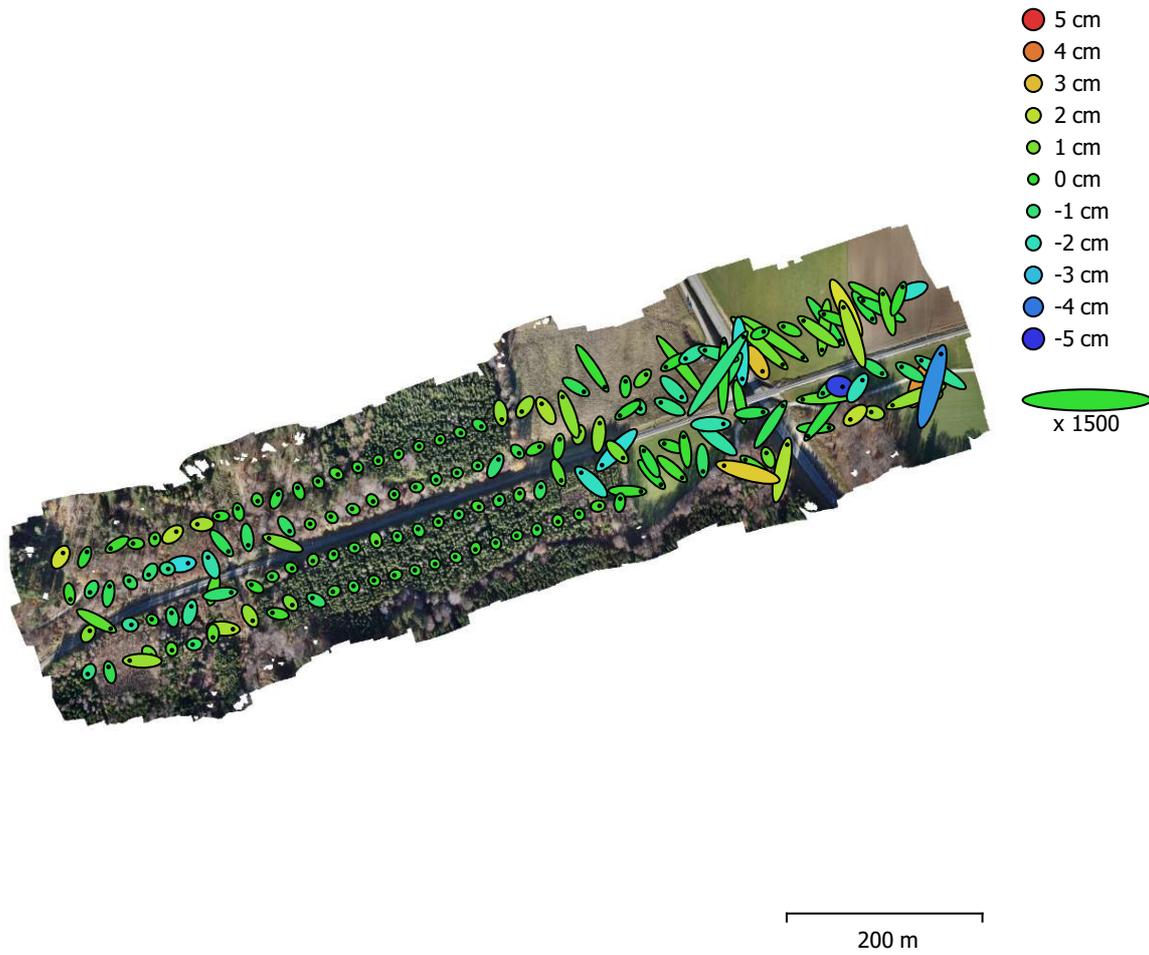


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>XY error (cm)</b>	<b>Total error (cm)</b>
1.06964	1.26521	1.08523	1.65676	1.98056

Table 3. Average camera location error.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

# Ground Control Points

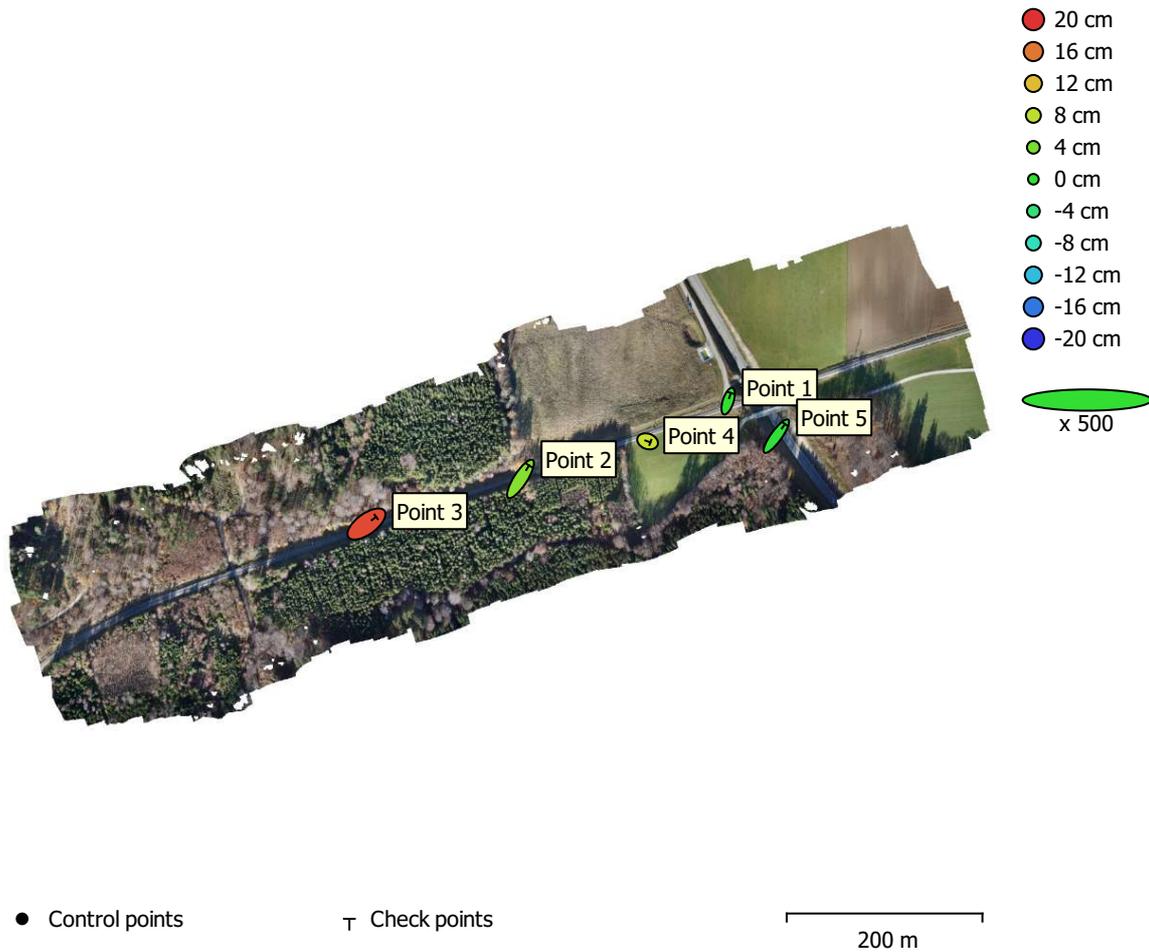


Fig. 4. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
5	2.93942	3.87851	9.43737	4.86653	10.6182

Table 4. Check points RMSE.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

<b>Label</b>	<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>Total (cm)</b>	<b>Image (pix)</b>
Point 1	1.0891	3.3586	0.130474	3.53318	0.270 (7)
Point 2	3.51764	5.51537	4.85942	8.14906	0.899 (8)
Point 3	3.95157	2.93091	18.5615	19.2025	1.072 (8)
Point 4	1.14678	-0.419385	8.77282	8.85739	0.390 (9)
Point 5	3.56526	4.97481	-0.442841	6.13645	0.385 (6)
<b>Total</b>	<b>2.93942</b>	<b>3.87851</b>	<b>9.43737</b>	<b>10.6182</b>	<b>0.697</b>

Table 5. Check points.  
X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

# Digital Elevation Model

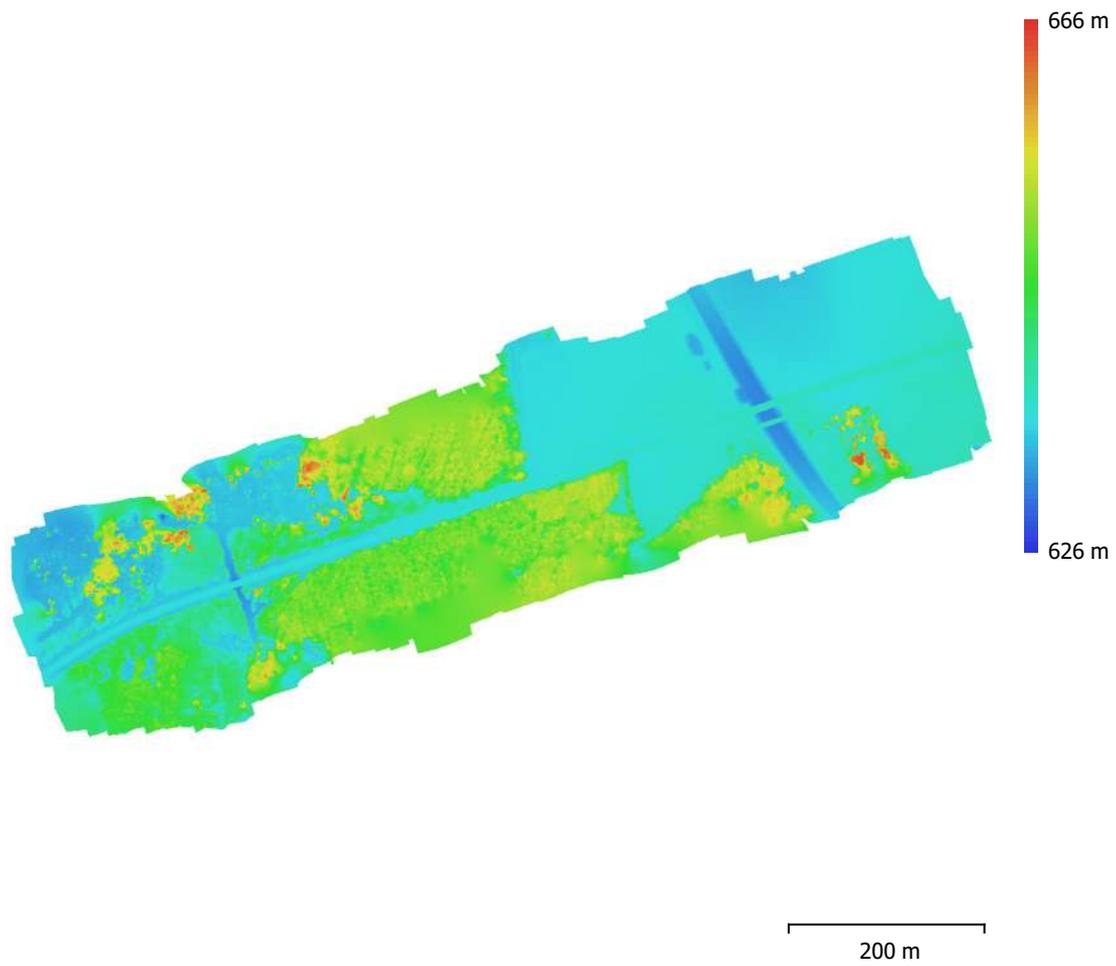


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 5.02 cm/pix  
Point density: 396 points/m<sup>2</sup>

# Processing Parameters

## General

Cameras	170
Aligned cameras	170
Markers	5
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

## Point Cloud

Points	74,866 of 108,791
RMS reprojection error	0.122156 (0.464062 pix)
Max reprojection error	0.278058 (3.0375 pix)
Mean key point size	3.67888 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	3.69546

## Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	8 minutes 10 seconds
Matching memory usage	1.19 GB
Alignment time	37 seconds
Alignment memory usage	77.50 MB
Software version	1.6.5.11249
File size	8.18 MB

## Dense Point Cloud

Points	112,166,677
Point colors	3 bands, uint8

## Depth maps generation parameters

Quality	High
Filtering mode	Mild
Processing time	1 hours 21 minutes

## Dense cloud generation parameters

Processing time	18 minutes 37 seconds
Software version	1.6.5.11249
File size	1.57 GB

## DEM

Size	26,914 x 15,116
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)

## Reconstruction parameters

Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	2 minutes 45 seconds
Memory usage	307.20 MB
Software version	1.6.5.11249
File size	345.49 MB

## Orthomosaic

Size	39,760 x 21,522
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)
Colors	3 bands, uint8

**Reconstruction parameters**

Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Processing time	7 minutes 2 seconds
Memory usage	3.01 GB
Software version	1.6.5.11249
File size	3.94 GB

**System**

Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.6.5 build 11249
OS	Windows 64 bit
RAM	15.93 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz
GPU(s)	None

# 20201113\_UMC\_80\_4

Processing Report  
31 March 2021



# Survey Data

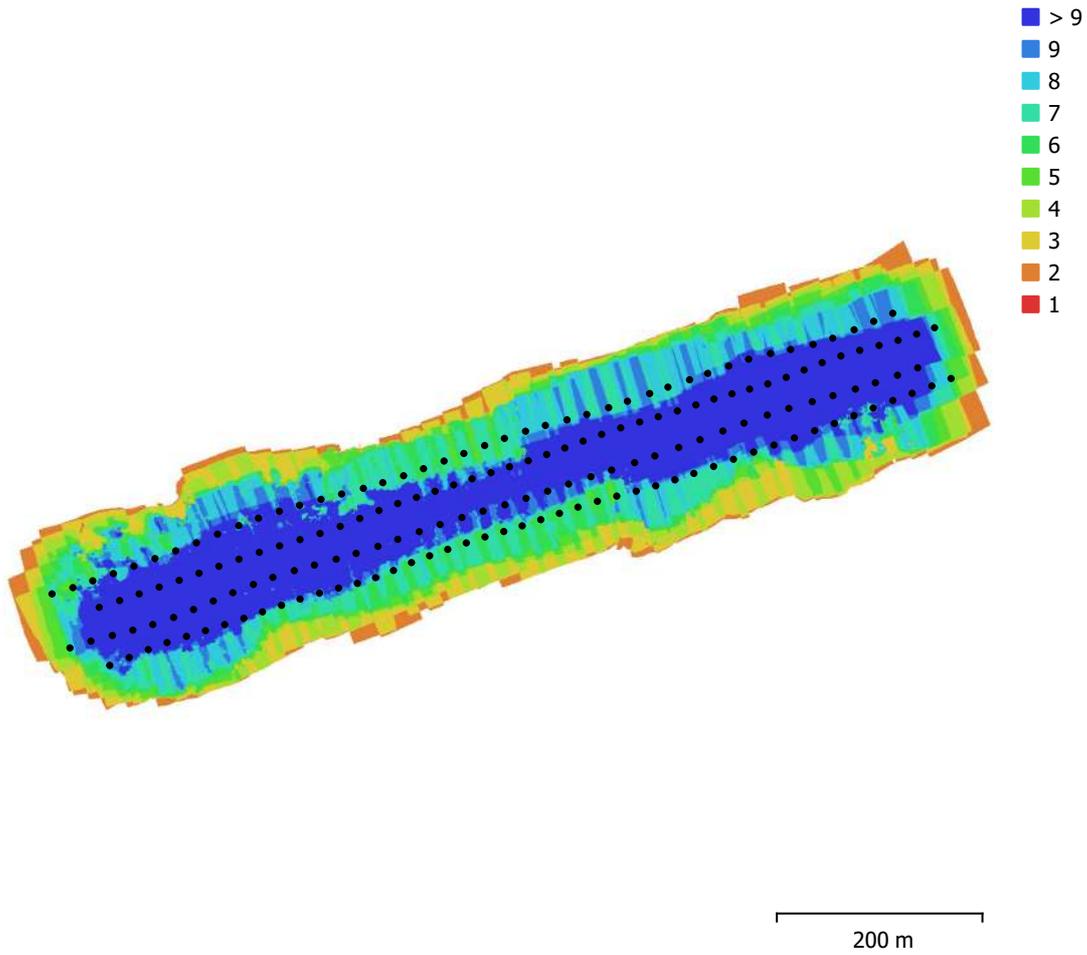


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	173	Camera stations:	173
Flying altitude:	92 m	Tie points:	79,751
Ground resolution:	2.22 cm/pix	Projections:	263,552
Coverage area:	0.183 km <sup>2</sup>	Reprojection error:	0.572 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)	5456 x 3632	16 mm	4.4 x 4.4 μm	No

Table 1. Cameras.

# Camera Calibration

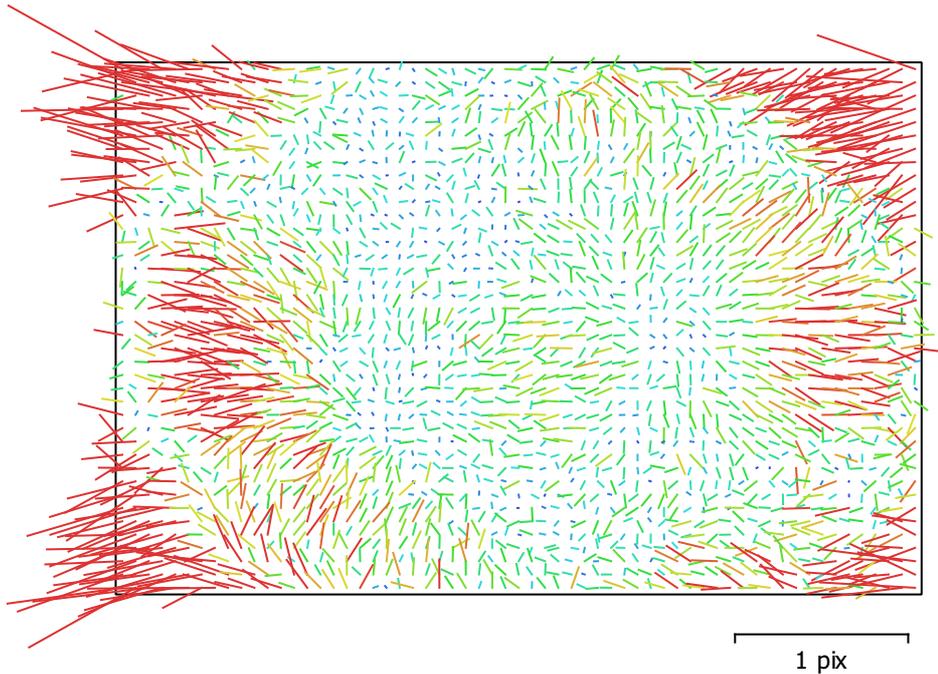


Fig. 2. Image residuals for UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm).

## UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)

173 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
<b>Frame</b>	<b>5456 x 3632</b>	<b>16 mm</b>	<b>4.4 x 4.4 <math>\mu</math>m</b>

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
<b>F</b>	<b>3751.06</b>	0.25	1.00	0.23	-0.44	-0.07	0.02	-0.22	0.21	-0.04	-0.00	-0.04
<b>Cx</b>	<b>-33.4352</b>	0.052		1.00	-0.11	-0.01	-0.07	-0.02	0.01	0.04	0.62	-0.04
<b>Cy</b>	<b>5.17054</b>	0.052			1.00	-0.03	-0.10	0.07	-0.09	0.03	0.02	0.49
<b>B1</b>	<b>-3.15721</b>	0.055				1.00	0.04	0.00	0.03	-0.02	0.04	0.07
<b>B2</b>	<b>1.49573</b>	0.054					1.00	-0.00	0.01	-0.01	-0.17	0.00
<b>K1</b>	<b>-0.0667249</b>	5.5e-05						1.00	-0.95	0.88	0.05	-0.02
<b>K2</b>	<b>0.086315</b>	0.00018							1.00	-0.97	-0.05	-0.03
<b>K3</b>	<b>0.0123218</b>	0.00017								1.00	0.06	0.03
<b>P1</b>	<b>0.000978002</b>	3.9e-06									1.00	-0.03
<b>P2</b>	<b>-0.000931615</b>	3.3e-06										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

# Camera Locations

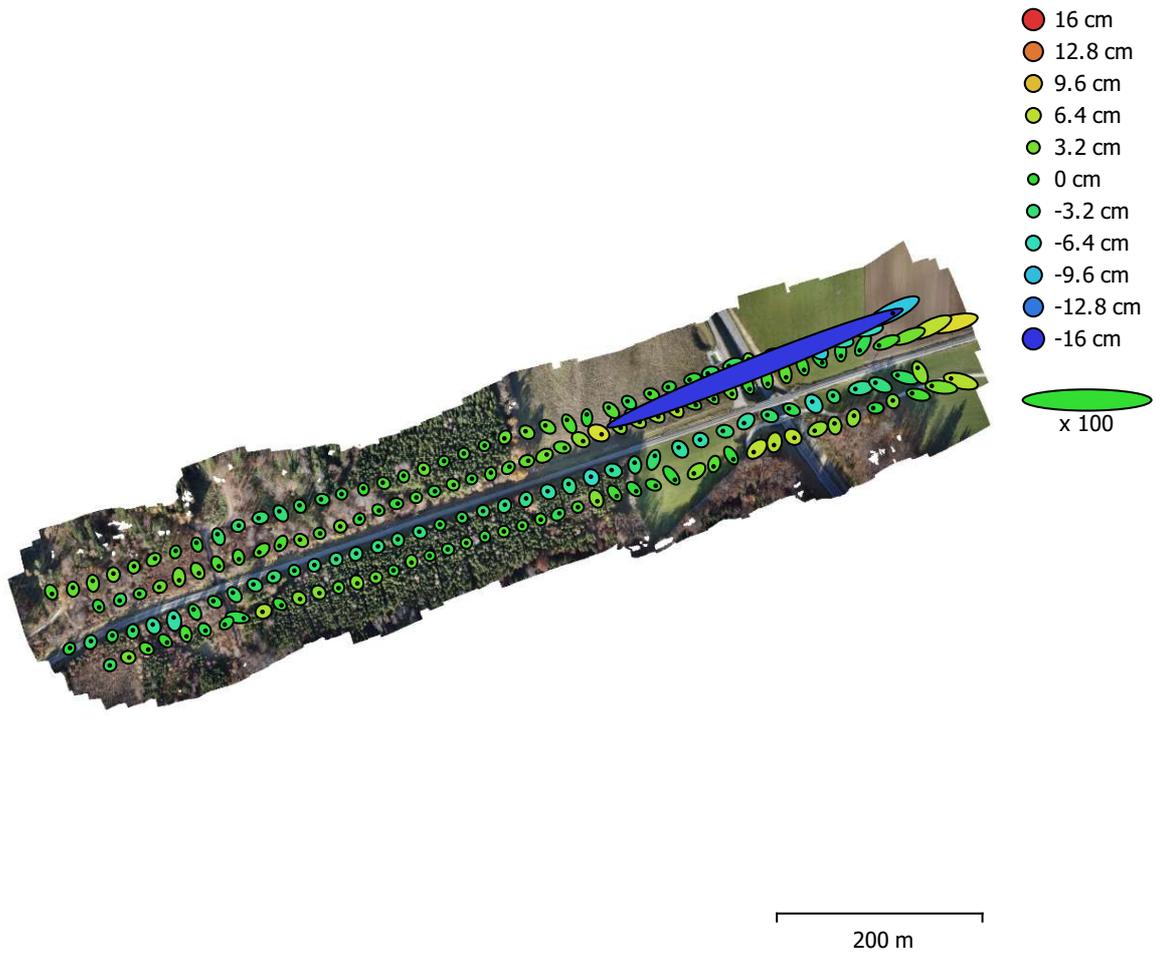


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>XY error (cm)</b>	<b>Total error (cm)</b>
21.4337	9.17854	3.31013	23.3163	23.55

Table 3. Average camera location error.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

# Ground Control Points



Fig. 4. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
5	2.47074	6.17775	23.5691	6.6535	24.4902

Table 4. Check points RMSE.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

<b>Label</b>	<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>Total (cm)</b>	<b>Image (pix)</b>
Point 1	-4.76195	0.478261	-18.0317	18.656	0.612 (8)
Point 2	-0.421647	10.4892	-17.2727	20.2125	0.627 (8)
Point 3	-0.0144688	7.75299	-30.5494	31.5178	0.581 (7)
Point 4	-2.01398	2.12802	-18.8585	19.0847	0.697 (7)
Point 5	-1.90065	3.99167	-29.4128	29.7433	0.821 (6)
<b>Total</b>	<b>2.47074</b>	<b>6.17775</b>	<b>23.5691</b>	<b>24.4902</b>	<b>0.666</b>

Table 5. Check points.  
X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

# Digital Elevation Model

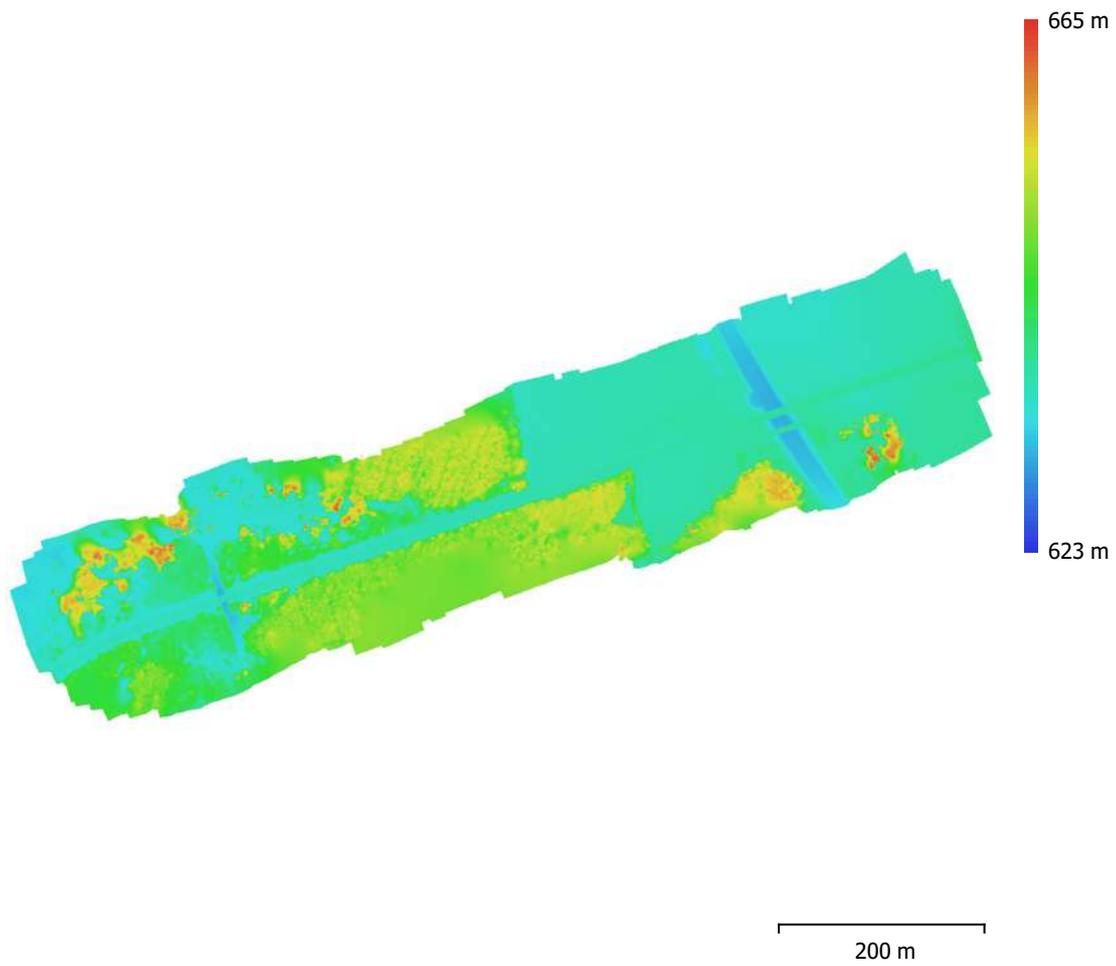


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 4.44 cm/pix  
Point density: 507 points/m<sup>2</sup>

# Processing Parameters

## General

Cameras	173
Aligned cameras	173
Markers	6
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

## Point Cloud

Points	79,751 of 114,713
RMS reprojection error	0.144096 (0.572255 pix)
Max reprojection error	0.365568 (4.20885 pix)
Mean key point size	3.84432 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	3.59957

## Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	5 minutes 42 seconds
Matching memory usage	1.21 GB
Alignment time	33 seconds
Alignment memory usage	60.30 MB
Software version	1.6.5.11249
File size	8.48 MB

## Dense Point Cloud

Points	106,381,685
Point colors	3 bands, uint8

## Depth maps generation parameters

Quality	High
Filtering mode	Mild
Processing time	1 hours 33 minutes

## Dense cloud generation parameters

Processing time	20 minutes 55 seconds
Software version	1.6.5.11249
File size	1.49 GB

## DEM

Size	27,844 x 15,147
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)

## Reconstruction parameters

Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	2 minutes 34 seconds
Memory usage	300.02 MB
Software version	1.6.5.11249
File size	329.26 MB

## Orthomosaic

Size	42,863 x 21,741
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)
Colors	3 bands, uint8

**Reconstruction parameters**

Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Processing time	5 minutes 36 seconds
Memory usage	3.09 GB
Software version	1.6.5.11249
File size	3.91 GB

**System**

Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.6.5 build 11249
OS	Windows 64 bit
RAM	15.93 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz
GPU(s)	None

# 20201118\_UMC\_70\_4

Processing Report  
22 February 2021



# Survey Data

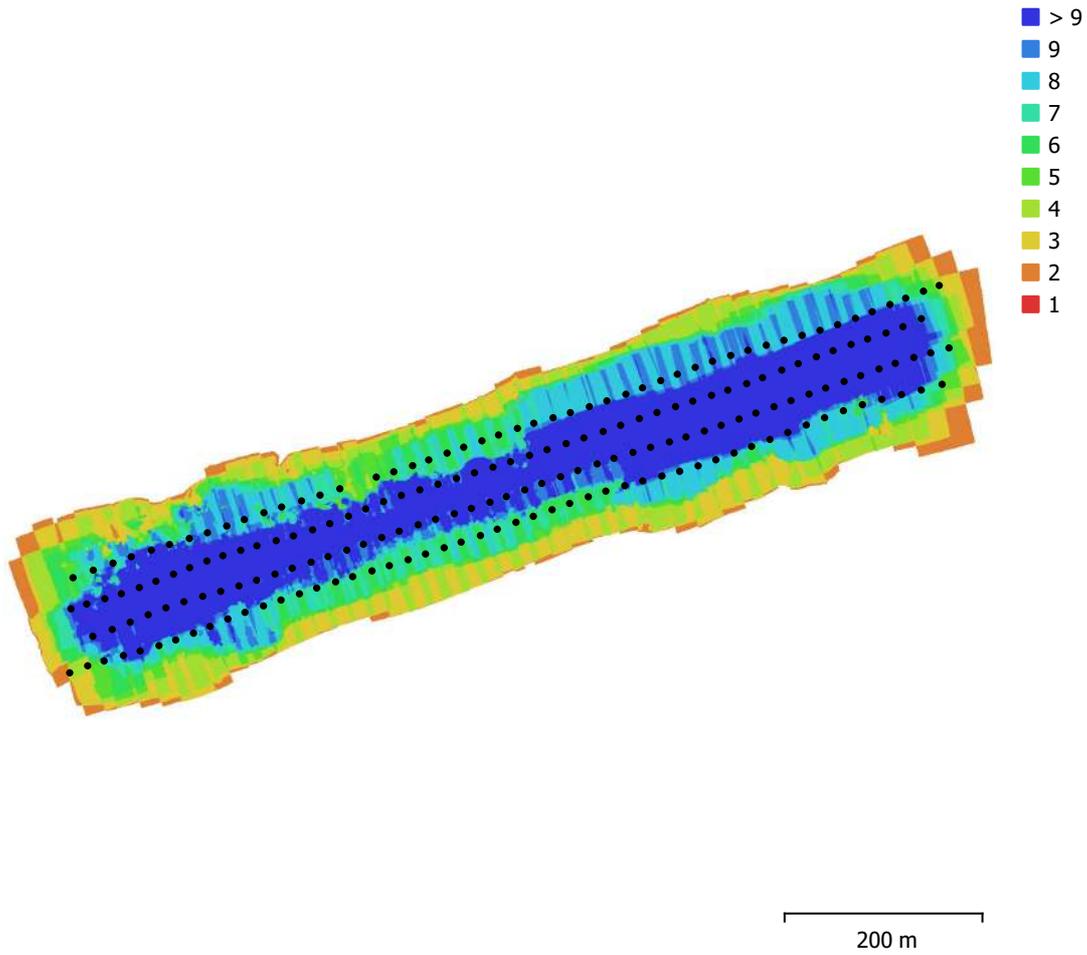


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	196	Camera stations:	195
Flying altitude:	86.3 m	Tie points:	85,903
Ground resolution:	2.11 cm/pix	Projections:	297,245
Coverage area:	0.194 km <sup>2</sup>	Reprojection error:	0.52 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)	5456 x 3632	16 mm	4.4 x 4.4 μm	No

Table 1. Cameras.

# Camera Calibration

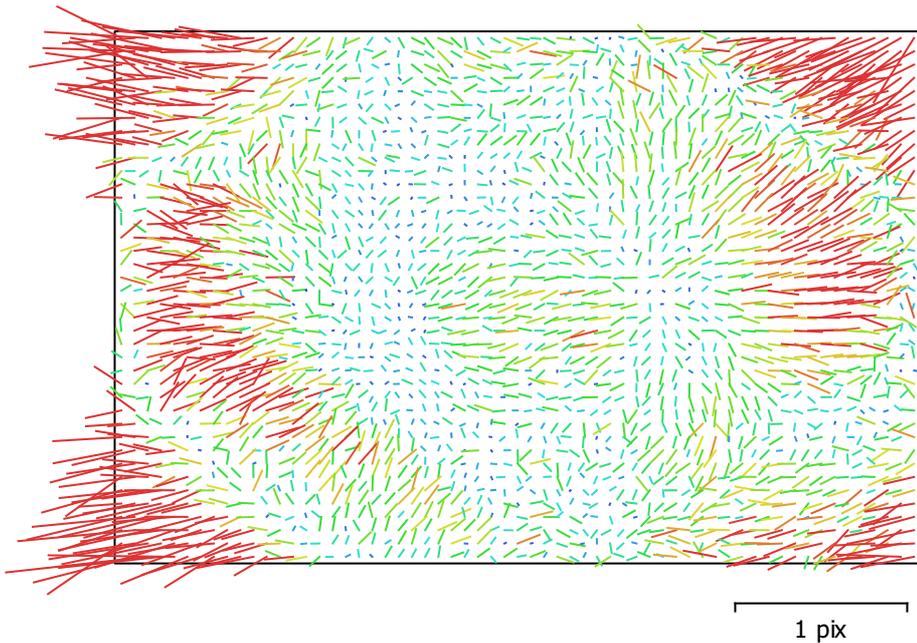


Fig. 2. Image residuals for UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm).

## UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)

196 images

Type  
Frame

Resolution  
**5456 x 3632**

Focal Length  
**16 mm**

Pixel Size  
**4.4 x 4.4  $\mu\text{m}$**

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
<b>F</b>	<b>3736.36</b>	0.14	1.00	0.18	-0.29	-0.17	0.10	-0.20	0.17	-0.03	-0.02	0.01
<b>Cx</b>	<b>-37.3318</b>	0.028		1.00	-0.04	-0.19	0.01	-0.00	-0.02	0.05	0.75	0.02
<b>Cy</b>	<b>-0.275234</b>	0.026			1.00	-0.02	-0.24	0.05	-0.05	0.01	0.00	0.67
<b>B1</b>	<b>-0.744556</b>	0.055				1.00	0.02	-0.02	0.10	-0.09	-0.02	-0.09
<b>B2</b>	<b>0.676367</b>	0.042					1.00	-0.01	-0.00	0.02	0.01	-0.03
<b>K1</b>	<b>-0.0658971</b>	3.7e-05						1.00	-0.96	0.90	0.05	0.00
<b>K2</b>	<b>0.0842816</b>	0.00012							1.00	-0.97	-0.06	-0.02
<b>K3</b>	<b>0.0132655</b>	0.00011								1.00	0.06	0.02
<b>P1</b>	<b>0.00104089</b>	2.7e-06									1.00	0.02
<b>P2</b>	<b>-0.000918538</b>	2.2e-06										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

# Camera Locations

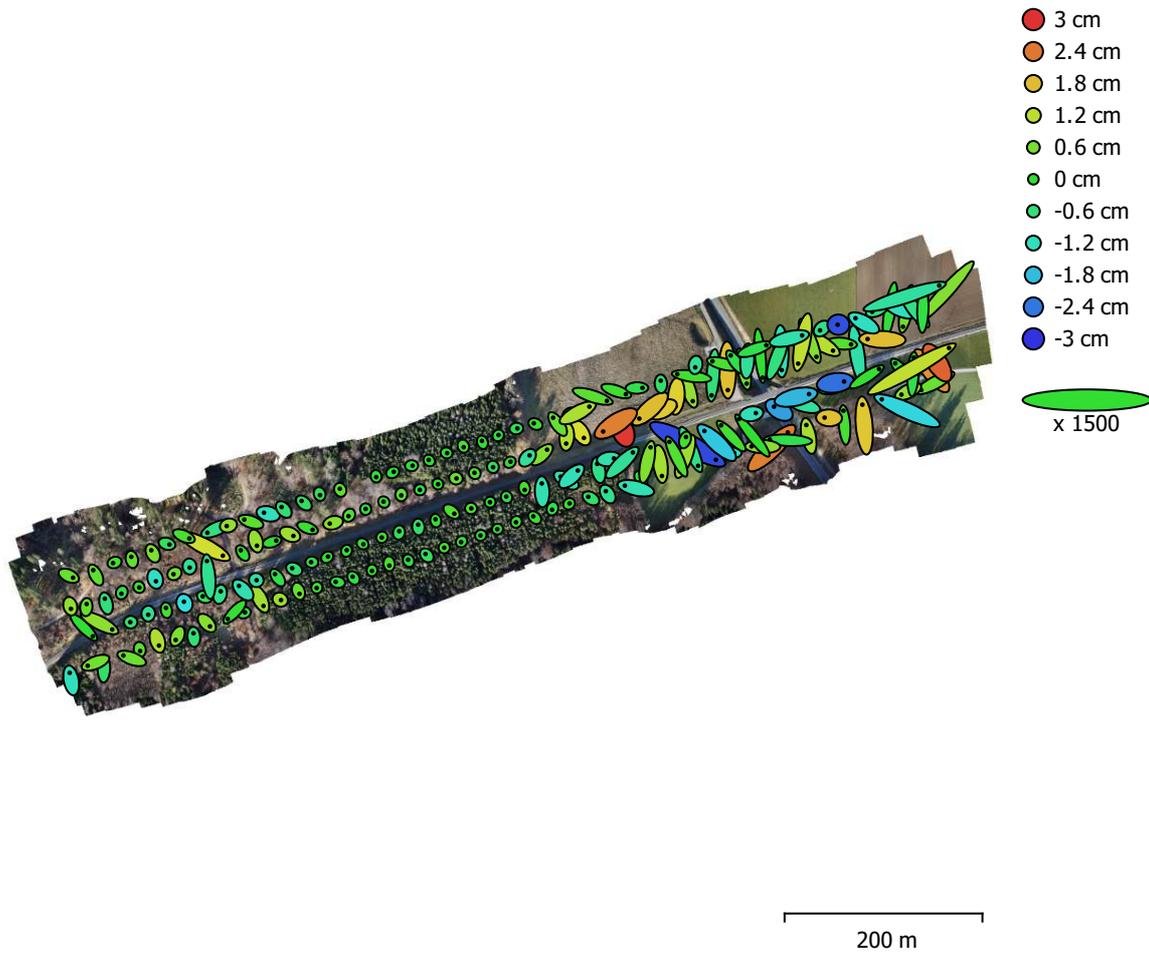


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>XY error (cm)</b>	<b>Total error (cm)</b>
1.01441	1.05942	0.902557	1.46676	1.72221

Table 3. Average camera location error.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

# Ground Control Points

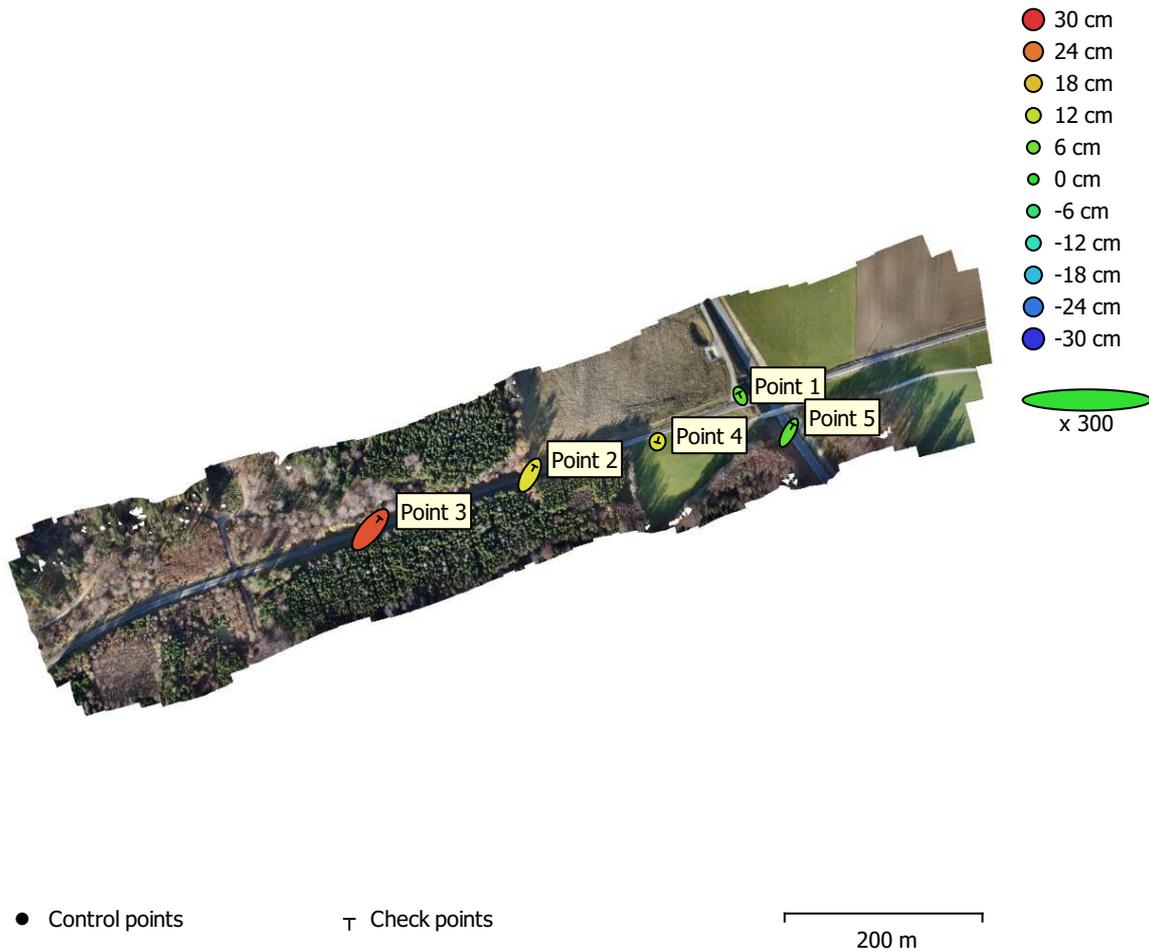


Fig. 4. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape. Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
5	3.64932	5.36174	15.6304	6.48582	16.9226

Table 4. Check points RMSE.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

<b>Label</b>	<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>Total (cm)</b>	<b>Image (pix)</b>
Point 1	-1.09927	2.3012	4.34873	5.04137	0.543 (8)
Point 2	3.40616	6.28315	14.9417	16.563	1.157 (8)
Point 3	6.61003	7.99085	27.2391	29.1464	1.165 (6)
Point 4	-0.156601	-0.606982	14.8898	14.903	0.637 (8)
Point 5	3.17182	5.89456	3.96257	7.77871	0.550 (6)
<b>Total</b>	<b>3.64932</b>	<b>5.36174</b>	<b>15.6304</b>	<b>16.9226</b>	<b>0.854</b>

Table 5. Check points.  
X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

# Digital Elevation Model

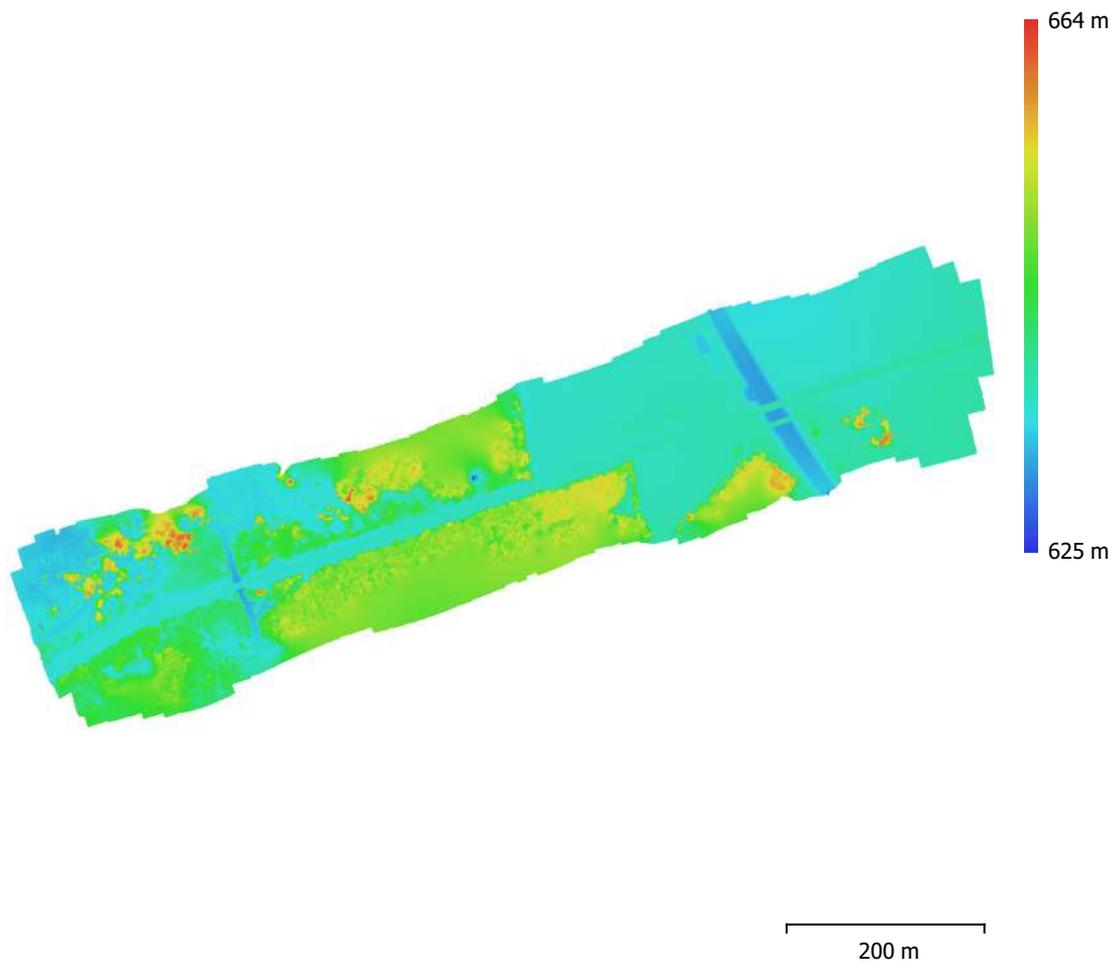


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 4.21 cm/pix  
Point density: 563 points/m<sup>2</sup>

# Processing Parameters

## General

Cameras	196
Aligned cameras	195
Markers	6
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

## Point Cloud

Points	85,903 of 121,925
RMS reprojection error	0.133051 (0.519833 pix)
Max reprojection error	0.329181 (3.44502 pix)
Mean key point size	3.77055 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	3.6662

## Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	15 minutes 16 seconds
Matching memory usage	1.28 GB
Alignment time	2 minutes 28 seconds
Alignment memory usage	86.01 MB
Software version	1.6.5.11249
File size	9.16 MB

## Dense Point Cloud

Points	109,384,648
Point colors	3 bands, uint8

## Depth maps generation parameters

Quality	High
Filtering mode	Mild
Processing time	2 hours 30 minutes

## Dense cloud generation parameters

Processing time	20 minutes 50 seconds
Software version	1.6.5.11249
File size	1.53 GB

## DEM

Size	31,528 x 16,969
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)

## Reconstruction parameters

Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	3 minutes 10 seconds
Memory usage	303.45 MB
Software version	1.6.5.11249
File size	385.33 MB

## Orthomosaic

Size	46,919 x 24,463
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)
Colors	3 bands, uint8

**Reconstruction parameters**

Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Processing time	7 minutes 4 seconds
Memory usage	3.17 GB
Software version	1.6.5.11249
File size	4.41 GB

**System**

Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.6.5 build 11249
OS	Windows 64 bit
RAM	15.93 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz
GPU(s)	None

# 20201118\_RX1\_90\_4

Processing Report  
31 March 2021



# Survey Data

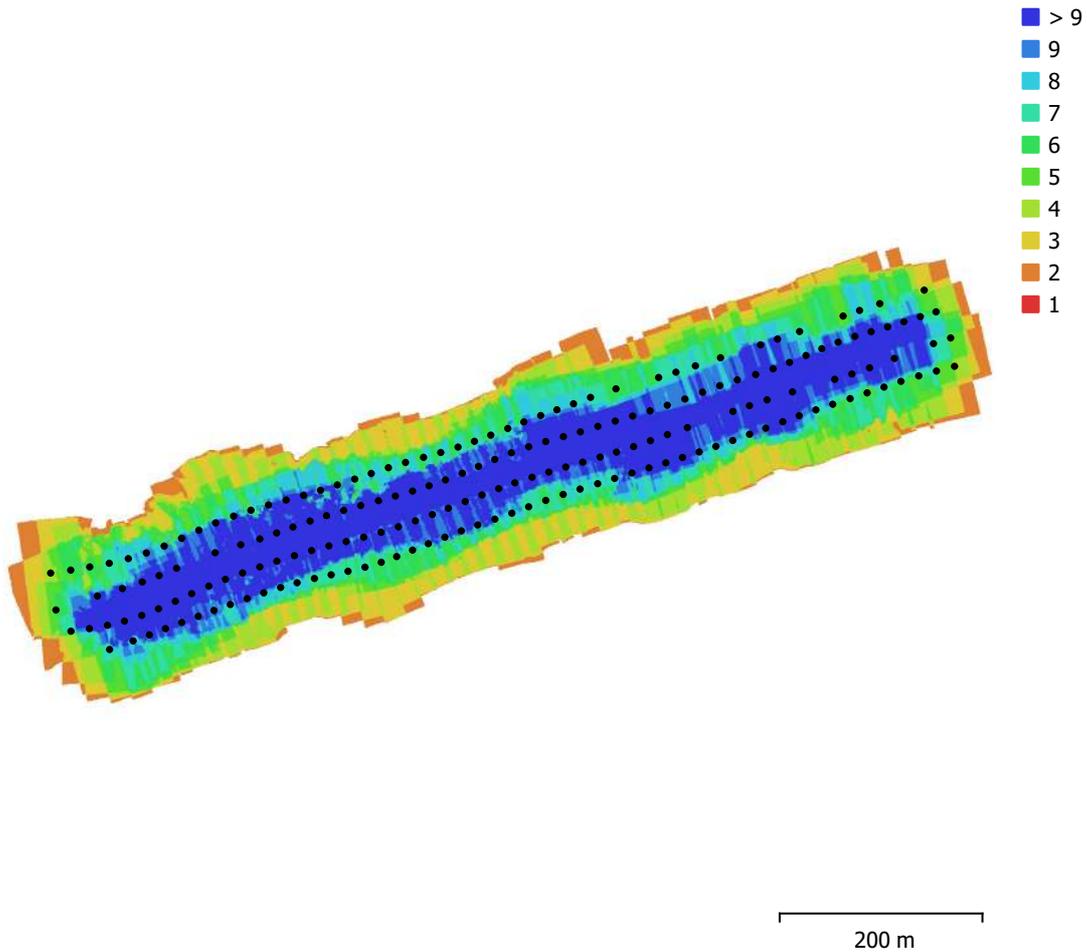


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	191	Camera stations:	191
Flying altitude:	101 m	Tie points:	100,526
Ground resolution:	1.27 cm/pix	Projections:	317,753
Coverage area:	0.174 km <sup>2</sup>	Reprojection error:	0.28 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
DSC-RX1RM2 (35mm)	7952 x 5304	35 mm	4.53 x 4.53 $\mu$ m	No

Table 1. Cameras.

# Camera Calibration

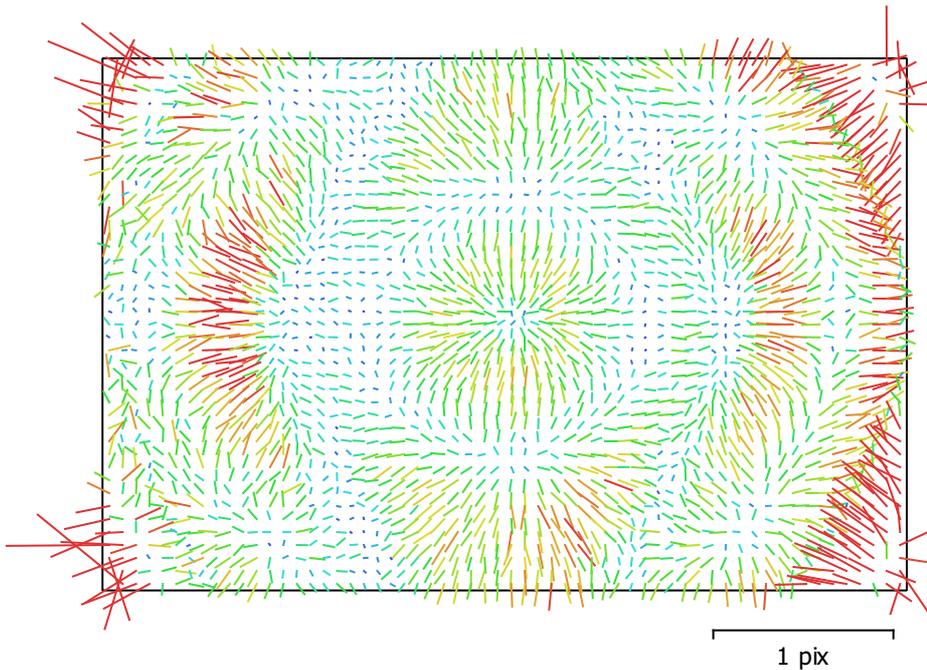


Fig. 2. Image residuals for DSC-RX1RM2 (35mm).

## DSC-RX1RM2 (35mm)

191 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
<b>Frame</b>	<b>7952 x 5304</b>	<b>35 mm</b>	<b>4.53 x 4.53 <math>\mu</math>m</b>

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	K1	K2	K3	K4	P1	P2
<b>F</b>	<b>7531.1</b>	0.17	1.00	0.00	-0.12	-0.11	-0.17	0.16	-0.23	0.29	-0.04	0.03
<b>Cx</b>	<b>16.8629</b>	0.036		1.00	0.00	-0.04	-0.01	0.04	-0.06	0.07	0.63	-0.01
<b>Cy</b>	<b>12.2793</b>	0.033			1.00	-0.04	0.02	-0.02	0.03	-0.03	0.00	0.62
<b>B1</b>	<b>-2.06786</b>	0.053				1.00	0.01	0.01	-0.01	0.02	-0.01	-0.03
<b>K1</b>	<b>-0.126051</b>	6.3e-05					1.00	-0.97	0.92	-0.87	0.03	-0.01
<b>K2</b>	<b>0.596797</b>	0.00063						1.00	-0.98	0.95	-0.01	0.00
<b>K3</b>	<b>-2.85576</b>	0.0024							1.00	-0.99	-0.01	-0.00
<b>K4</b>	<b>4.13452</b>	0.0032								1.00	0.02	0.01
<b>P1</b>	<b>-0.000174065</b>	1.2e-06									1.00	-0.00
<b>P2</b>	<b>0.000131942</b>	1.1e-06										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

# Camera Locations

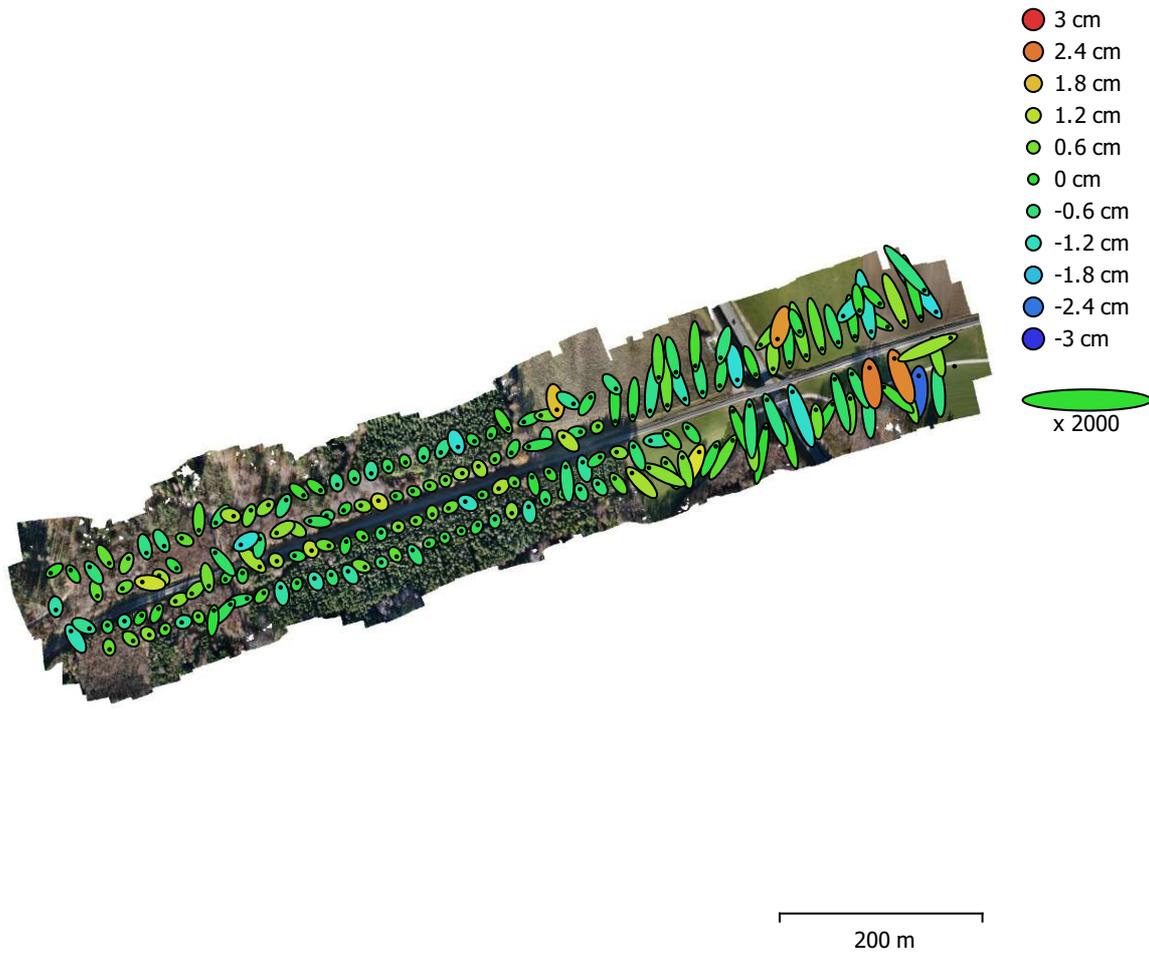


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>XY error (cm)</b>	<b>Total error (cm)</b>
0.487791	1.00832	0.718308	1.12011	1.33065

Table 3. Average camera location error.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

# Ground Control Points

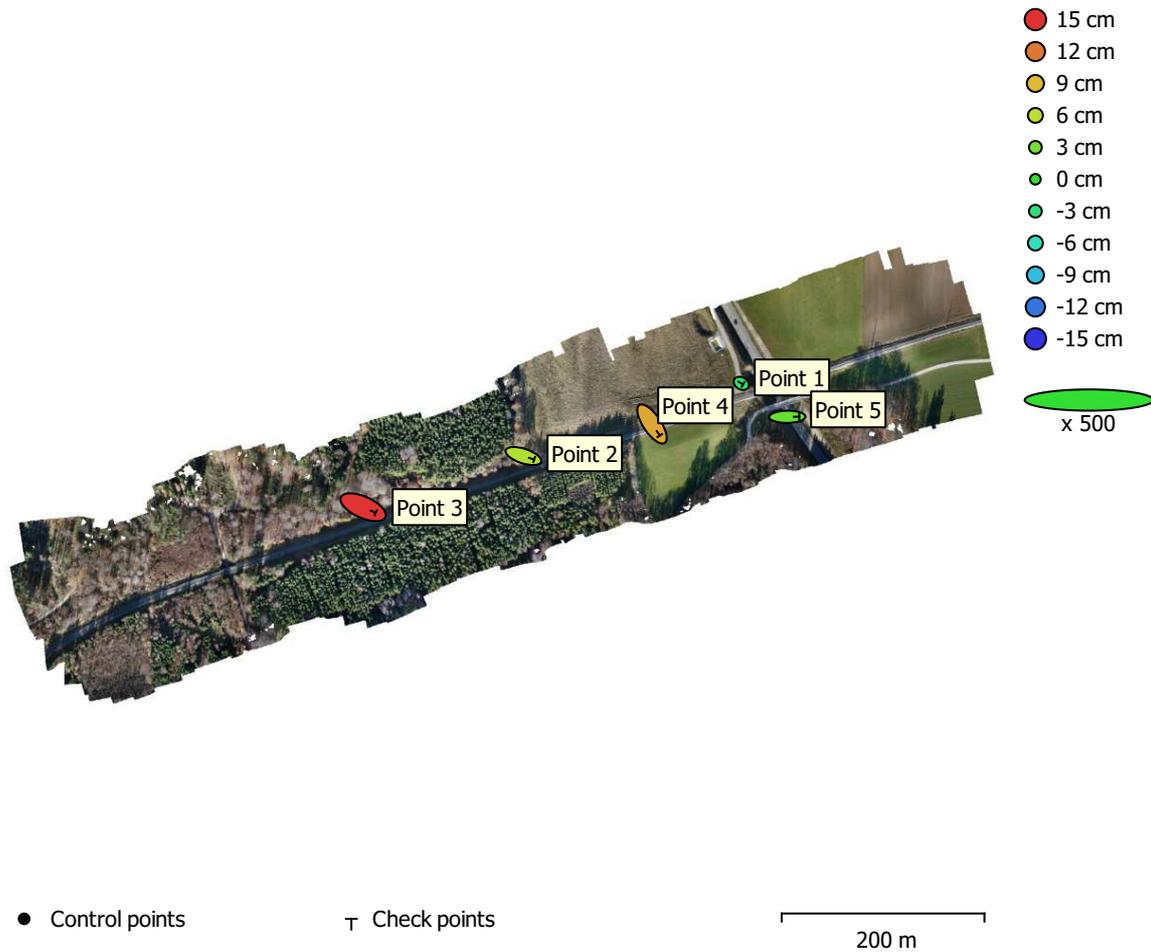


Fig. 4. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
5	3.86495	2.38062	8.4993	4.5393	9.63553

Table 4. Check points RMSE.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

<b>Label</b>	<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>Total (cm)</b>	<b>Image (pix)</b>
Point 1	0.70412	-0.421077	-2.0189	2.17923	0.230 (6)
Point 2	4.24172	-1.40806	5.52605	7.10718	0.235 (7)
Point 3	4.94856	-2.24163	14.9254	15.8833	0.368 (6)
Point 4	3.06041	-4.5988	9.93601	11.3684	0.450 (6)
Point 5	4.72725	0.0549027	2.25544	5.23802	0.567 (5)
<b>Total</b>	<b>3.86495</b>	<b>2.38062</b>	<b>8.4993</b>	<b>9.63553</b>	<b>0.380</b>

Table 5. Check points.  
X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

# Digital Elevation Model

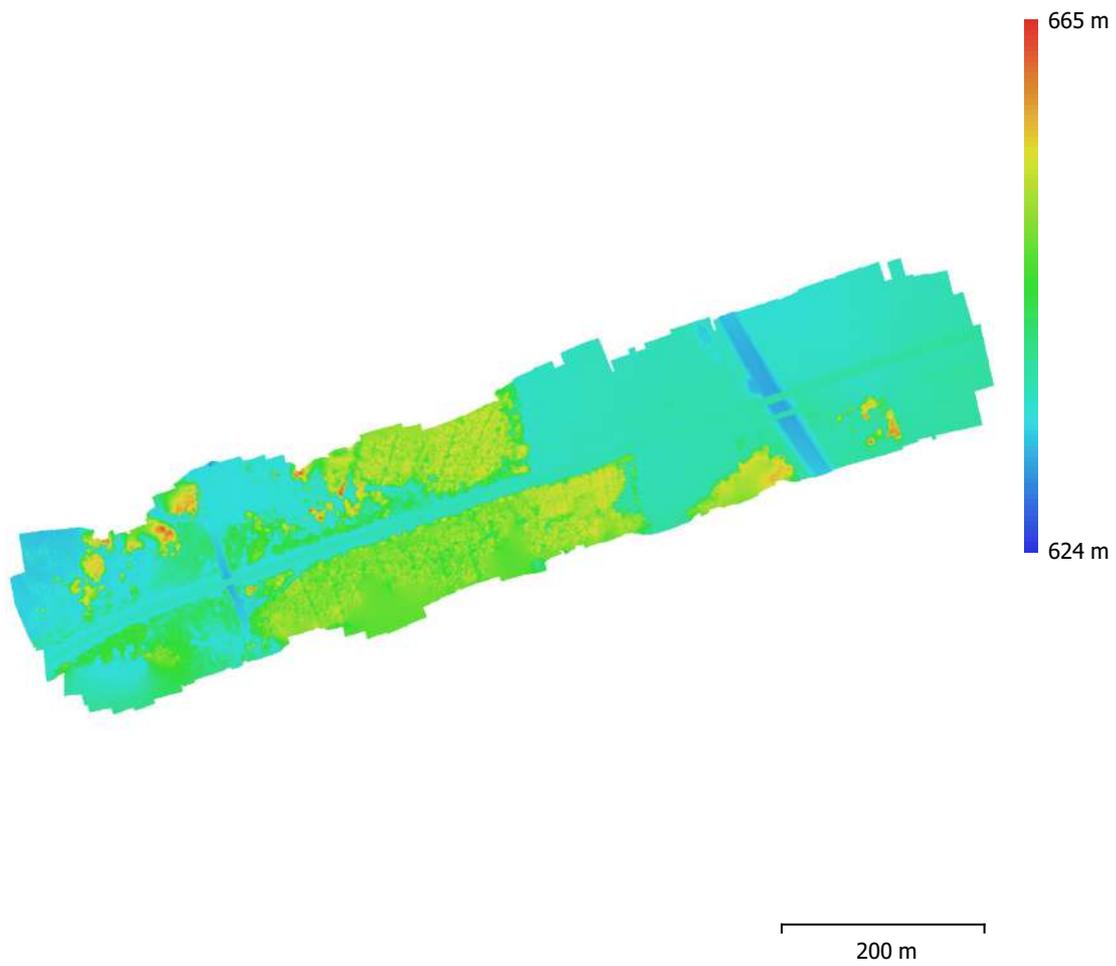


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 2.55 cm/pix  
Point density: 0.154 points/cm<sup>2</sup>

# Processing Parameters

## General

Cameras	191
Aligned cameras	191
Markers	5
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

## Point Cloud

Points	100,526 of 136,687
RMS reprojection error	0.101708 (0.27999 pix)
Max reprojection error	0.249815 (2.08438 pix)
Mean key point size	2.69628 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	3.35384

## Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	9 minutes 10 seconds
Matching memory usage	1.97 GB
Alignment time	34 seconds
Alignment memory usage	95.51 MB
Software version	1.6.5.11249
File size	9.71 MB

## Dense Point Cloud

Points	301,479,369
Point colors	3 bands, uint8

## Depth maps generation parameters

Quality	High
Filtering mode	Mild
Processing time	3 hours 1 minutes

## Dense cloud generation parameters

Processing time	44 minutes 29 seconds
Software version	1.6.5.11249
File size	4.21 GB

## DEM

Size	50,040 x 26,337
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)

## Reconstruction parameters

Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	5 minutes 44 seconds
Memory usage	421.12 MB
Software version	1.6.5.11249
File size	920.17 MB

## Orthomosaic

Size	75,859 x 37,445
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)
Colors	3 bands, uint8

**Reconstruction parameters**

Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Processing time	19 minutes 54 seconds
Memory usage	5.67 GB
Software version	1.6.5.11249
File size	11.15 GB

**System**

Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.6.5 build 11249
OS	Windows 64 bit
RAM	15.93 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz
GPU(s)	None

# 20201118\_UMC\_90\_2\_nr

Processing Report  
07 February 2021



# Survey Data

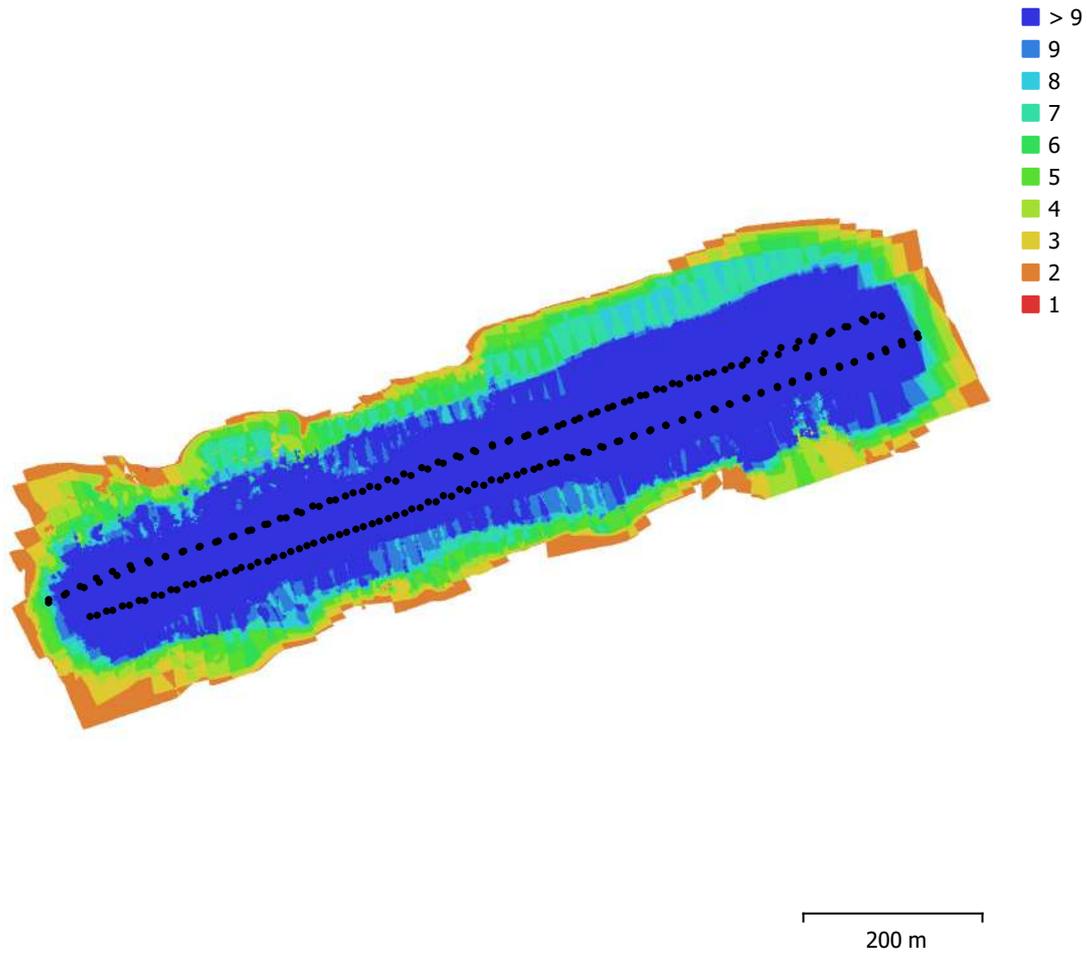


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	206	Camera stations:	206
Flying altitude:	104 m	Tie points:	105,217
Ground resolution:	2.65 cm/pix	Projections:	350,183
Coverage area:	0.28 km <sup>2</sup>	Reprojection error:	0.465 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)	5456 x 3632	16 mm	4.4 x 4.4 $\mu$ m	No
UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)	5456 x 3632	16 mm	4.4 x 4.4 $\mu$ m	No

Table 1. Cameras.

# Camera Calibration

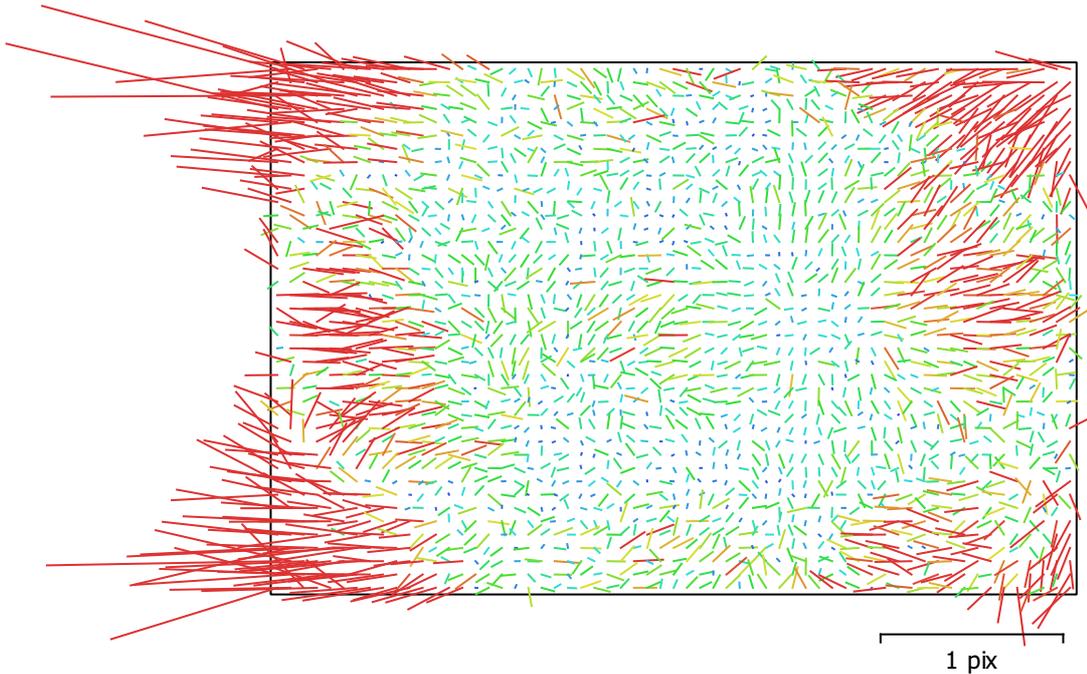


Fig. 2. Image residuals for UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm).

## UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)

103 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
<b>Frame</b>	<b>5456 x 3632</b>	<b>16 mm</b>	<b>4.4 x 4.4 <math>\mu</math>m</b>

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
<b>F</b>	<b>3738.7</b>	0.21	1.00	0.37	-0.15	-0.41	0.02	-0.19	0.21	-0.06	0.01	0.05
<b>Cx</b>	<b>-35.0275</b>	0.047		1.00	-0.07	-0.43	0.08	-0.09	0.11	-0.03	0.70	0.05
<b>Cy</b>	<b>0.695212</b>	0.044			1.00	-0.06	-0.50	0.03	-0.03	0.01	-0.14	0.71
<b>B1</b>	<b>-3.28945</b>	0.097				1.00	-0.02	0.01	-0.00	-0.03	-0.04	-0.21
<b>B2</b>	<b>-0.419919</b>	0.096					1.00	-0.02	0.01	-0.00	0.18	-0.03
<b>K1</b>	<b>-0.0661561</b>	5.1e-05						1.00	-0.95	0.89	-0.04	-0.01
<b>K2</b>	<b>0.0844014</b>	0.00017							1.00	-0.97	-0.00	-0.00
<b>K3</b>	<b>0.0142673</b>	0.00016								1.00	0.02	0.00
<b>P1</b>	<b>0.00112068</b>	4.1e-06									1.00	-0.05
<b>P2</b>	<b>-0.000859183</b>	3.7e-06										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

# Camera Calibration

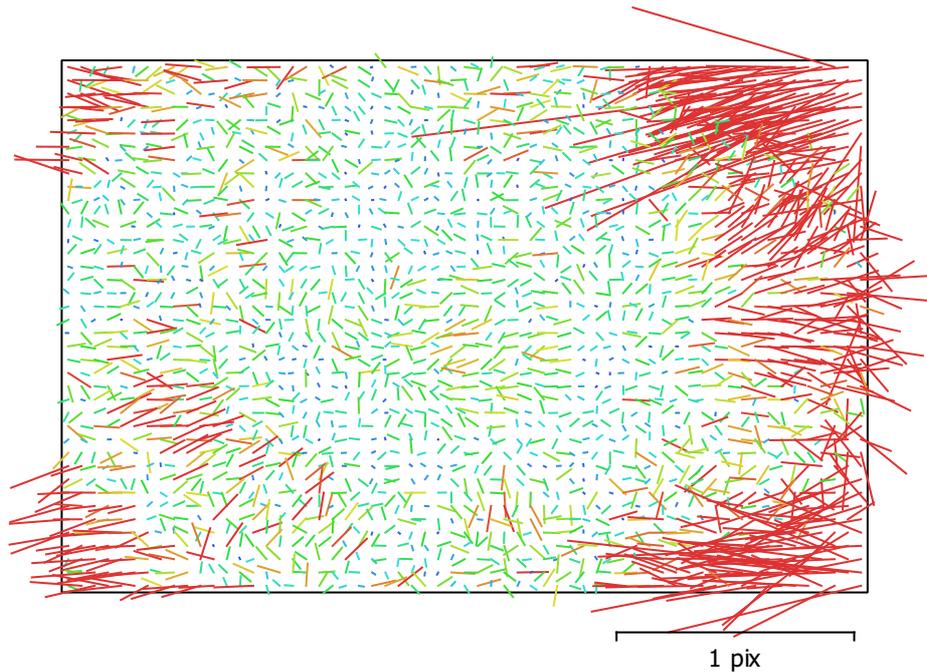


Fig. 3. Image residuals for UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm).

## UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)

103 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
<b>Frame</b>	<b>5456 x 3632</b>	<b>16 mm</b>	<b>4.4 x 4.4 μm</b>

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
<b>F</b>	<b>3726.44</b>	0.16	1.00	0.77	-0.16	-0.57	0.02	-0.17	0.18	-0.12	0.04	-0.01
<b>Cx</b>	<b>-44.1815</b>	0.11		1.00	-0.09	-0.19	0.01	-0.08	0.08	-0.03	0.33	0.05
<b>Cy</b>	<b>1.58704</b>	0.059			1.00	0.14	0.25	-0.01	-0.00	-0.01	0.02	0.86
<b>B1</b>	<b>0.300867</b>	0.091				1.00	0.02	0.05	-0.03	0.01	0.05	0.06
<b>B2</b>	<b>-2.75885</b>	0.086					1.00	0.01	-0.01	0.01	-0.01	0.01
<b>K1</b>	<b>-0.0652837</b>	5.2e-05						1.00	-0.95	0.89	0.04	-0.02
<b>K2</b>	<b>0.0838004</b>	0.00017							1.00	-0.98	0.02	0.02
<b>K3</b>	<b>0.00990386</b>	0.00017								1.00	-0.01	-0.02
<b>P1</b>	<b>0.000906359</b>	4.8e-06									1.00	0.02
<b>P2</b>	<b>-0.000868986</b>	5.9e-06										1.00

Table 3. Calibration coefficients and correlation matrix.

# Camera Locations

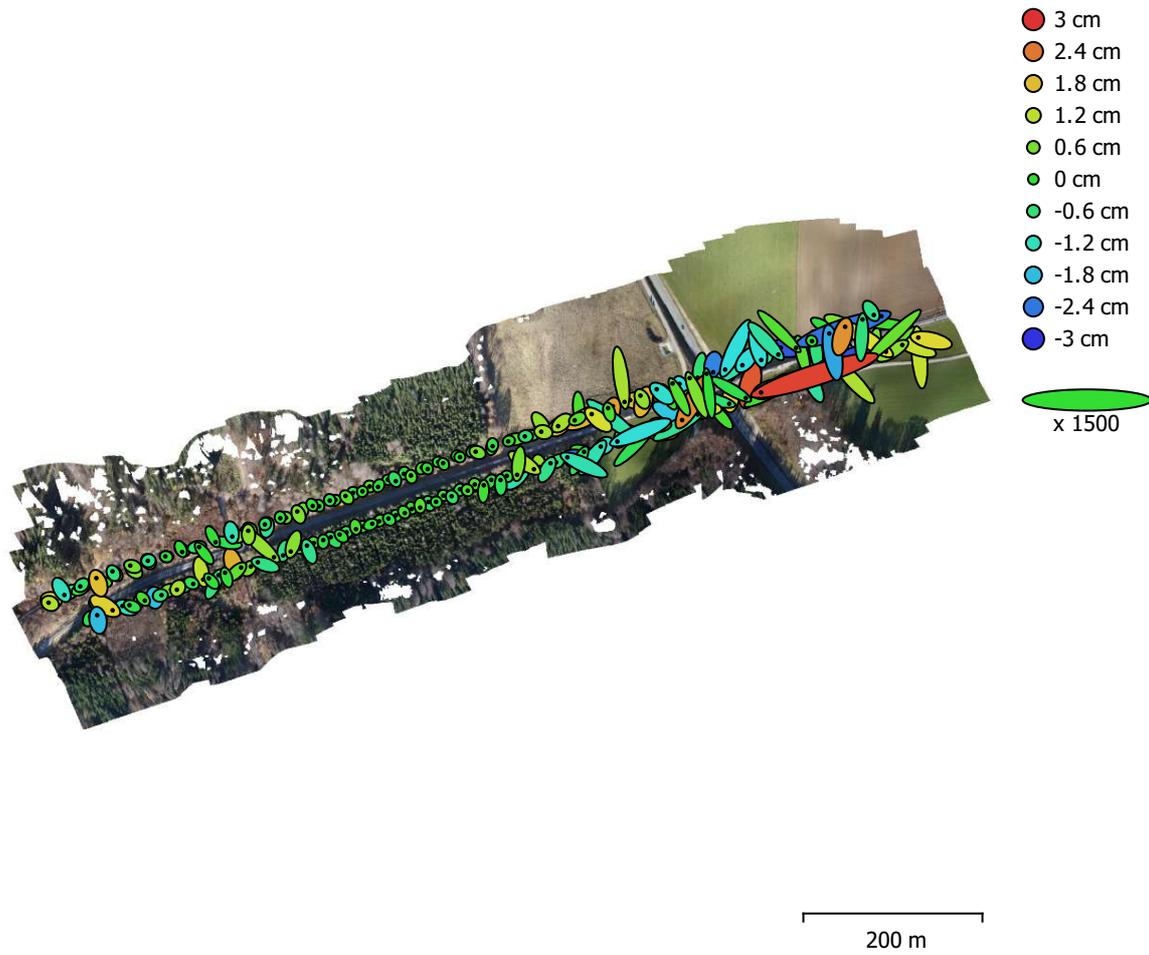


Fig. 4. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>XY error (cm)</b>	<b>Total error (cm)</b>
1.20532	1.0595	0.990936	1.60479	1.88608

Table 4. Average camera location error.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

# Ground Control Points

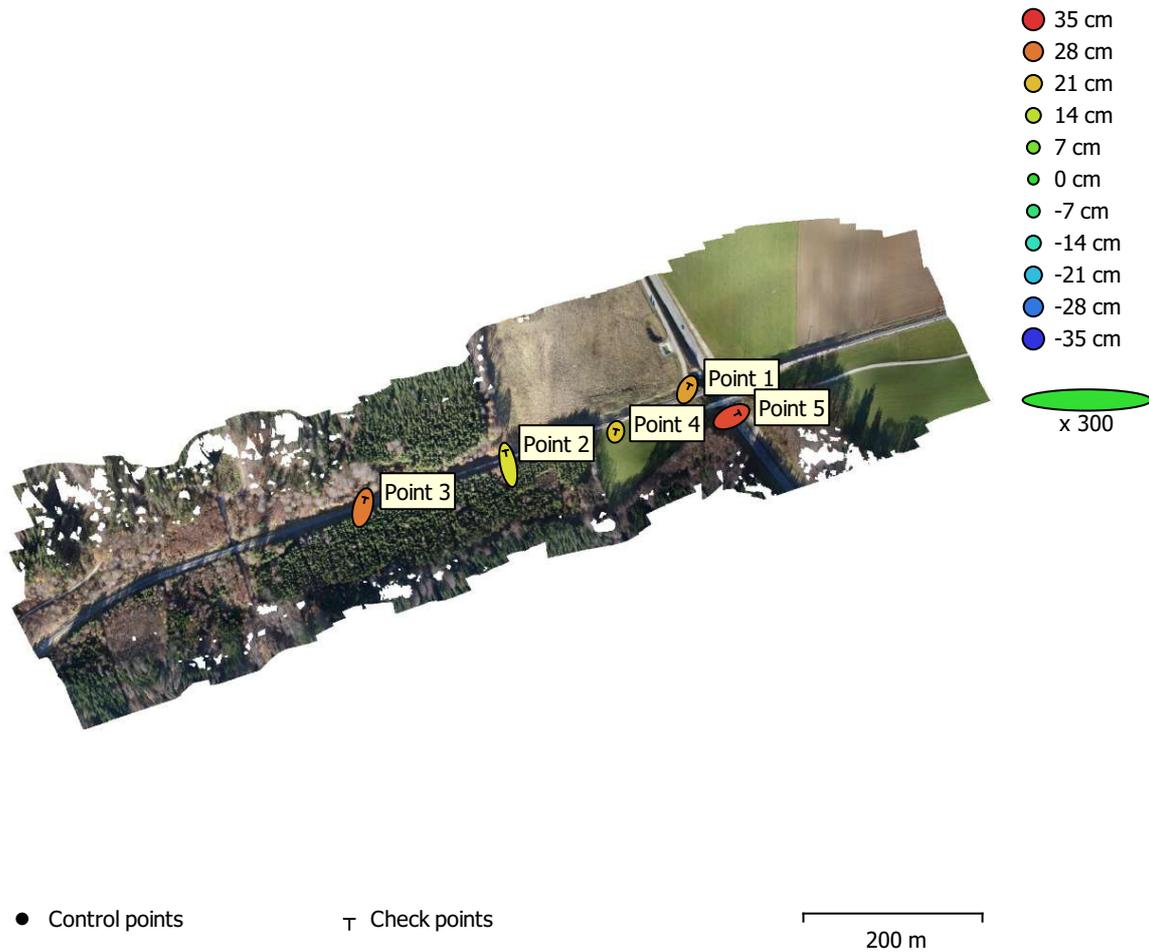


Fig. 5. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
5	3.1072	6.34461	24.9091	7.06462	25.8916

Table 5. Check points RMSE.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

<b>Label</b>	<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>Total (cm)</b>	<b>Image (pix)</b>
Point 1	1.90139	4.01828	23.9302	24.3396	1.442 (7)
Point 2	-2.22216	10.7478	17.1958	20.3997	2.745 (7)
Point 3	1.91278	7.54742	27.7335	28.8057	2.410 (7)
Point 4	0.399848	1.84819	20.2689	20.3569	2.762 (7)
Point 5	5.9918	3.03815	32.4654	33.1532	2.857 (7)
<b>Total</b>	<b>3.1072</b>	<b>6.34461</b>	<b>24.9091</b>	<b>25.8916</b>	<b>2.498</b>

Table 6. Check points.  
X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

# Digital Elevation Model

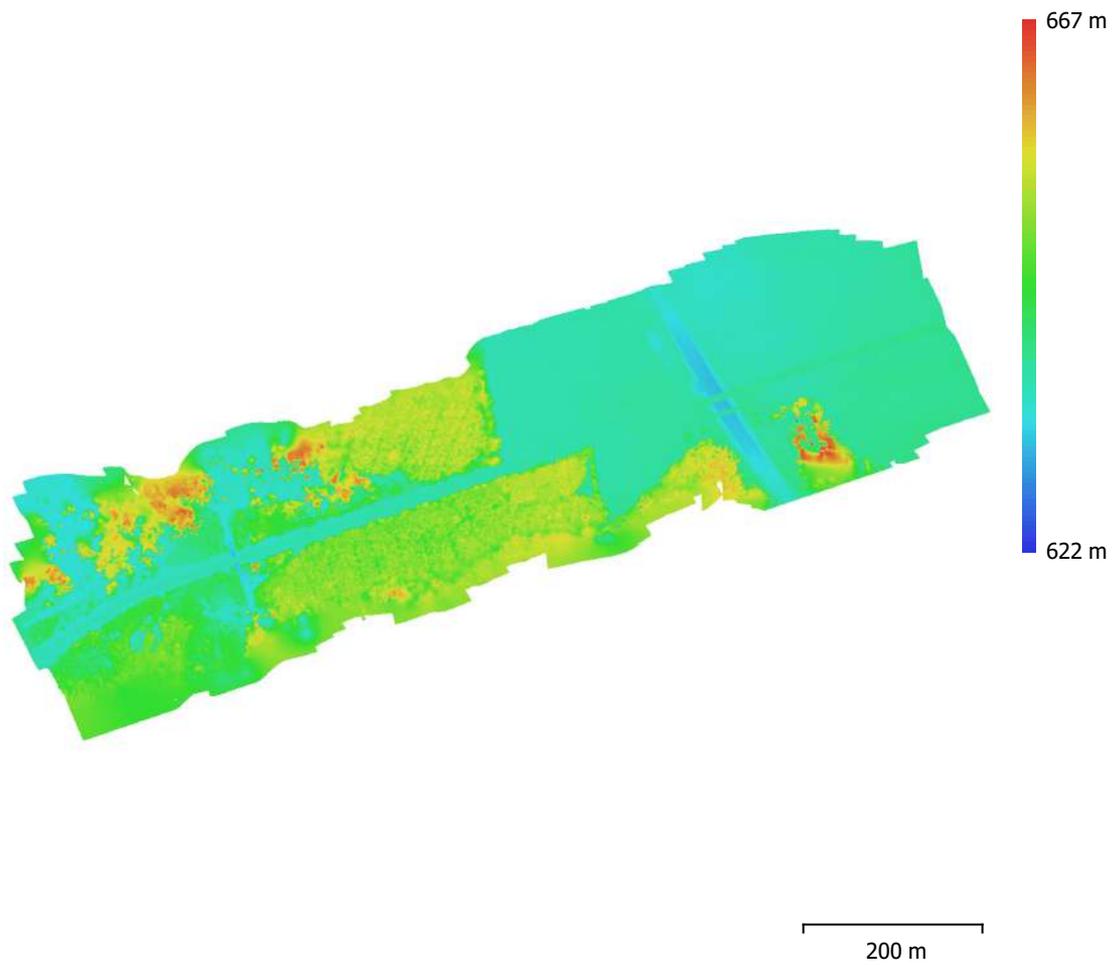


Fig. 6. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 5.31 cm/pix  
Point density: 355 points/m<sup>2</sup>

# Processing Parameters

## General

Cameras	206
Aligned cameras	206
Markers	5
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

## Point Cloud

Points	105,217 of 156,796
RMS reprojection error	0.136869 (0.465022 pix)
Max reprojection error	0.540786 (3.81153 pix)
Mean key point size	3.3426 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	3.30043

## Optimization parameters

Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	1 seconds
File size	10.78 MB

## Dense Point Cloud

Points	145,155,796
Point colors	3 bands, uint8

## Depth maps generation parameters

Quality	High
Filtering mode	Mild
Processing time	1 hours 28 minutes
Memory usage	1.30 GB

## Dense cloud generation parameters

Processing time	28 minutes 52 seconds
Memory usage	6.35 GB
Software version	1.6.5.11249
File size	2.03 GB

## DEM

Size	26,482 x 14,416
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)

## Reconstruction parameters

Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	2 minutes 50 seconds
Memory usage	308.68 MB
Software version	1.6.5.11249
File size	357.31 MB

## Orthomosaic

Size	41,137 x 22,613
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)
Colors	3 bands, uint8

## Reconstruction parameters

Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes

Processing time	7 minutes 15 seconds
Memory usage	3.79 GB
Software version	1.6.5.11249
File size	4.60 GB

**System**

Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.6.5 build 11249
OS	Windows 64 bit
RAM	15.93 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz
GPU(s)	None

# 20201118\_UMC\_90\_2\_nrl

Processing Report  
07 February 2021



# Survey Data

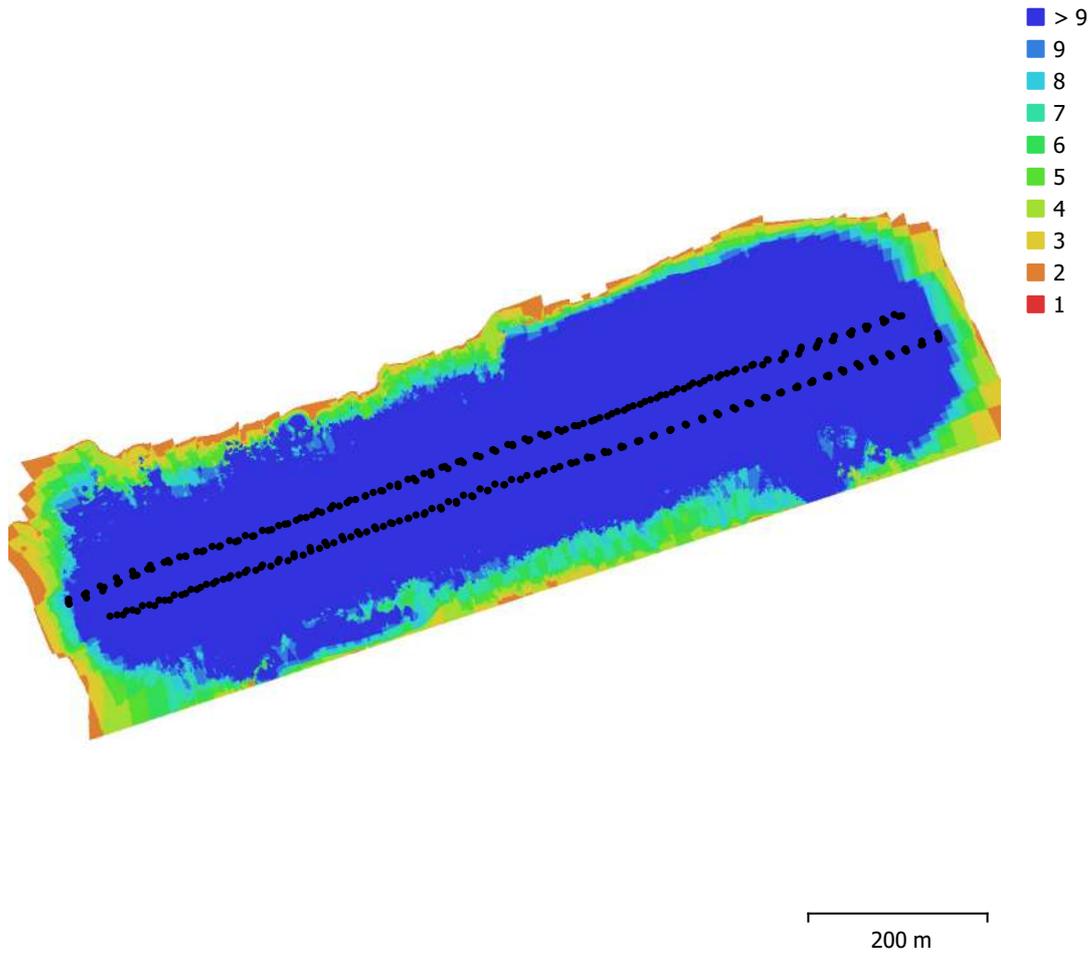


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	310	Camera stations:	310
Flying altitude:	104 m	Tie points:	175,188
Ground resolution:	2.67 cm/pix	Projections:	560,208
Coverage area:	0.323 km <sup>2</sup>	Reprojection error:	0.475 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)	5456 x 3632	16 mm	4.4 x 4.4 μm	No
UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)	5456 x 3632	16 mm	4.4 x 4.4 μm	No
UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)	5456 x 3632	16 mm	4.4 x 4.4 μm	No

Table 1. Cameras.

# Camera Calibration

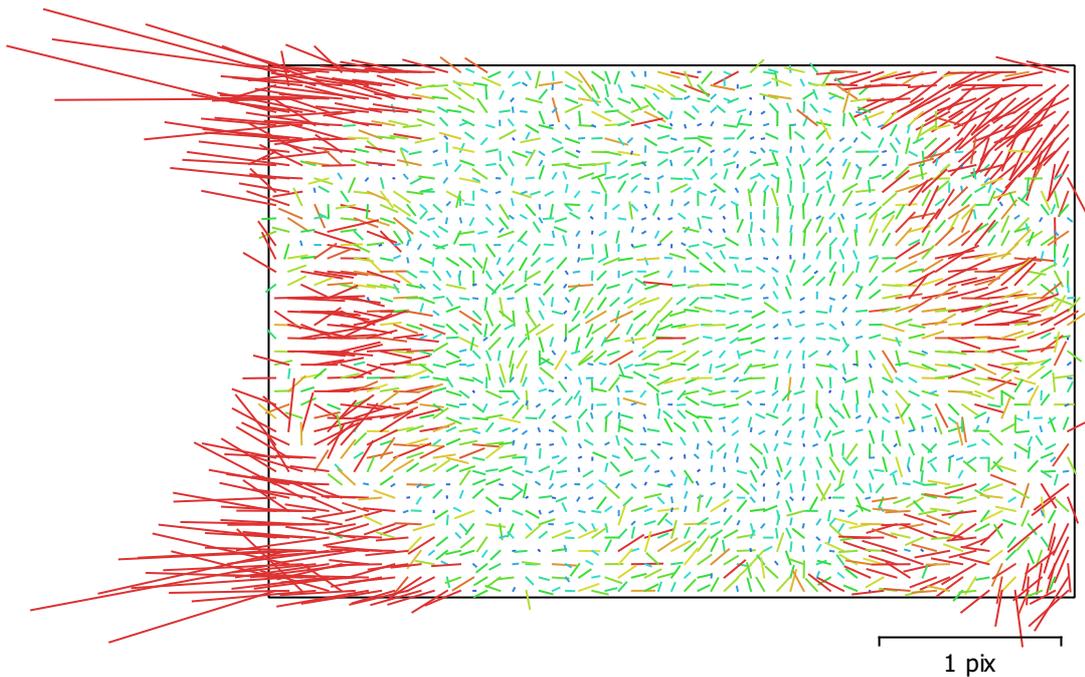


Fig. 2. Image residuals for UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm).

## UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)

103 images

Type  
Frame

Resolution  
**5456 x 3632**

Focal Length  
**16 mm**

Pixel Size  
**4.4 x 4.4  $\mu$ m**

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	K1	K2	K3	P1	P2
<b>F</b>	<b>3738.71</b>	0.2	1.00	0.37	-0.16	-0.41	-0.19	0.21	-0.06	0.00	0.05
<b>Cx</b>	<b>-35.028</b>	0.046		1.00	-0.03	-0.43	-0.08	0.11	-0.03	0.70	0.05
<b>Cy</b>	<b>0.597737</b>	0.037			1.00	-0.09	0.02	-0.03	0.01	-0.05	0.80
<b>B1</b>	<b>-3.26074</b>	0.094				1.00	0.01	0.00	-0.03	-0.04	-0.22
<b>K1</b>	<b>-0.0661608</b>	4.9e-05					1.00	-0.95	0.89	-0.04	-0.01
<b>K2</b>	<b>0.0844149</b>	0.00017						1.00	-0.97	-0.00	-0.00
<b>K3</b>	<b>0.014247</b>	0.00016							1.00	0.02	-0.00
<b>P1</b>	<b>0.00112336</b>	4e-06								1.00	-0.05
<b>P2</b>	<b>-0.000859961</b>	3.7e-06									1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

# Camera Calibration

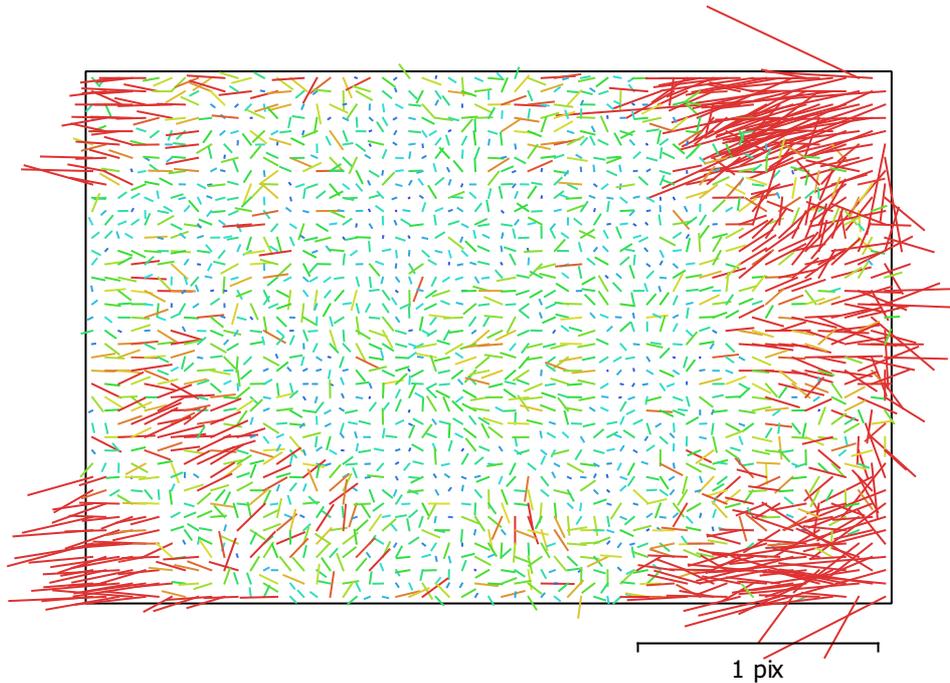


Fig. 3. Image residuals for UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm).

## UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)

103 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
<b>Frame</b>	<b>5456 x 3632</b>	<b>16 mm</b>	<b>4.4 x 4.4 <math>\mu\text{m}</math></b>

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
<b>F</b>	<b>3724.75</b>	0.15	1.00	0.74	-0.14	-0.59	0.03	-0.14	0.15	-0.08	0.03	-0.01
<b>Cx</b>	<b>-45.5874</b>	0.1		1.00	-0.08	-0.19	0.02	-0.05	0.03	0.03	0.35	0.05
<b>Cy</b>	<b>1.84783</b>	0.057			1.00	0.13	0.24	-0.01	0.00	-0.01	0.03	0.86
<b>B1</b>	<b>0.582065</b>	0.092				1.00	0.02	0.05	-0.03	0.01	0.05	0.05
<b>B2</b>	<b>-2.6096</b>	0.086					1.00	0.00	-0.01	0.01	-0.01	-0.00
<b>K1</b>	<b>-0.0648773</b>	5e-05						1.00	-0.95	0.89	0.06	-0.02
<b>K2</b>	<b>0.0819934</b>	0.00016							1.00	-0.98	-0.02	0.01
<b>K3</b>	<b>0.0121446</b>	0.00015								1.00	0.02	-0.01
<b>P1</b>	<b>0.00090839</b>	4.8e-06									1.00	0.03
<b>P2</b>	<b>-0.000853763</b>	5.9e-06										1.00

Table 3. Calibration coefficients and correlation matrix.

# Camera Calibration

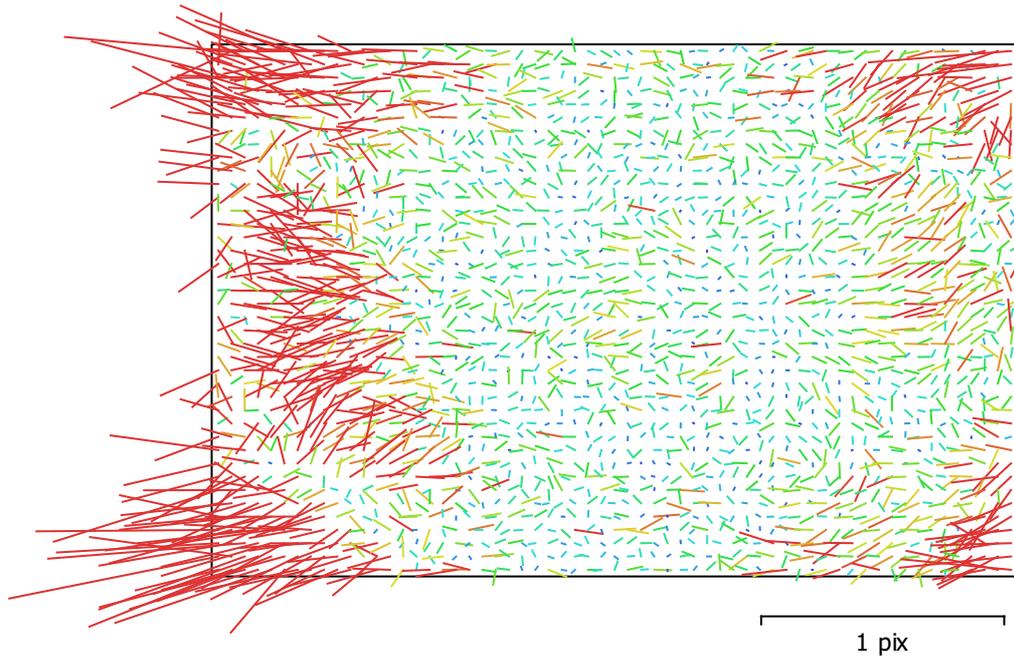


Fig. 4. Image residuals for UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm).

## UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)

104 images

Type  
Frame

Resolution  
5456 x 3632

Focal Length  
16 mm

Pixel Size  
4.4 x 4.4  $\mu\text{m}$

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
<b>F</b>	<b>3738.79</b>	0.2	1.00	-0.31	-0.10	-0.53	-0.02	-0.21	0.25	-0.13	-0.20	0.09
<b>Cx</b>	<b>-46.9821</b>	0.084		1.00	0.08	-0.18	-0.05	0.01	-0.03	0.02	0.41	-0.02
<b>Cy</b>	<b>2.25372</b>	0.074			1.00	0.03	-0.59	-0.00	0.01	-0.02	-0.05	0.58
<b>B1</b>	<b>5.04385</b>	0.11				1.00	0.02	0.00	0.00	-0.02	0.03	-0.12
<b>B2</b>	<b>0.894877</b>	0.098					1.00	0.04	-0.03	0.02	0.03	0.12
<b>K1</b>	<b>-0.0656382</b>	5.2e-05						1.00	-0.95	0.89	-0.01	0.01
<b>K2</b>	<b>0.0851149</b>	0.00016							1.00	-0.97	-0.05	0.01
<b>K3</b>	<b>0.0124418</b>	0.00015								1.00	0.04	-0.01
<b>P1</b>	<b>0.00103577</b>	5.2e-06									1.00	-0.04
<b>P2</b>	<b>-0.000564353</b>	6.6e-06										1.00

Table 4. Calibration coefficients and correlation matrix.

# Camera Locations

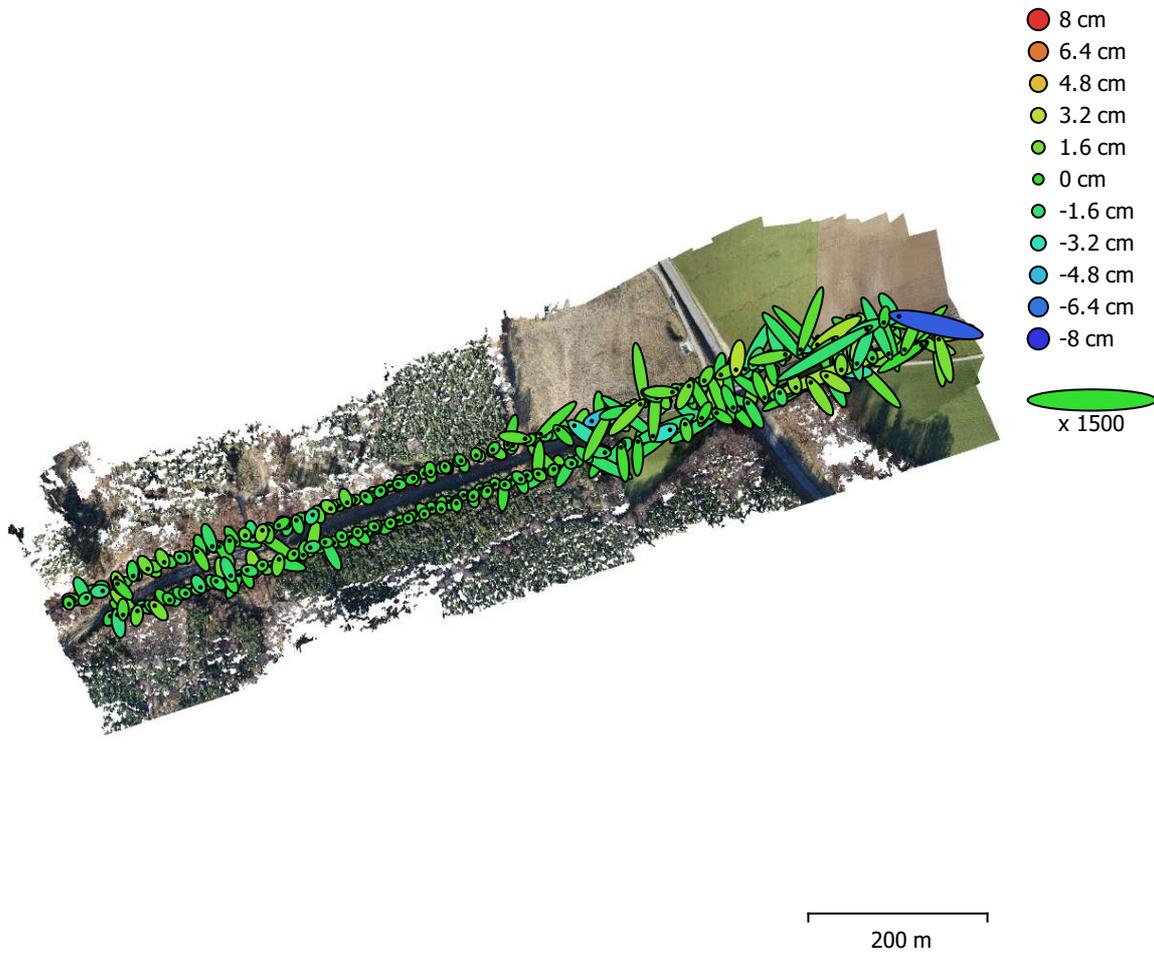


Fig. 5. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>XY error (cm)</b>	<b>Total error (cm)</b>
1.25946	1.20749	1.14862	1.74478	2.08892

Table 5. Average camera location error.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

# Ground Control Points



Fig. 6. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
5	2.76694	8.9896	25.2242	9.40579	26.9208

Table 6. Check points RMSE.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

<b>Label</b>	<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>Total (cm)</b>	<b>Image (pix)</b>
Point 1	-1.11451	7.20395	9.03986	11.6128	3.537 (10)
Point 2	-4.82206	14.0829	19.1117	24.2247	4.637 (10)
Point 3	1.09716	8.65399	43.3721	44.2407	3.870 (9)
Point 4	-0.247188	5.10925	27.9933	28.4568	4.141 (11)
Point 5	3.53844	7.2694	8.33985	11.6154	4.941 (10)
<b>Total</b>	<b>2.76694</b>	<b>8.9896</b>	<b>25.2242</b>	<b>26.9208</b>	<b>4.261</b>

Table 7. Check points.  
X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

# Digital Elevation Model

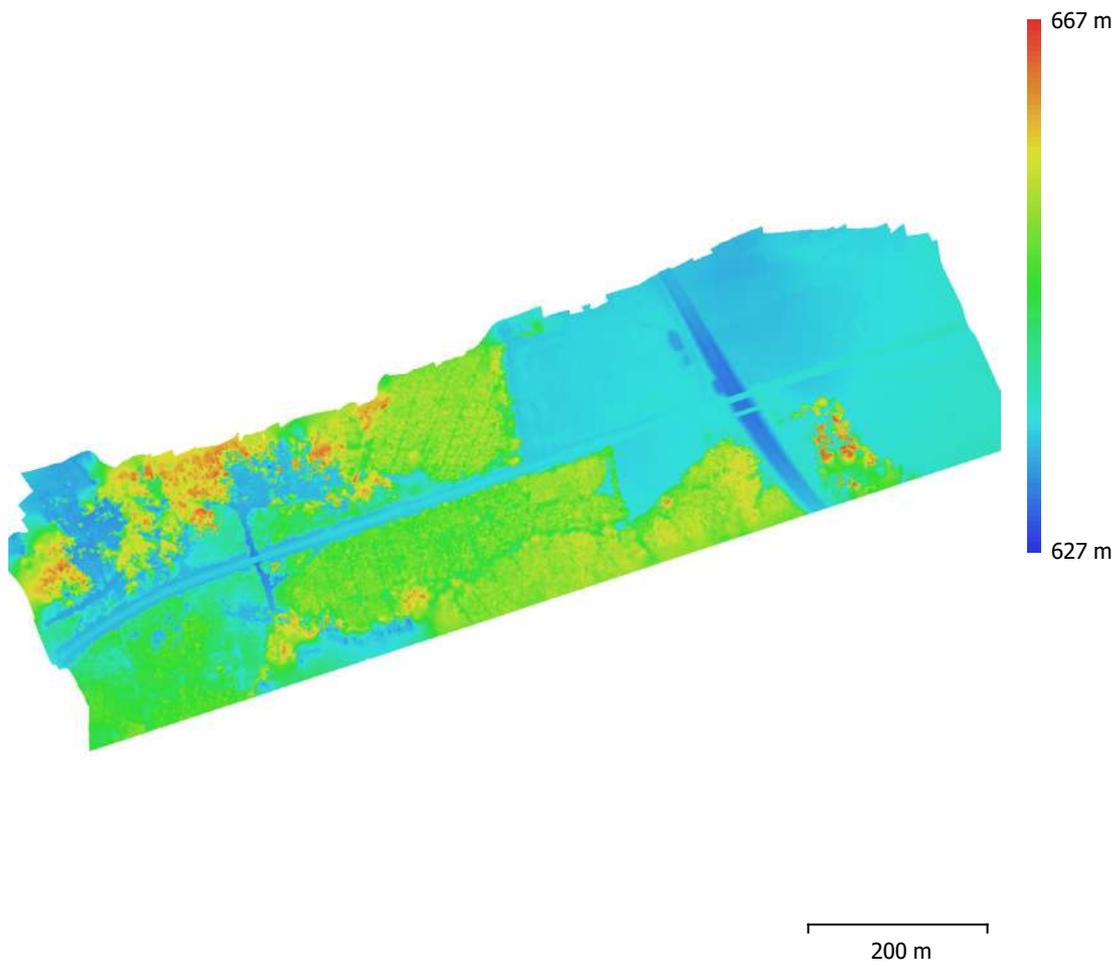


Fig. 7. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 5.34 cm/pix  
Point density: 351 points/m<sup>2</sup>

# Processing Parameters

## General

Cameras	310
Aligned cameras	310
Markers	5
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

## Point Cloud

Points	175,188 of 243,429
RMS reprojection error	0.135281 (0.474651 pix)
Max reprojection error	0.464086 (4.46022 pix)
Mean key point size	3.44026 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	3.17335
File size	16.53 MB

## Dense Point Cloud

Points	186,109,664
Point colors	3 bands, uint8

### Depth maps generation parameters

Quality	High
Filtering mode	Mild
Processing time	2 hours 21 minutes
Memory usage	1.81 GB

### Dense cloud generation parameters

Processing time	1 hours 9 minutes
Memory usage	8.10 GB
Software version	1.6.5.11249
File size	2.61 GB

## DEM

Size	26,579 x 14,679
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)

### Reconstruction parameters

Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	3 minutes 10 seconds
Memory usage	300.06 MB
Software version	1.6.5.11249
File size	412.69 MB

## System

Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.6.5 build 11249
OS	Windows 64 bit
RAM	15.93 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz
GPU(s)	None

# 20210211\_UMC\_90\_2\_nr\_Abstand\_60m

Processing Report

31 March 2021



# Survey Data

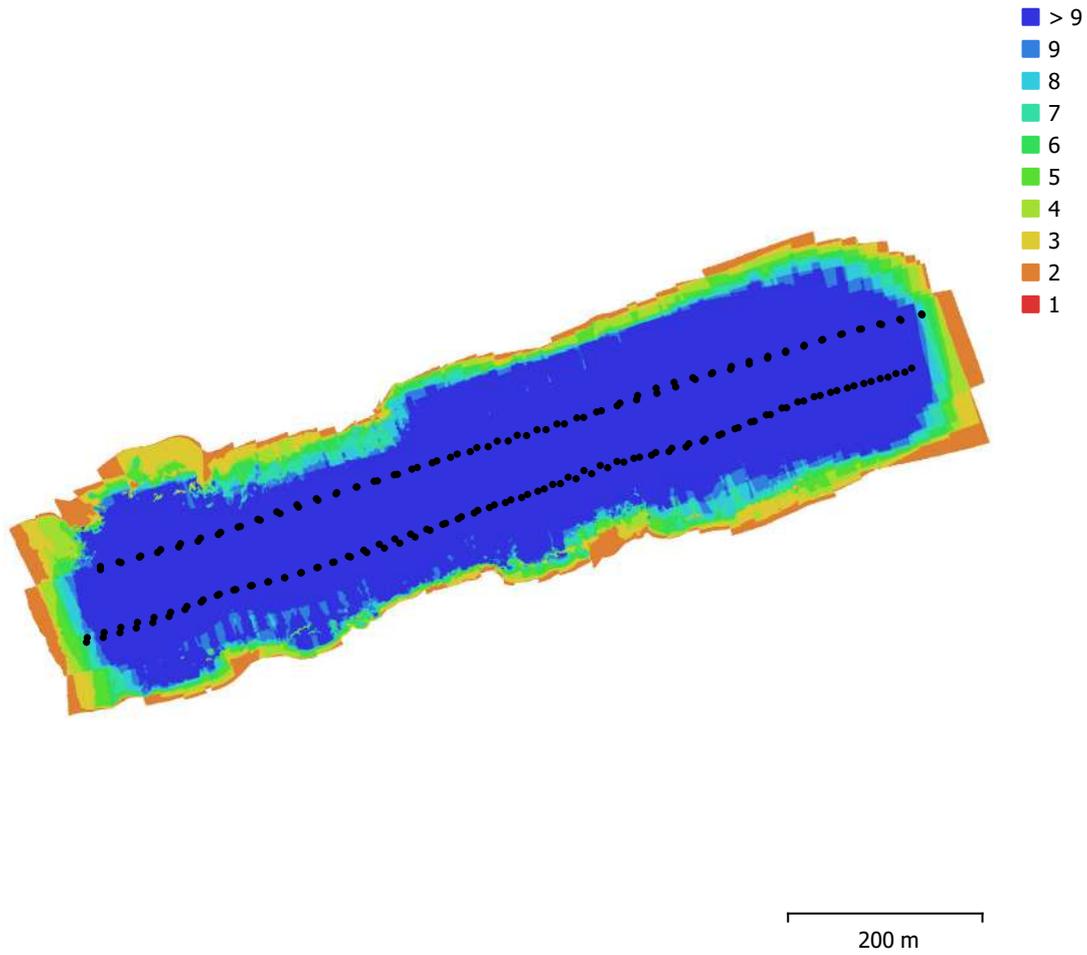


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	190	Camera stations:	190
Flying altitude:	105 m	Tie points:	400,098
Ground resolution:	2.6 cm/pix	Projections:	1,299,666
Coverage area:	0.233 km <sup>2</sup>	Reprojection error:	0.392 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)	5456 x 3632	16 mm	4.4 x 4.4 μm	No

Table 1. Cameras.

# Camera Calibration

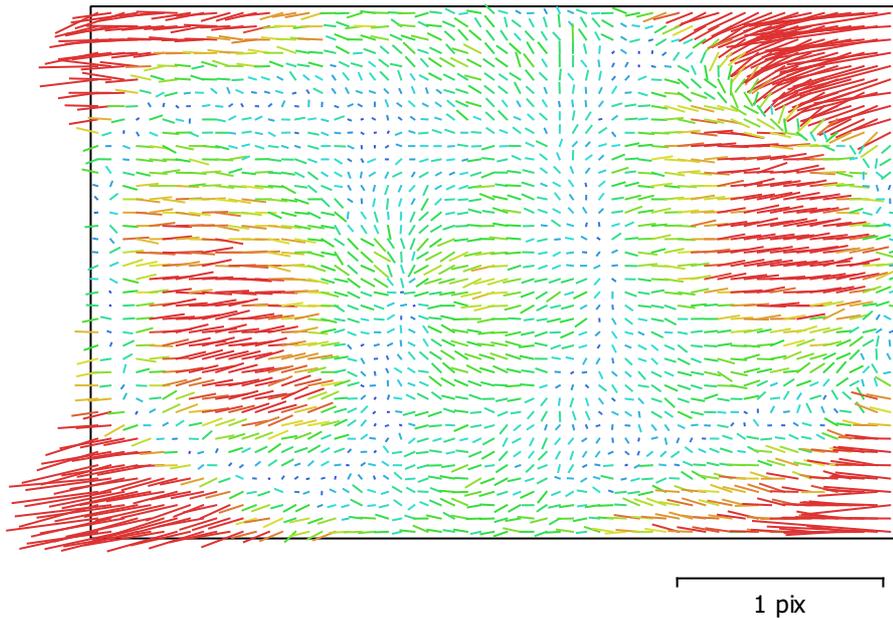


Fig. 2. Image residuals for UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm).

## UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)

190 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
<b>Frame</b>	<b>5456 x 3632</b>	<b>16 mm</b>	<b>4.4 x 4.4 <math>\mu\text{m}</math></b>

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
<b>F</b>	<b>3746.59</b>	0.054	1.00	-0.49	-0.13	-0.42	-0.03	-0.16	0.22	-0.12	0.01	-0.06
<b>Cx</b>	<b>-45.4266</b>	0.024		1.00	0.05	0.19	0.07	0.05	-0.08	0.04	0.61	-0.01
<b>Cy</b>	<b>-10.2949</b>	0.021			1.00	-0.01	0.08	0.02	-0.04	0.03	-0.01	0.76
<b>B1</b>	<b>-5.20876</b>	0.027				1.00	0.02	0.02	-0.01	-0.00	0.09	0.12
<b>B2</b>	<b>-2.02655</b>	0.023					1.00	0.01	-0.01	0.02	-0.08	0.07
<b>K1</b>	<b>-0.0653455</b>	1.8e-05						1.00	-0.95	0.90	-0.02	0.00
<b>K2</b>	<b>0.0852389</b>	6e-05							1.00	-0.98	-0.01	-0.02
<b>K3</b>	<b>0.0119753</b>	5.8e-05								1.00	0.01	0.02
<b>P1</b>	<b>0.00085747</b>	1.4e-06									1.00	0.01
<b>P2</b>	<b>-0.000806343</b>	1.5e-06										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

# Camera Locations

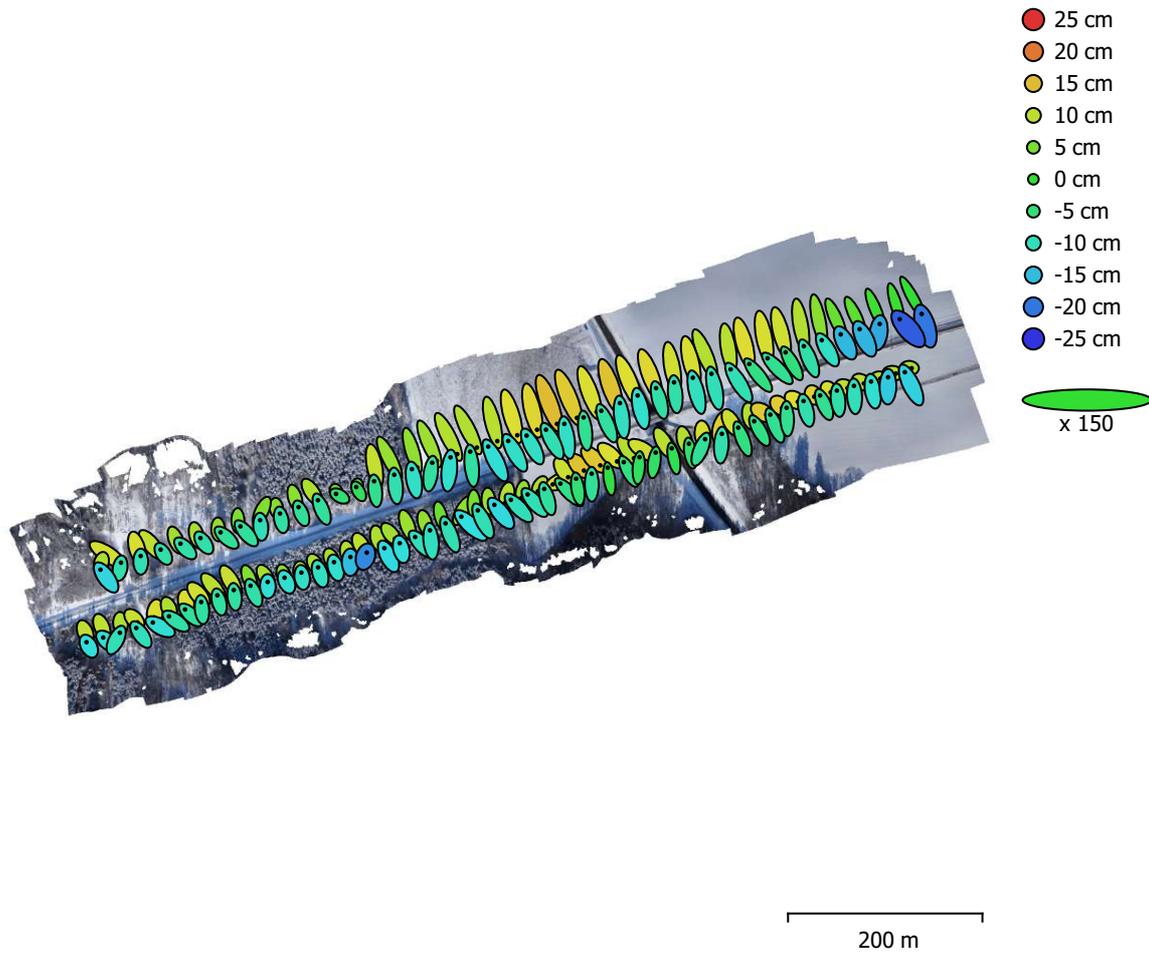


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>XY error (cm)</b>	<b>Total error (cm)</b>
6.08116	14.0833	9.96756	15.3401	18.294

Table 3. Average camera location error.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

# Digital Elevation Model

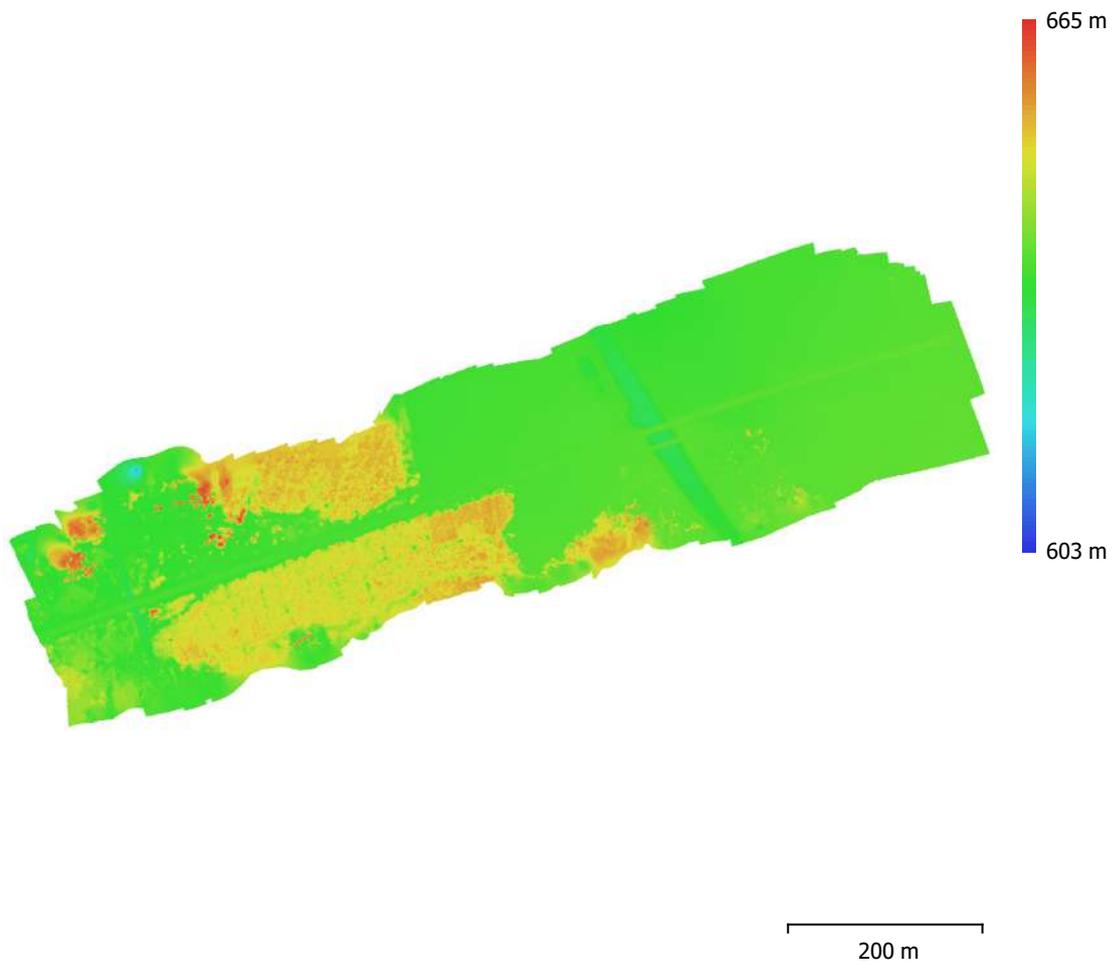


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 10.4 cm/pix  
Point density: 92.7 points/m<sup>2</sup>

# Processing Parameters

## General

Cameras	190
Aligned cameras	190
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

## Point Cloud

Points	400,098 of 495,991
RMS reprojection error	0.126675 (0.392133 pix)
Max reprojection error	0.618069 (4.19063 pix)
Mean key point size	3.14102 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	3.5108

## Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Tie point limit	0
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	6 minutes 43 seconds
Matching memory usage	1.26 GB
Alignment time	3 minutes 34 seconds
Alignment memory usage	180.87 MB

## Optimization parameters

Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	6 seconds
Software version	1.6.5.11249
File size	37.17 MB

## Dense Point Cloud

Points	32,812,845
Point colors	3 bands, uint8

## Depth maps generation parameters

Quality	Medium
Filtering mode	Mild
Processing time	44 minutes 3 seconds
Memory usage	577.67 MB

## Dense cloud generation parameters

Processing time	5 minutes 54 seconds
Memory usage	3.39 GB
Software version	1.6.5.11249
File size	468.65 MB

## DEM

Size	11,491 x 6,308
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)

## Reconstruction parameters

Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled

Processing time	40 seconds
Memory usage	310.11 MB
Software version	1.6.5.11249
File size	77.48 MB
<b>Orthomosaic</b>	
Size	38,752 x 20,220
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)
Colors	3 bands, uint8
<b>Reconstruction parameters</b>	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Processing time	7 minutes 47 seconds
Memory usage	3.52 GB
Software version	1.6.5.11249
File size	4.22 GB
<b>System</b>	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.6.5 build 11249
OS	Windows 64 bit
RAM	15.93 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz
GPU(s)	None

# 20210211\_UMC\_90\_2\_nr\_Abstand\_80m

Processing Report

31 March 2021



# Survey Data

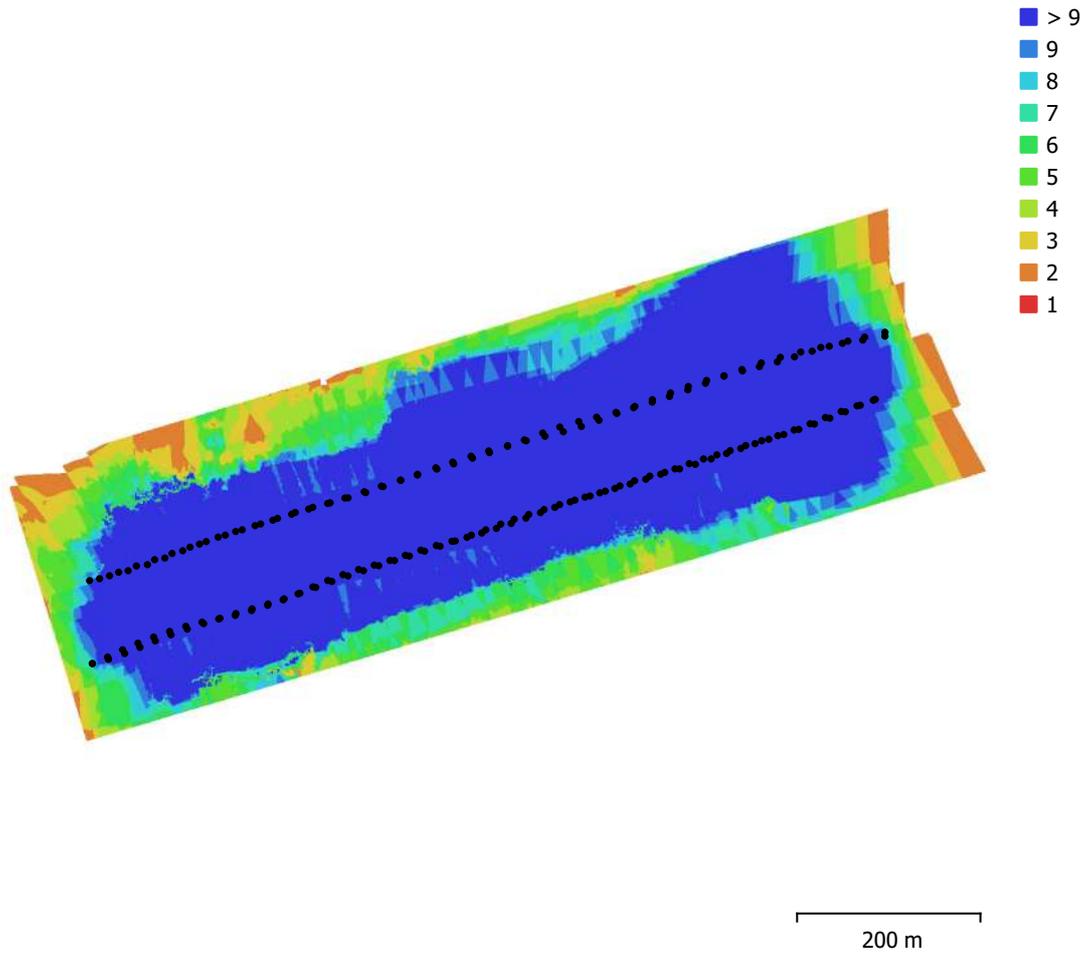


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	193	Camera stations:	193
Flying altitude:	110 m	Tie points:	323,280
Ground resolution:	2.78 cm/pix	Projections:	957,126
Coverage area:	0.308 km <sup>2</sup>	Reprojection error:	0.382 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)	5456 x 3632	16 mm	4.4 x 4.4 μm	No

Table 1. Cameras.

# Camera Calibration

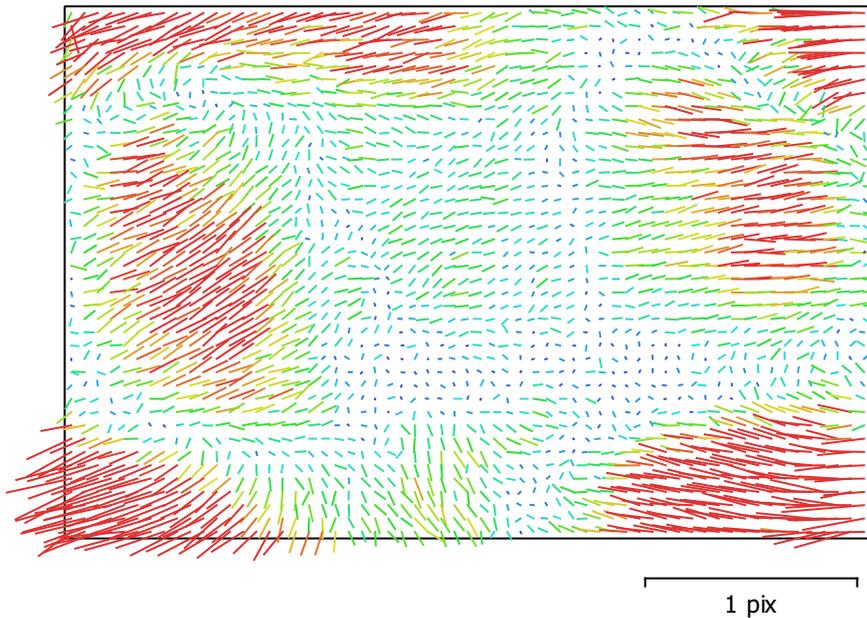


Fig. 2. Image residuals for UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm).

## UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)

193 images

Type  
**Frame**

Resolution  
**5456 x 3632**

Focal Length  
**16 mm**

Pixel Size  
**4.4 x 4.4  $\mu\text{m}$**

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
<b>F</b>	<b>3734.53</b>	0.06	1.00	-0.46	-0.07	-0.46	0.01	-0.13	0.20	-0.13	-0.03	-0.10
<b>Cx</b>	<b>-41.8625</b>	0.035		1.00	0.02	0.19	0.06	0.01	-0.04	0.02	0.65	0.01
<b>Cy</b>	<b>-10.4981</b>	0.032			1.00	-0.01	0.10	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.83
<b>B1</b>	<b>-7.1285</b>	0.036				1.00	0.01	0.02	0.00	-0.01	0.14	0.13
<b>B2</b>	<b>-10.6487</b>	0.034					1.00	0.01	-0.02	0.02	-0.05	0.19
<b>K1</b>	<b>-0.065325</b>	2.5e-05						1.00	-0.95	0.90	-0.05	0.00
<b>K2</b>	<b>0.085312</b>	8e-05							1.00	-0.98	0.01	-0.01
<b>K3</b>	<b>0.0107102</b>	7.5e-05								1.00	-0.00	0.00
<b>P1</b>	<b>0.00077857</b>	2.1e-06									1.00	-0.01
<b>P2</b>	<b>-0.000120898</b>	2.3e-06										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

# Camera Locations

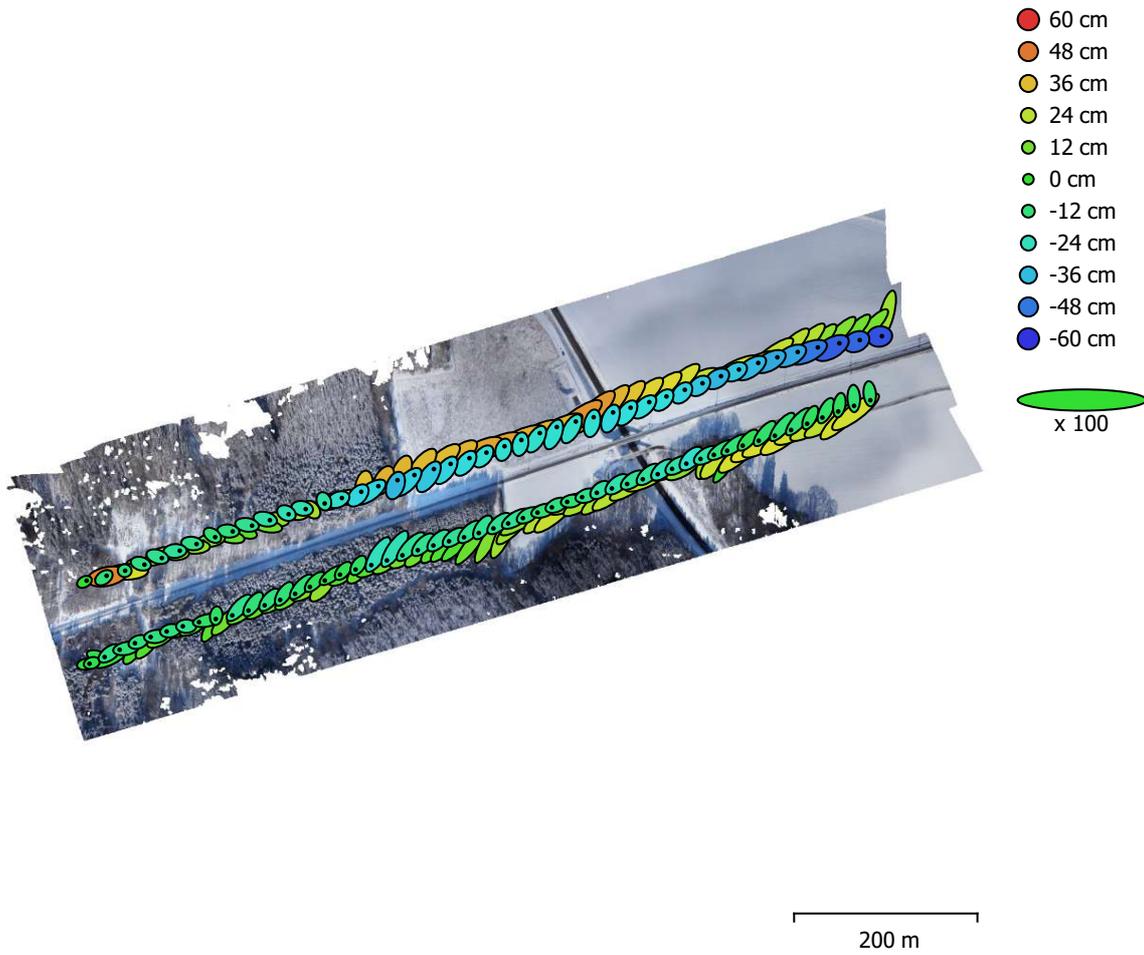


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.  
Estimated camera locations are marked with a black dot.

<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>XY error (cm)</b>	<b>Total error (cm)</b>
18.5041	15.4262	23.2727	24.0908	33.4961

Table 3. Average camera location error.  
X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

# Digital Elevation Model

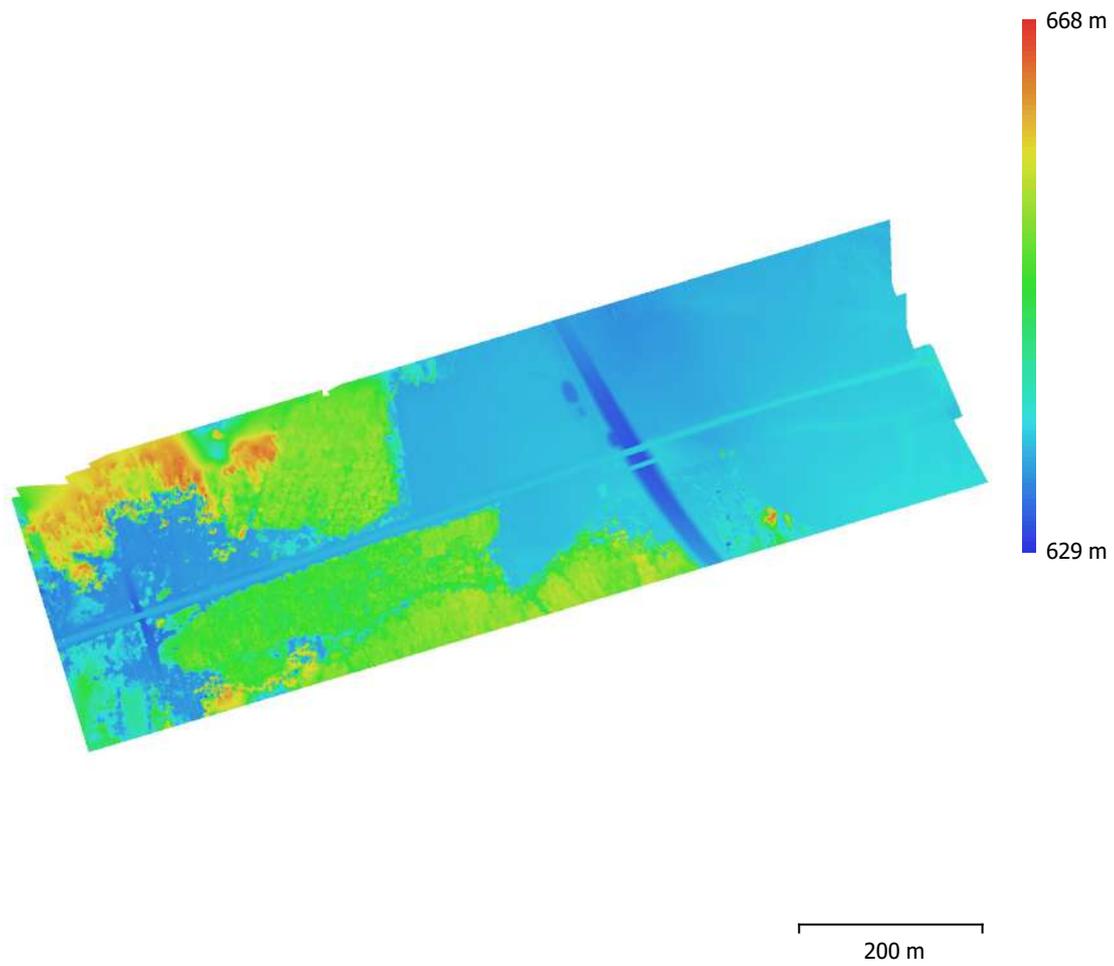


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 11.1 cm/pix  
Point density: 80.7 points/m<sup>2</sup>

# Processing Parameters

## General

Cameras	193
Aligned cameras	193
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

## Point Cloud

Points	323,280 of 471,456
RMS reprojection error	0.133366 (0.381842 pix)
Max reprojection error	0.35669 (2.70645 pix)
Mean key point size	2.86669 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	3.32363

## Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Tie point limit	0
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	7 minutes 11 seconds
Matching memory usage	1.27 GB
Alignment time	3 minutes 43 seconds
Alignment memory usage	201.12 MB
Software version	1.6.5.11249
File size	32.68 MB

## Dense Point Cloud

Points	34,907,593
Point colors	3 bands, uint8

## Depth maps generation parameters

Quality	Medium
Filtering mode	Mild
Processing time	29 minutes 22 seconds
Memory usage	617.86 MB

## Dense cloud generation parameters

Processing time	5 minutes 34 seconds
Memory usage	3.65 GB
Software version	1.6.5.11249
File size	499.81 MB

## DEM

Size	10,442 x 5,821
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)

## Reconstruction parameters

Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	37 seconds
Memory usage	316.51 MB
Software version	1.6.5.11249
File size	88.69 MB

**Orthomosaic**

Size 38,295 x 21,963  
Coordinate system WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)  
Colors 3 bands, uint8

**Reconstruction parameters**

Blending mode Mosaic  
Surface DEM  
Enable hole filling Yes  
Processing time 7 minutes 26 seconds  
Memory usage 3.98 GB  
Software version 1.6.5.11249  
File size 4.47 GB

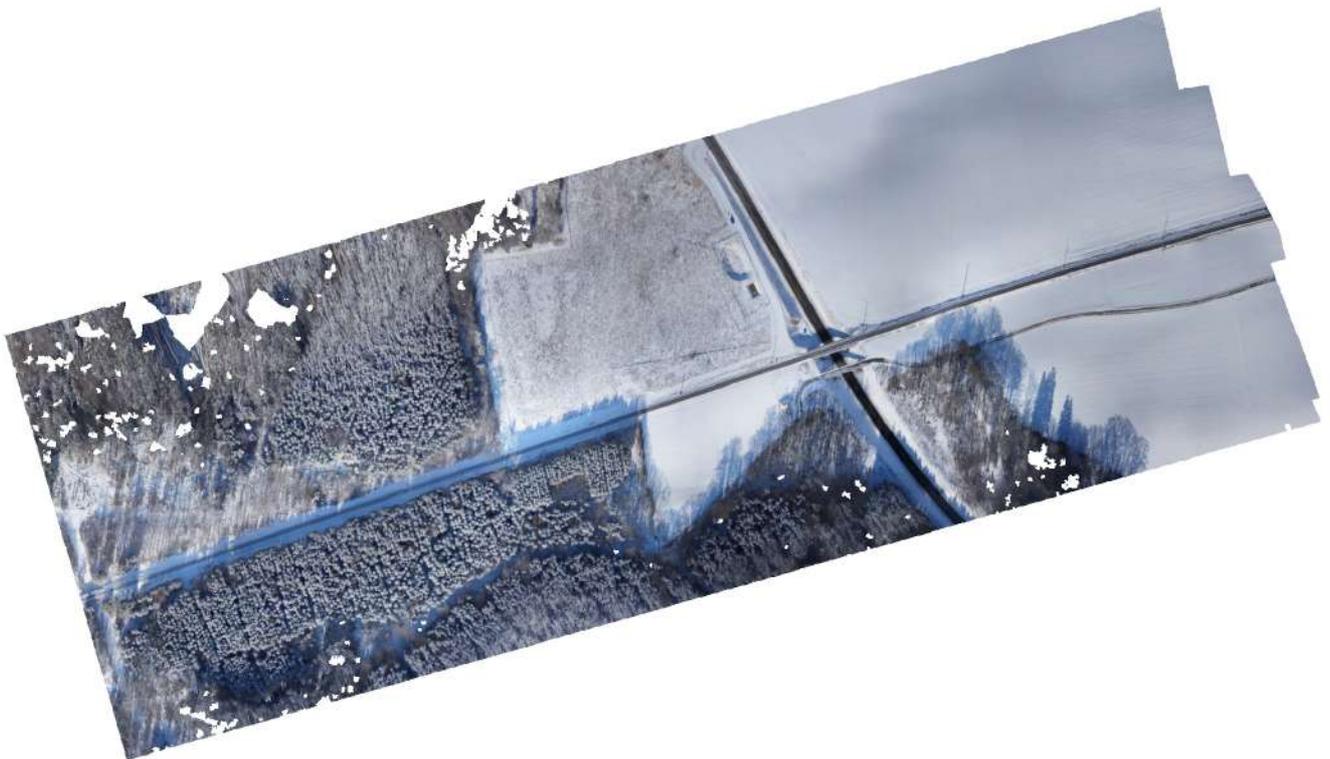
**System**

Software name Agisoft Metashape Professional  
Software version 1.6.5 build 11249  
OS Windows 64 bit  
RAM 15.93 GB  
CPU Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz  
GPU(s) None

# 20210211\_UMC\_90\_2\_nr\_Abstand\_100m

Processing Report

31 March 2021



# Survey Data

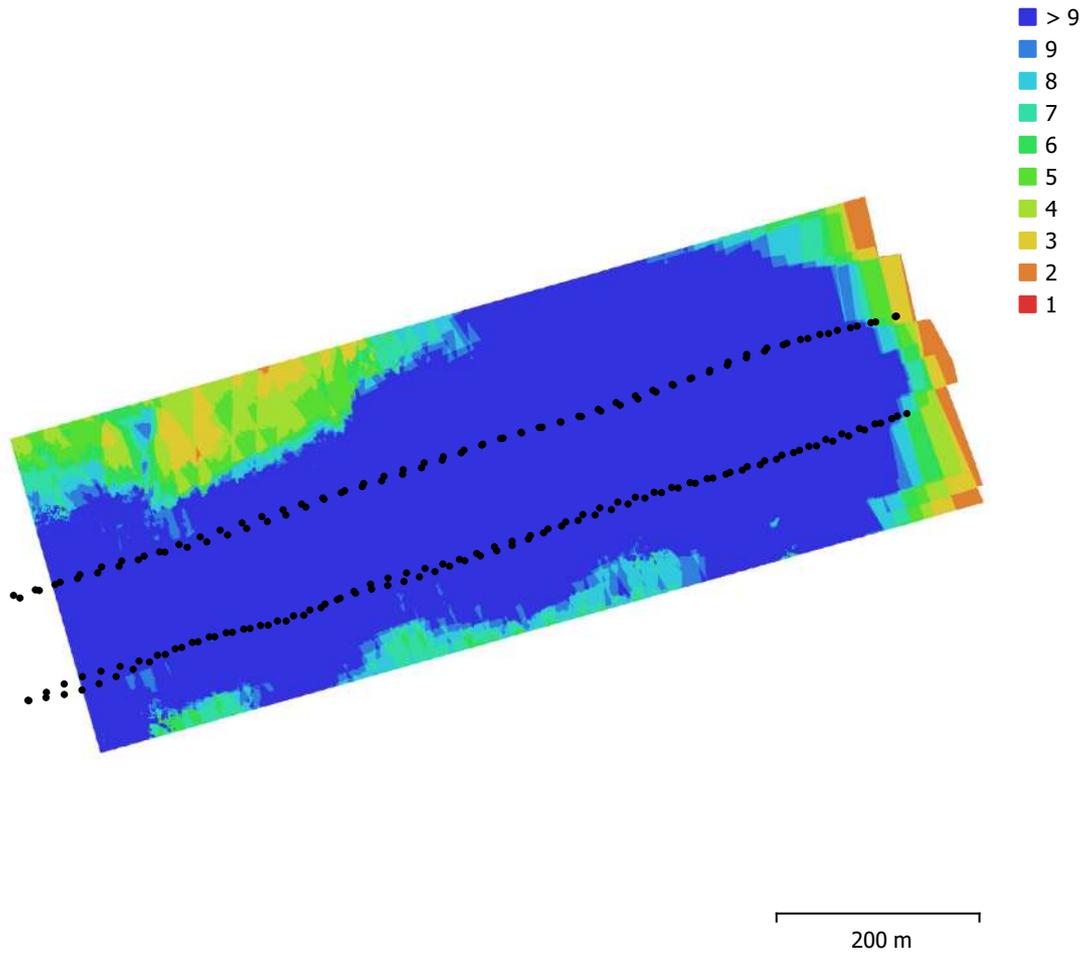


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	196	Camera stations:	196
Flying altitude:	112 m	Tie points:	363,475
Ground resolution:	2.84 cm/pix	Projections:	1,088,357
Coverage area:	0.291 km <sup>2</sup>	Reprojection error:	0.371 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)	5456 x 3632	16 mm	4.4 x 4.4 μm	No

Table 1. Cameras.

# Camera Calibration

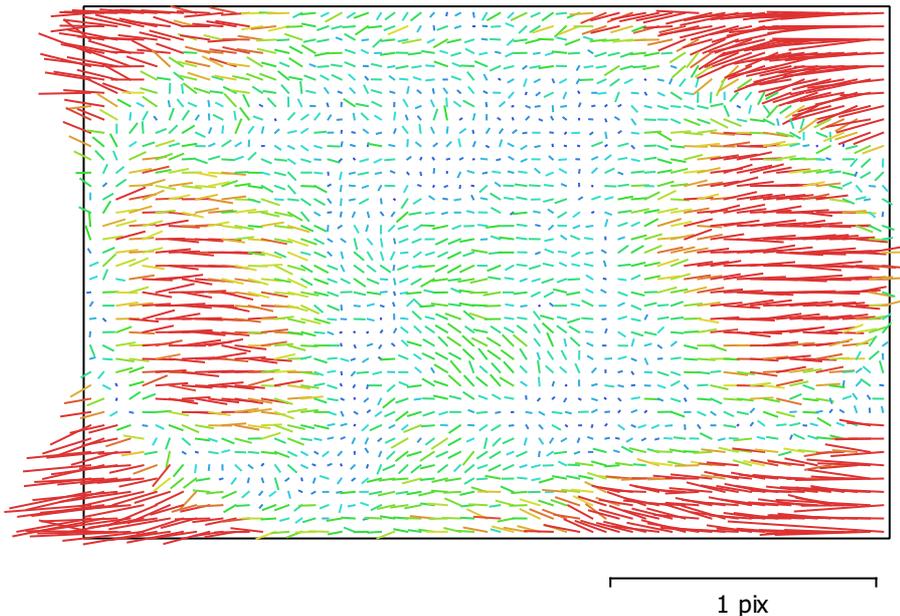


Fig. 2. Image residuals for UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm).

## UMC-R10C, E 16mm F2.8 (16mm)

196 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
<b>Frame</b>	<b>5456 x 3632</b>	<b>16 mm</b>	<b>4.4 x 4.4 <math>\mu\text{m}</math></b>

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
<b>F</b>	<b>3748.85</b>	0.045	1.00	-0.40	-0.03	-0.52	-0.02	-0.15	0.20	-0.14	-0.03	-0.01
<b>Cx</b>	<b>-38.972</b>	0.028		1.00	-0.00	0.16	-0.01	0.01	-0.03	0.00	0.68	-0.01
<b>Cy</b>	<b>-24.4172</b>	0.027			1.00	0.03	0.25	0.01	-0.02	0.02	-0.00	0.86
<b>B1</b>	<b>-1.685</b>	0.033				1.00	0.01	-0.01	0.03	-0.03	0.17	0.01
<b>B2</b>	<b>2.25764</b>	0.029					1.00	-0.00	-0.00	0.01	-0.01	0.37
<b>K1</b>	<b>-0.0655025</b>	2e-05						1.00	-0.95	0.90	-0.04	0.00
<b>K2</b>	<b>0.083776</b>	6.5e-05							1.00	-0.98	0.01	-0.01
<b>K3</b>	<b>0.0129396</b>	6.2e-05								1.00	-0.01	0.02
<b>P1</b>	<b>0.000706731</b>	1.7e-06									1.00	0.00
<b>P2</b>	<b>-0.000741334</b>	2e-06										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

# Camera Locations

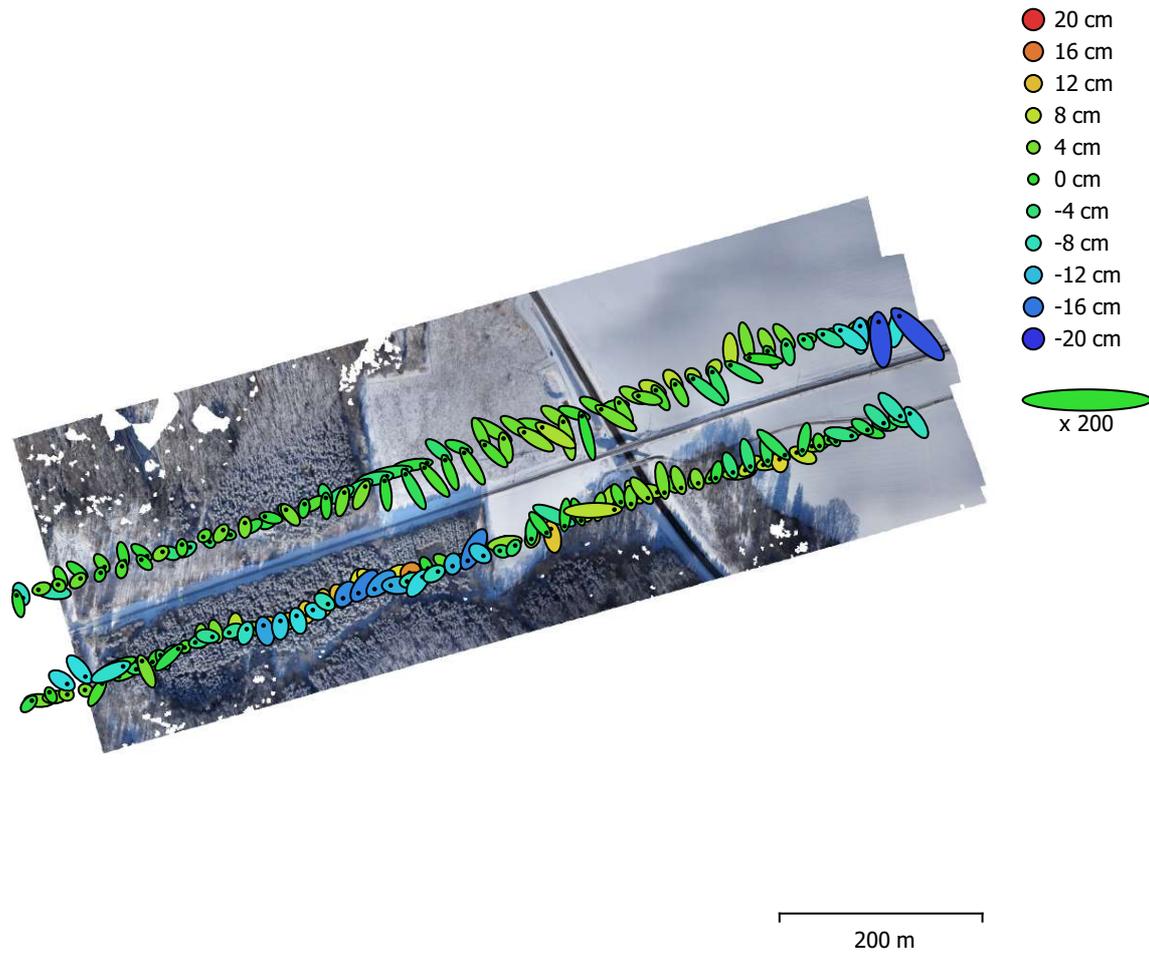


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>XY error (cm)</b>	<b>Total error (cm)</b>
6.07159	6.25076	6.07591	8.71414	10.6232

Table 3. Average camera location error.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

# Digital Elevation Model

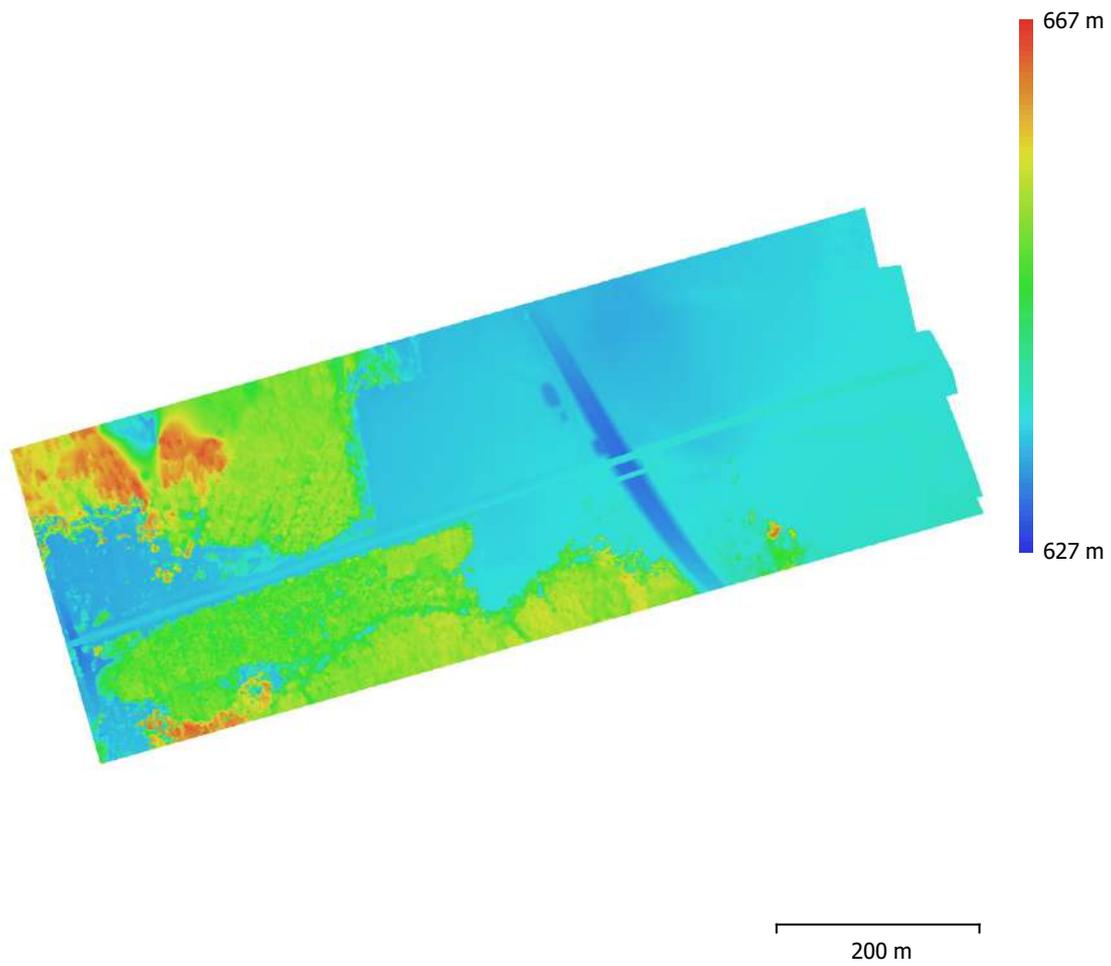


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 11.4 cm/pix  
Point density: 77.4 points/m<sup>2</sup>

# Processing Parameters

## General

Cameras	196
Aligned cameras	196
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

## Point Cloud

Points	363,475 of 453,651
RMS reprojection error	0.122579 (0.370513 pix)
Max reprojection error	0.330982 (2.83608 pix)
Mean key point size	3.05816 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	3.24755

## Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Tie point limit	0
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	7 minutes 53 seconds
Matching memory usage	1.28 GB
Alignment time	3 minutes 4 seconds
Alignment memory usage	179.96 MB
Software version	1.6.5.11249
File size	32.12 MB

## Dense Point Cloud

Points	32,369,248
Point colors	3 bands, uint8

## Depth maps generation parameters

Quality	Medium
Filtering mode	Mild
Processing time	35 minutes 28 seconds
Memory usage	600.26 MB

## Dense cloud generation parameters

Processing time	5 minutes 43 seconds
Memory usage	3.82 GB
Software version	1.6.5.11249
File size	463.43 MB

## DEM

Size	9,401 x 5,435
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)

## Reconstruction parameters

Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	46 seconds
Memory usage	315.82 MB
Software version	1.6.5.11249
File size	79.78 MB

**Orthomosaic**

Size 33,855 x 20,239  
Coordinate system WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)  
Colors 3 bands, uint8

**Reconstruction parameters**

Blending mode Mosaic  
Surface DEM  
Enable hole filling Yes  
Processing time 10 minutes 5 seconds  
Memory usage 4.73 GB  
Software version 1.6.5.11249  
File size 4.32 GB

**System**

Software name Agisoft Metashape Professional  
Software version 1.6.5 build 11249  
OS Windows 64 bit  
RAM 15.93 GB  
CPU Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz  
GPU(s) None