



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Einsatzmöglichkeiten und Problemstellungen von UAVs
als Aufnahmegerät für die topographische Kartographie“

verfasst von / submitted by

Rainer Rockenbauer, BA MA

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the
degree of

Master of Science (MSc)

Wien, 2019 / Vienna, 2019

Studienkennzahl lt. Studienblatt / A 066, 856
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

Studienrichtung lt. Studienblatt / Kartographie und Geoinformation
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Betreut von / Supervisor

Ass.-Prof. Mag. Dr. Karel Kriz

Inhalt

Inhalt.....	1
Abbildungsverzeichnis	4
Vorwort.....	8
Kurzfassung / Abstract	9
1 Einleitung.....	11
1.1 Motivation	11
1.2 Themenwahl und Eingrenzung.....	11
1.3 Stand der Forschung.....	12
1.4 Begriffserklärung.....	13
2 Problemstellung und Zielsetzung	15
2.1 Problemstellung.....	15
2.2 Ziele und Fragestellungen	16
2.3 Methodik	18
3 Topographische Kartographie.....	20
3.1 Topographische Kartographie	20
3.2 Topographische Karte	20
3.3 Karteninhalte	22
3.4 Topographische Vermessungen und Aufnahmeverfahren	24
3.4.1Topographische Vermessungsverfahren mittels Fernerkundung.....	25
3.4.2Gegenüberstellung der topographischen Aufnahmeverfahren	36
3.4.3Terrestrisch-topographische Vermessungsverfahren	38
4 Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)	41
4.1 Unterscheidungen von UAVs.....	41
4.2 Einsatzmöglichkeiten von UAVs für die Fernerkundung und die topographische Kartographie	43
4.3 Regulierungen	46
4.3.1Österreich.....	46

4.3.2	Deutschland.....	47
4.3.3	Tschechien	48
5	Klassifikations- und Bildinterpretationsmethoden.....	50
5.1	Structure from Motion-Verfahren	50
5.2	UAV-Photogrammetrie	52
5.3	Klassifikationsmethoden	55
5.3.1	Maximum Likelihood Verfahren	56
5.3.2	Support-Vector-Machine-Klassifikation	56
5.3.3	Objektbasierte Bildanalyse (Object Based Image Analysis)	57
5.3.4	Klassifikation von LAS-Daten.....	57
6	Möglichkeiten von UAV-Aufnahmen für die topographische Kartographie.....	59
6.1	Umsetzung des Structure from Motion-Prinzips zur Erstellung von Orthophotos, Geländemodellen und 3D-Daten als Grundlage für die topographische Karte.....	59
6.2	Verwendung der Orthophotos als Grundlage für die Klassifikation.....	60
6.3	Verwendung der 3D-Daten als Klassifikationshilfe.....	60
6.4	Einsatz des digitalen Geländemodells für die Geländedarstellung	61
7	Use Cases – Nutzung von UAVs für die topographische Kartographie am Beispiel dreier Befliegungen.....	62
7.1	Eingesetztes Equipment	62
7.2	Befliegungen	63
7.3	Klassifikation.....	67
7.3.1	Podhradí nad Dyjí I	67
7.3.2	Podhradí nad Dyjí II	69
7.3.3	Retz.....	70
7.4	Nutzung von UAV-Aufnahmen für die einzelnen Elemente einer topographischen Karte.....	72
7.4.1	Gewässer	72
7.4.2	Versiegelte Flächen	76
7.4.3	Vegetation	78

7.4.4Bebauung	83
7.4.5Geländedarstellung	85
7.5 Zusammenfassung der Use Cases	90
8 Vorschlag eines Workflows zur Erstellung topographischer Karten auf Basis von UAV-Aufnahmen	94
8.1 Planungsphase	94
8.2 Flugphase und Datenverarbeitung.....	95
9 Beantwortung der Forschungsfragen	97
10 Zusammenfassung.....	100
11 Literatur.....	102

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Methodologie der Masterarbeit [eigene Abbildung].....	18
Abbildung 2: Übersicht der topographischer Vermessungsverfahren [eigene Abbildung nach KOH-11].....	25
Abbildung 4: Unterscheidung zwischen passivem und aktivem System [ALB-01, S.10]	27
Abbildung 3: Elektromagnetisches Spektrum sowie die verschiedenen Bereiche der einzelnen Sensoren [ALB-01, S.11].....	27
Abbildung 5: Reflexionskurven unterschiedlicher Objekte [ALB-01, S.18]	28
Abbildung 6: Parallelprojektion und Zentralprojektion im Vergleich [ALB-01, S.73].....	28
Abbildung 7: Einteilung eines Orthophotos (links) in mehrere Klassen, welche im Anschluss als Informationshilfe für die Aktualisierung der DKM dienen. [STE-07,S.8].....	30
Abbildung 8: Prinzip des Airborne Laserscannings [WIE-18].	31
Abbildung 9: Vergleich der Punktverteilung von Schwingspiegel, Polygonspiegel und Faserscanner (v.l.) [KOH-11, S.114ff].....	31
Abbildung 10: Beispiele für mit ALS generierten Gelände- beziehungsweise Oberflächenmodellen (Auflösungen: 100 bzw. 50cm) der Stadt Wien [WIE-18b/c].....	32
Abbildung 11: Ein Beispiel für eine aus SRTM-Daten generierte Geländeschummerung im Maßstab 1:100.000. Datenquelle: www.earthexplorer.usgs.gov	33
Abbildung 12: Reflexion von Wasser, Boden und Vegetation in verschiedenen Wellenlängen sowie den LANDSAT Kanälen 1,2,3,4,5 und 7. [SEO-18]	35
Abbildung 13: Prinzip des Polaren Anhängens [KOH-11, S.25].....	38
Abbildung 14: Riegl VZ-2000i [RIE-18]	39
Abbildung 15: Unterscheidung Schrittweite und Strahldivergenz [KOH-11, S.56]	40
Abbildung 16: Zwei Beispiele für mit einem Riegl VZ2000i generierte Punktwolken [RIE-18b].....	40
Abbildung 17: Gegenüberstellung von Fixed Wing UAVs (SenseFly eBee Plus) und Rotary Wing UAVs (Phantom 4 Pro) [SEN-18a / DJI-18].....	42
Abbildung 18: Gegenüberstellung von Fixed und Rotary Wing UAVs [SEN-18b]	43
Abbildung 19: Der Riegl RiCopter ist ein mit Laserscanner und Kamera bestückter Quadrocopter. [RIE-18c]	45
Abbildung 20: Kategorisierung von UAVs in Österreich [AUS-17]	47

Abbildung 21: Die neue Drohnenverordnung ist seit 2017 gültig und regelt Flugverbotszonen und Pflichten und Nachweise. [BMV-18]	48
Abbildung 22: Prinzip des SfM-Verfahrens [WES-12, S.301]	51
Abbildung 23: Workflow des SfM-Verfahrens [eigene Abbildung nach WES-12, S. 303]	51
Abbildung 24: Workflow von UAV-Aufnahmen [STA-16, S.24].....	52
Abbildung 25: Mögliche Befliegungsarten für UAV-Aufnahmen mit Hilfe von Kameras. [PIX-18b]	53
Abbildung 26: Im ersten Schritt werden Bilder eingefügt, ausgerichtet und eine Sparse Point Cloud zur Orientierung erstellt. [PIX4D-Screenshot]	54
Abbildung 27: Nachdem die Ground Control Points mit mehreren Fotos verknüpft wurden, um die Genauigkeit zu erhöhen, wird eine Dense Point Cloud - also eine dichtere Punktwolke als die Sparse Point Cloud - errechnet. Diese wird nun zu einem Mesh und texturiert. [PIX4D-Screenshot]	54
Abbildung 28: Multispektral-Klassifikation anhand eines simplen Beispiels mit zwei Spektralkanälen [ALB-09, S.164]	55
Abbildung 29: Die Ellipsen stellen Linien gleicher Wahrscheinlichkeiten für die Zugehörigkeit von Pixeln zu den Klassen dar. [ALB-09, S. 165]	56
Abbildung 30: Zuordnung der SVM-Klassifikation [ANC-18]	56
Abbildung 31: Gegenüberstellung von pixelbasierter und objektbasierter Klassifikation [LAN-06, S.16]	57
Abbildung 32: DJI Phantom 4 Pro inklusive eines Ground Control Points [eigene Abbildung]	62
Abbildung 33: Setzen von Ground Control Points mit Hilfe eines Leica GG04 Plus GNSS-Geräts [eigene Abbildung]	63
Abbildung 34: Übersicht des ersten Aufnahmegebiets bei Podhradí nad Dyjí [eigene Abbildung]	65
Abbildung 35: Übersicht über die zweite Befliegung in Podhradí nad Dyjí [eigene Abbildung]	65
Abbildung 36: Übersicht des zweiten Aufnahmegebiets [eigene Abbildung]	66
Abbildung 37: Definition der Trainingsgebiete „Podhradi nad Dyji I“ [eigene Abbildung]	67
Abbildung 38: Gegenüberstellung von Support Vector Machine (links) und Maximum Likelihood (rechts) Klassifikationsergebnissen [eigene Abbildung]	68

Abbildung 39: Trainingsgebiete der Befliegung „Podhradí nad Dyjí II“ [eigene Abbildung]	69
Abbildung 40: Gegenüberstellung von Maximum Likelihood (links) und Support Vector Machine (rechts) Klassifikationsergebnissen [eigene Abbildung]	70
Abbildung 41: Trainingsgebiete der Befliegung in Retz [eigene Abbildung]	71
Abbildung 42: Gegenüberstellung von Support Vector Machine (links) und Maximum Likelihood (rechts) Klassifikationsergebnisse [eigene Abbildung]	72
Abbildung 43: Workflow für die Extraktion des Gewässers [eigene Abbildung]	74
Abbildung 44: Die versiegelten Flächen direkt nach der Klassifikation (links) sowie nach der Polygonisierung und Glättung (Bezier-Methode) und nach dem Eliminieren der Polygonteile (rechts) [eigene Abbildung]	76
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Klassifikationsergebnisse mit den bearbeiteten Ergebnissen (rechts). Die Straße ist aufgrund der Vegetation teilweise unterbrochen [eigene Abbildung]	77
Abbildung 46: Workflow für die Extraktion von Verkehrsflächen [eigene Abbildung] ...	77
Abbildung 47: Workflow der Vegetationsextraktion [eigene Abbildung]	79
Abbildung 48: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Maximum Likelihood Klassifikation und der kombinierten Klassifikation [eigene Abbildung]	80
Abbildung 49: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Maximum Likelihood Klassifikation und der kombinierten Klassifikation [eigene Abbildung]	80
Abbildung 50: Dünne Laubbäume wie Pappeln können bei höherer Flughöhe nicht dreidimensional erfasst werden. [eigene Abbildung]	81
Abbildung 51: Gegenüberstellung der überwachten Klassifikation sowie der kombinierten Klassifikation mit Hilfe der LAS-Daten [eigene Abbildung]	81
Abbildung 52: Gegenüberstellung des Orthophotos und des segmentierten Rasterbilds [eigene Abbildung]	83
Abbildung 53: Polygonisierte Gebäude nach der manuellen Selektion von Gebäuden [eigene Abbildung]	84
Abbildung 54: Workflow zur Extraktion der Gebäude [eigene Abbildung]	84
Abbildung 55: Gegenüberstellung des digitalen Oberflächenmodells und des digitalen Geländemodells der Befliegung Retz (erstellt mit Drone2Map) [eigene Abbildung]	85
Abbildung 56: Höhenlinien im Befliegungsgebiet Retz [eigene Abbildung]	86
Abbildung 57: Gegenüberstellung des Oberflächenmodells und des Geländemodells bei der Befliegung „Podhradí nad Dyjí II“ [eigene Abbildung]	87

Abbildung 58: Gegenüberstellung zweier Geländemodelle: links entspricht die Auflösung der GSD, rechts entspricht die Auflösung 5x der GSD [eigene Abbildung].....	88
Abbildung 59: Gegenüberstellung der mit Hilfe der UAV-Photogrammetrie-Software erstellten Höhenlinien mit jenen einer ESRI Basemap [eigene Abbildung]	88
Abbildung 60: Abweichung der Befliegung „Podhradí nad Dyjí II“ von „Podhradí nad Dyjí I“. Zu beachten ist, dass bei der ersten Befliegung Ground Control Points gesetzt wurden, wodurch diese Befliegung deutlich genauer wurde [eigene Abbildung]	89
Abbildung 61: Topographische Karte des Befliegungsgebiets „Podhradí nad Dyjí I“ [eigene Abbildung]	91
Abbildung 62: Topographische Karte des Befliegungsgebiets „Podhradí nad Dyjí II“ [eigene Abbildung]	91
Abbildung 63: Topographische Karte des Befliegungsgebiets Retz [eigene Abbildung] .	92

Vorwort

Der Entstehungsprozess dieser Masterarbeit zog sich rund ein Jahr und ohne einigen Personen wäre diese Abschlussarbeit so nicht möglich gewesen: Zunächst möchte ich bei meinem Masterarbeitsbetreuer Karel Kriz, der mich bei der langwierigen Themensuche und vor allem auch während meines Studiums immer unterstützt hat, recht herzlich bedanken.

Besonders möchte ich mich bei meiner Freundin Barbara Brunner bedanken! Danke für die Unterstützung und dass du mir Mut gemacht hast, noch einmal ein Studium zu beginnen. Auch Johannes Brunner, der mir seine Drohne zur Verfügung gestellt hat und mich nicht nur bei den Befliegungen unterstützt hat, möchte ich Danke sagen.

Selbstverständlich gebührt auch meiner Mutter Ilse Rehart Dank! Danke, dass du mich auf meinem Bildungsweg stets unterstützt hast und du die Bildung deiner Kinder oft über deine eigenen Bedürfnisse gestellt hast.

Danke an meine Schwester Astrid Rupp für das Korrekturlesen dieser Arbeit! Auch allen meinen Freunden und Arbeitskollegen möchte ich Danke sagen, dass sie mich in den vergangenen drei Jahren meines Studiums unterstützt haben.

Kurzfassung / Abstract

UAVs – also Unmanned Aerial Vehicles oder Drohnen – sind eine zukunftssträchtige Technologie und als solche auch für die topographische Kartographie sowie die Geoinformation von Bedeutung. UAVs liefern mit Hilfe des Structure from Motion-Verfahrens hochauflösende Orthophotos, digitale Oberflächenmodelle sowie 3D-Modelle. Mit Hilfe dieses Verfahrens können aus mehreren Bildern Orthophotos sowie 3D-Daten erstellt werden, welche als Klassifikationsgrundlage für die topographische Kartographie genutzt werden können. Zwar ist die räumliche Auflösung extrem hoch, die spektrale Auflösung ist jedoch geringer und beschränkt sich auf Echtfarben. Bestimmte Objekte wie Gewässer oder versiegelte Flächen lassen sich mit Hilfe von überwachter Klassifikation vergleichsweise gut klassifizieren, bei der Unterscheidung zwischen Wald-, Wiesen- und Ackerflächen kann es hier aufgrund der ähnlichen Farben zu Problemen kommen. Um die Klassifikation zu verbessern, können die 3D-Daten herangezogen werden. Die von UAV-Photogrammetrie-Softwares wie Drone2Map, Pix4D oder Photoscan bereit gestellten Punktwolken können in GIS-Programmen in Boden und Nicht-Boden klassifiziert werden. Diese klassifizierte Punktwolke kann in ein Rasterbild umgewandelt werden, um dadurch Bodenflächen bei den Waldflächen auszuschließen. Während die Klassifikation des Orthophotos mit Hilfe der klassifizierten Punktwolke akzeptable Ergebnisse bringt, muss beim digitalen Geländemodell insbesondere bei dichter Vegetation sowie ohne der Verwendung von Passpunkten (Ground Control Points) mit Abstrichen gerechnet werden. Aufgrund der geringen befliegbaren Fläche sind UAVs zudem nur für die Erstellung großmaßstäbige Kartenwerke geeignet. Immerhin beträgt die maximale Aufnahmefläche pro Akkuladung bei mit Rotoren bestückten UAVs (Rotary Wing UAVs) mehrere Hektar, bei mit Flügeln bestückten UAVs (Fixed Wing UAVs) mehrere Hektar bis Quadratkilometer. Trotz der Einschränkungen bei der maximal aufgenommenen Fläche und dem Geländemodell haben UAVs angesichts ihrer geringen Kosten und des geringen Zeitaufwands für Flug- und Bearbeitungsphase sowie ihrer Effizienz ihre Daseinsberechtigung für die topographische Kartographie und Geoinformation.

UAVs – Unmanned Aerial Vehicles also known as Drones – are an emerging technology, which have also an increasing importance for topographic cartography and GIS. This master thesis reflects on the possibilities of UAVs for the topographic cartography. Using the Structure-from-Motion-procedure several single images, which were taken by an UAV, can be processed into orthophotos, digital surface models and 3D-data (point clouds and meshes). This data can be used as a classification basis for topographic cartography. As the orthophoto was created by a camera the orthophoto has a low spectral resolution. Therefore forest, grassland and fields are hard to classify in contrast to water and sealed surface. To improve the results of the forest classification 3D-data can be used. The point cloud can be classified into ground and non-ground and be used to exclude ground areas from the forest areas. While the classification of the orthophoto with the assistance of the classified point cloud produces acceptable results, with the digital terrain model, in particular with dense vegetation and without the use of ground control points, some limitations must be expected. Due to the small footprint – from several hectares to several square kilometres depending on the UAV type – UAVs are only suitable for the creation of large-scale maps. Because of the low time effort, the low cost factor and the high spatial resolution UAVs can be a supplementation for topographic cartography and GIS.

1 Einleitung

Drohnen oder Unmanned Aerial Vehicles, wie sie im wissenschaftlichen Kontext genannt werden, sind mittlerweile omnipräsent. Schon beim Discounter um die Ecke finden sich günstige, mit Kamera ausgestattete Drohnen um 99€ und auch in die Nachrichten schaffen es die unbemannten Luftfahrzeuge immer wieder: So setzten handelsübliche Quadrocopter kurz vor Weihnachten 2018 den Flughafen Gatwick – einen der größten Flughäfen Europas – mehrere Tage außer Gefecht. Dass eine abstürzende Drohne den Skistar Marcel Hirscher während eines Rennens in Madonna di Campiglio im Dezember 2015 nur knapp verfehlte, trug auch nicht sonderlich zur Popularität von Drohnen bei. Für die Wissenschaft und insbesondere für die Kartographie und Geoinformation sind UAVs (=Unmanned Aerial Vehicles) ein interessantes Aufnahmegerät. Im Rahmen dieser Masterarbeit werden die Möglichkeiten und Probleme von UAVs als Aufnahmegerät für die topographische Kartographie untersucht.

1.1 Motivation

Bereits mit dem Zeitpunkt ihrer Erstellung sind topographische Karten veraltet und müssen laufend aktualisiert werden. Um topographische Karten in höchstmöglicher Qualität zu produzieren, müssen auch die Aufnahmeverfahren adaptiert und neue Aufnahmegeräte eingesetzt werden. In den letzten Jahren ist die Nutzung von UAVs als Aufnahmegerät für die topographische Kartographie sowie für viele wissenschaftliche Anwendungsgebiete stark angestiegen.

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit den Einsatzmöglichkeiten und Problemstellungen und widmet sich der Frage, ob mit Hilfe von UAVs topographische Karten erstellt werden können und welche Möglichkeiten und Einschränkungen sich dabei ergeben.

Ziel ist es einen Leitfaden für die Erstellung topographischer Karten mit Hilfe von UAVs anzufertigen und Empfehlungen für die Nutzung von UAVs als Aufnahmegeräte für die topographische Kartographie zu geben. Die Motivation liegt darin, das Potential von UAVs für die topographische Kartographie auszuschöpfen und eine kostengünstige, schnelle und effiziente Alternative zu bestehenden topographischen Aufnahmegeräten bereit zu stellen. Die Möglichkeiten von UAVs sind vielzählig und werden im Zuge dieser Masterarbeit aufgezeigt.

1.2 Themenwahl und Eingrenzung

Die Herstellung topographischer Karten sowie die topographische Kartographie selbst sind einem ständigen Wandel unterworfen. Die Technologie für die Herstellung topographischer Karten hat sich in den letzten Jahrhunderten und Jahrzehnten stark verändert. Wurde zu Beginn der Landesaufnahmen noch mit einfachen Instrumenten vermessen, sind heute Fernerkundungsverfahren wie Luftbild- und Satellitenbildmessung, Laserscanning oder Radarverfahren, vorherrschend.

Die topographische Kartographie muss neuen Aufnahmegeräten und -verfahren offen gegenüberstehen. Eines dieser neuen Aufnahmegeräte sind UAVs – also Unmanned Aerial Vehicles, auch als Drohnen bekannt. UAVs werden in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen eingesetzt und wegen ihrer geringen Kosten, einfachen und schnellen Handhabung und hohen Flexibilität geschätzt. So kommen diese in der Biologie oder Archäologie ebenso zum Einsatz wie in der Vermessung oder Geoinformation. UAVs liefern hochauflösende, georeferenzierte Luftbilder, welche mit Hilfe von UAV-Photogrammetrie-Programmen in 3D-Modelle, Orthophotos und Oberflächenmodelle umgerechnet werden können. Diese dienen als Grundlage für topographische Karten. Diese Arbeit widmet sich den Einsatzmöglichkeiten und Problemstellungen von UAVs für die topographische Kartographie.

1.3 Stand der Forschung

In den vergangenen Jahren ist die Bedeutung der UAVs enorm gestiegen. Dabei wurde das Potential von UAV schnell für die Fernerkundung und Geoinformation entdeckt: Bereits im Jahr 2009 prägte Eisenbeiß in seiner Dissertation den Begriff *UAV Photogrammetrie* und fasste darin die Einsatzgebiete von UAV für die Photogrammetrie zusammen: „*Die Verwendung von UAV Photogrammetrie erlaubt neue Anwendungen im Nahbereich und in der Kombination von Luftbild- und Nahbereichsphotogrammetrie. Mit UAVs ergeben sich low-cost Alternativen zur klassischen bemannten Luftbildphotogrammetrie*“. Den Begriff UAV Photogrammetrie definiert Eisenbeiß folgendermaßen: UAV-Photogrammetrie bezeichnet ein „*photogrammetrisches Aufnahmesystem, welches manuell, halbautomatisch oder automatisch gesteuert und kontrolliert werden kann und die photogrammetrische Auswertung von UAV Bildern*“ [EIS-09, S.vii].

2014 wurden UAVs in 70 Ländern hergestellt. Dabei mischten weltweit 715 Hersteller mit und brachten fast 2500 verschiedene Modelle auf den Markt. 2014 gab es an 175 US-amerikanischen Universitäten diverse Programme mit UAV-Bezug. Im selben Jahr hat das United States Geological Survey (USGS) eine „*Roadmap for Unmanned Aircraft Systems*“ – also einen Leitfaden für die Nutzung im USGS – erstellt. Diese Roadmap zählt eine Vielzahl an Möglichkeiten auf: „*Wildlife biologists first implemented the technology (monitoring and inventorying wildlife), followed by geologists (detecting landslides, mapping fault zones), hydrologists (monitoring shoreline erosion and stream temperature gradients) and ecologists (habitat mapping)*“. Das Ziel des USGS ist es, durch den Einsatz von UAV bei kleinen Projekten die Kosten im Vergleich zur bemannten Luftfahrt auf ein Zehntel zu reduzieren. Als Hauptargument für die UAVs zählen die geringeren Anschaffungs- und Betriebskosten im Vergleich zur bemannten Luftfahrt [CRE-15, S.iii ff.].

Auch zahlreiche wissenschaftliche Papers in Fachzeitschriften wie *Geomorphology*, *Remote Sensing* oder *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* beschäftigen sich mit der Nutzung von UAVs für die topographische Kartographie: Während einige Fachartikel auf Teilaspekte der Datenerfassung mit Hilfe von UAVs, wie zum Beispiel der Optimierung der Genauigkeit mit Hilfe von Ground Control Points, also Markierungen mit Hilfe derer das Modell im Anschluss georeferenziert werden kann, [JAM-17; AZM-14; CHI-16] oder

auf die Erstellung von Digitalen Höhenmodellen [AJA-17] abzielen, bieten andere Artikel einen holistischeren Überblick über die Materie UAV in der Fernerkundung oder Geowissenschaften [COL-14, NEI-11, TAM-14].

In Österreich hat sich ebenfalls ein reger Austausch in der GIS/Vermessungs-Community zum Thema UAV entwickelt: 2017 wurde erstmals bei der AGIT (Symposium für angewandte Geoinformatik) ein UAV-Summit mit einem Schwerpunkt auf Datenerfassung, Laserscanning und Fernerkundung abgehalten. In 13 verschiedenen Sessions und Workshops wurden Anwendungsbeispiele aus der Praxis präsentiert. Diese reichten dabei von ökologischen Fragestellungen¹ über technische Fragestellungen² hin zu allgemeinen Problemstellungen beim Einsatz von UAV³ [AGI-17]. Dennoch hinkt Österreich bei der Nutzung von UAVs im Vergleich zu Deutschland und der Schweiz deutlich hinterher: Während in Deutschland 2017 auf 1.700 Einwohner eine verkaufte Drohne kommt, ist es in Österreich lediglich eine verkaufte UAV auf 8.300 Einwohner. Verantwortlich für diese Entwicklung dürften die strengen Regulierungen in Österreich sein [DER-18b].

1.4 Begriffserklärung

Für ein besseres Verständnis der Problemstellung und der Zielsetzungen müssen zunächst einige Begriffe geklärt werden:

Die *topographische Kartographie* als Teilgebiet der Kartographie widmet sich der Herstellung topographischer Karten [INS-99, BOL-02]. Eine topographische Karte bezeichnet eine „*hauptsächlich maßstabsabhängige Auswahl der natürlichen und künstlichen Objekte der Erdoberfläche mit Hilfe graphischer Elemente*“ [KOH-10, S.77]. Etwas konkreter definierte die Internationale Kartographische Vereinigung die topographische Karte als eine „*Karte, in der Situation, Gewässer, Geländeformen, Bodenbewachung und eine Reihe sonstiger zur allgemeinen Orientierung notwendiger oder ausgezeichnete Erscheinungen den Hauptgegenstand bilden und durch Kartenbeschriftung eingehend erläutert sind*“ [HAK-02, S.417]. Eine topographische Karte enthält also Situation (Siedlungen, Verkehrswege, Gewässer, Bodenbedeckung / Vegetation und Einzelobjekte) sowie die Geländedarstellung (Höhenlinien, Schummerung und Gelände – und Kleinformen).

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) bezeichnen alle Arten von unbemannten Luftfahrzeugen. Die Bauweise einer UAV kann von kleinen, handelsüblichen Quadroptern bis hin zu großen militärisch genutzten Spionagedrohnen reichen. UAVs bestehen aus folgenden vier Einheiten: Fluggerät, Steuerung, Kommunikationseinheit und

¹ Wie zum Beispiel Veränderungsdetektion eines Wildbaches mittels unbemanntem Luftfahrzeug oder New Environmental Robotic Services with a Remotely Piloted Aircraft Multi Sensor System for Environmental Monitoring

² Positionsgenauigkeit von Unmanned Aerial Systems-Trajektorien oder Kamera-Latenzzeit-Problematik bei dynamischen UAV-Anwendungen

³ Beispiel: Drone Zone Austria - Design of a Web Portal for Safe Drone Mission Planning in Austria

Nutzlast. Je nach Einsatzgebiet variiert auch die Nutzlast. Bei den meisten handelsüblichen UAVs und jenen, die für wissenschaftliche Zwecke genutzt werden, besteht die Nutzlast aus einer Foto- oder Videokamera. Aber auch Multispektral- oder Laserscanner können als Nutzlast eingesetzt werden. In dieser Masterarbeit werden primär UAVs mit RGB-Kameras behandelt.

Damit diese einzelnen Bilder genutzt werden können, bedarf es UAV-Photogrammetrie-Software, die diese in Orthophotos, 3D-Modelle, Oberflächen- oder Geländemodelle umrechnet. Damit die UAV-Aufnahmen für die topographische Kartographie genutzt werden können, bedarf es verschiedener *Klassifikationsmethoden*. Diese nutzen die unterschiedlichen Reflexionseigenschaften von Objekten, um die Pixel aufgrund ihrer Farbwerte unterschiedlichen Klassen zuzuordnen. Doch nicht nur Pixel können verschiedenen Klassen zugeordnet werden, auch Punktwolken können beispielsweise in Boden oder Vegetation klassifiziert werden. Im Kapitel *Klassifikations- und Bildinterpretationsmethoden* werden sowohl das Klassifikationsverfahren als auch das Structure-from-Motion-Verfahren beschrieben, welche für die Herstellung von Orthophotos aus UAV-Aufnahmen verwendet werden.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Um die genauen Möglichkeiten und Limitierungen von UAV für die topographische Kartographie erheben zu können, ist es notwendig die Problemstellung zu definieren, die Ziele und Fragestellungen zu präzisieren und die Methodik näher zu erläutern.

2.1 Problemstellung

Die Ausdrücke Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Unmanned Aerial System (UAS), unbemanntes Luftfahrzeug (uLFZ) oder Drohne beschreiben ein ferngesteuertes Flugsystem, welches in vielen Fällen mit GPS sowie einer Kamera bestückt ist. Dabei umfassen UAVs allerdings alle unbemannten Luftfahrzeuge wie etwa Ballons, Drachen, Gleitschirme, Luftschiffe, Hubschrauber, Quadrocopter und Flächenflieger. Ein UAV wird nur durch das Aufnahmegerät selbst wie einer Kamera oder verschiedener Sensoren zum Aufnahmegerät [EIS-09, S.vii].

In den letzten Jahren haben UAVs enorm an Popularität gewonnen: So wurde alleine für das Jahr 2018 für UAVs ein Markt von über 6,35 Mrd. Euro prognostiziert. [COL-14, S. 79ff]. Auch in den Medien wird häufiger über UAVs berichtet: Oftmals durch Negativbeispiele wie beispielsweise folgende Schlagzeilen nahelegen: „Immer mehr Drohnen-Zwischenfälle“ [ORF-18] oder „Polizeieinsatz: Drohne in der Nähe des Flughafens Wien beobachtet“ [DER-18]. Doch auch Beispiele über die wissenschaftliche Verwendung von UAVs finden sich in den Tagesmedien: Ein Beispiel hierfür ist „Vermessung: Wörthersee als 3D-Modell“ [KAE-18].

Das Anwendungsspektrum ist in den letzten Jahren aufgrund der größeren Verfügbarkeit von UAVs und den immer kleiner werdenden Sensoren sehr breit geworden [CHI-16, S. 1]. UAVs werden in verschiedensten Anwendungsbereichen eingesetzt. Beispiele hierfür sind landwirtschaftliche, fluviale, glaziale, geomorphologische Studien, die Baubranche, die Gebäudeverwaltung, die Vermessung, die Filmbranche, die Archäologie und das Militär [COL-14, S.89ff]. In den meisten Fällen, in denen UAV wissenschaftlichen Studien dienen, werden mit Hilfe von 3D-Rekonstruktions-Software wie Pix4D, Agisoft Photoscan, ArcGIS Drone2Map oder OpenDroneMap basierend auf dem Structure-from-motion-Verfahren Orthophotos, 3D-Modelle oder Geländemodelle erstellt, welche in weiterer Folge beliebig interpretiert und weitergenutzt werden können [JAM-16, S.1].

Allerdings wird in vielen Studien, welche UAV-Befliegungen enthalten, nur eine kleine Fläche aufgenommen. Dies hängt einerseits damit zusammen, dass das Zielgebiet beziehungsweise der Zweck der Aufnahme oft nur sehr kleinräumig ist. So hat es einerseits bei der Aufnahme eines räumlich begrenzten Phänomens, wie beispielsweise einer Hangrutschung, keinen Sinn ein deutlich größeres Gebiet zu befliegen. Andererseits kommen technische Limitierungen (Akkulaufzeit, Reichweite...) und regulative Einschränkungen (Registrierung der UAV, Flugverbot für bestimmte UAV über bestimmten Einsatzgebieten, maximal erlaubte Flughöhe) erschwerend hinzu. Vor allem in Österreich gibt es eine sehr strenge Regelung für den Betrieb von unbemannten Luftfahrzeugen. Die rechtliche Grundlage ist hierfür das novellierte Luftfahrtgesetz vom 1.1.2014. Aufgrund

dieser Regelung ist der Betrieb nicht für alle UAVs in allen Gebieten erlaubt. So darf mit den meisten UAVs nur in unbebautem und unbesiedeltem Gebiet geflogen werden [AUS-17].

Trotz der Einschränkungen weisen UAVs Vorteile auf, wie geringe Anschaffungs- und Betriebskosten, hohe Flexibilität sowie der Möglichkeit in schwer zugänglichem Terrain Aufnahmen zu erstellen. Die Genauigkeit – vor allem beim Setzen von Ground Control Points oder der Verwendung von mit GNSS-bestückten UAVs – ist extrem hoch und UAV-Aufnahmen sind im Gegensatz zu Satellitenbildern immer bewölkungsfrei, da unter der Bewölkung geflogen werden kann. Allerdings ist dies nur unter windstillen und niederschlagsfreien Bedingungen möglich [AZM-14, S.2].

Für die topographische Kartographie ergibt sich durch den Einsatz von UAV-Aufnahmen ein enormes Potential. Denn die Vorteile von UAV-Aufnahmen für die topographische Kartographie sind durchaus gegeben: So können UAV-Aufnahmen Luft- und Satellitenbilder mit einem hohen Bewölkungsgrad ergänzen und zur Aktualisierung von Elementen einer topographischen Karte verwendet werden. [AZM-14, S.1]. Besonders interessant für die topographische Kartographie ist auch, dass sich mit Hilfe von UAV-Aufnahmen Oberflächen- und Geländemodelle beziehungsweise Orthophotos erstellen lassen. Zwar liefern handelsübliche UAV – also jene, die nicht speziell modifiziert beziehungsweise mit Sensoren bestückt wurden – nur Echtfarbbilder, aber auch diese eignen sich für überwachte Klassifikation beziehungsweise objektbasierte Bildanalyse. Immerhin verwendet auch das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen RGB-Luftbilder als Grundlage zur Aktualisierung der digitalen Katastermappe (DKM) [STE-07, S.3].

Die Einsatzmöglichkeiten von UAVs für die topographische Kartographie sind gegeben, das Potential wird allerdings noch nicht gänzlich ausgeschöpft. Ziel dieser Arbeit ist es, eine optimale Nutzung für UAVs in der topographischen Kartographie zu finden.

2.2 Ziele und Fragestellungen

Diese Masterarbeit beleuchtet die Einsatzmöglichkeiten und Problemstellungen von UAVs als Aufnahmegerät für die topographische Kartographie. Dabei wird geprüft für welche Einsatzgebiete und Zwecke sich UAVs besonders eignen und für welche sie eher ungeeignet sind. Das Ziel ist es, einen möglichen Leitfaden zur Erstellung von topographischen Karten mit Hilfe von Low-Cost-UAVs zu liefern.

Diese Masterarbeit behandelt folgende Fragestellungen:

• Können handelsübliche UAVs als Aufnahmegeräte für die topographische Kartographie genutzt werden?

Es wird untersucht, ob sich UAVs als eigenständige Aufnahmegeräte für die topographische Kartographie eignen oder ob sie nur unterstützend zu anderen Aufnahmegeräten zu verwenden sind. Abgeklärt wird auch, ob das gesamte Aufnahmeverfahren mit Hilfe von

UAVs durchgeführt werden kann oder ob bei gewissen Kartenelementen auf andere Aufnahmegeräte zurückgegriffen werden muss.

- **Für welche Elemente eignen sich UAV-Aufnahmen besonders gut und für welche Elemente sind andere Aufnahmeverfahren zu bevorzugen?**

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird geklärt, ob alle Elemente einer topographischen Karte mit Hilfe von UAVs erstellt werden können und ob sich einige Elemente wie beispielsweise Höhen oder Vegetation besser erfassen lassen. Es wird zunächst die Tauglichkeit von UAVs für die einzelnen Kartenelemente geprüft, um in einem weiteren Schritt – sofern alle Objekte dargestellt werden können – eine topographische Karte zusammenzusetzen. Dabei wird eruiert, welche Aufnahmeverfahren sich besser eignen, falls sich UAVs für etwaige Kartenelemente nicht eignen sollten.

- **Wirken sich die Einschränkungen in Österreich und ausgewählten Nachbarländern (CZ, D) auf die Möglichkeiten von UAVs als Aufnahmegerät für die topographische Kartographie aus?**

In Österreich unterliegt der Betrieb von UAVs strengen Regelungen. Wie schränken diese Regulierungen die topographische Aufnahme von UAVs ein? Ist die Aufnahme mit Hilfe von UAVs in ausgewählten österreichischen Nachbarländern (Tschechische Republik oder Deutschland) einfacher möglich? Welche Kartenelemente können aufgrund dieser strengen Regulierungen nicht aufgenommen werden?

- **Sind UAV-Aufnahmen im Vergleich zu anderen Aufnahmeverfahren günstiger, schneller und effizienter?**

Als große Vorteile von UAVs werden immer wieder der geringe Kostenfaktor, einfache Bedienung sowie geringe Aufnahme- und Bearbeitungsdauer angeführt [AZM-14, S.1], [CRE-15, S.iv]. Doch wie schnell können UAV-Aufnahmen wirklich durchgeführt werden? Dies wird anhand eigener Beispiele diskutiert.

- **Ist die hohe Aufnahmegenauigkeit von UAV-Aufnahmen ein Vor- oder Nachteil? Bis zu welcher Maßstabsebene lassen sich diese Aufnahmen ansprechend verwenden?**

UAVs liefern aufgrund der geringen Flughöhe sehr hochauflösende Abbildungen. Ist diese hohe Aufnahmegenauigkeit überhaupt notwendig für die topographische Kartographie? Entsprechen Modelle beziehungsweise Orthophotos, welche in einer 3D-Rekonstruktions-Software mit geringerer Genauigkeit berechnet wurden, immer noch den Anforderungen der topographischen Kartographie?

Diese Fragen werden im Kapitel „Beantwortung der Forschungsfragen“ beantwortet.

2.3 Methodik

In der vorliegenden Masterarbeit sollen einerseits mit Hilfe von Literatur Erkenntnisse über die Möglichkeiten von UAV-Aufnahmen für die topographische Kartographie zusammentragen werden, andererseits sollen mit Hilfe einer DJI Phantom 4 Pro eigene Befliegungen durchgeführt werden, welche als Grundlage für die Erstellung topographischer Karten dienen.

Ausgewählte Literatur wurde bereits in den vorangegangenen Kapiteln herangezogen. Eine vollständige Literaturliste findet sich im Literaturverzeichnis.

Vor UAV-Befliegungen muss immer ein genaues Ziel der Befliegung definiert werden. In diesem Fall ist das Ziel, eine möglichst heterogene Fläche zu befliegen, um die Tauglichkeit von UAV-Aufnahmen für die einzelnen Elemente der topographischen Karte zu eruieren. Die durchgeführten Befliegungen werden in einem Kapitel vorgestellt.

Diese Masterarbeit gliedert sich in 5 Schritte, die in Abbildung 1 beschrieben werden:

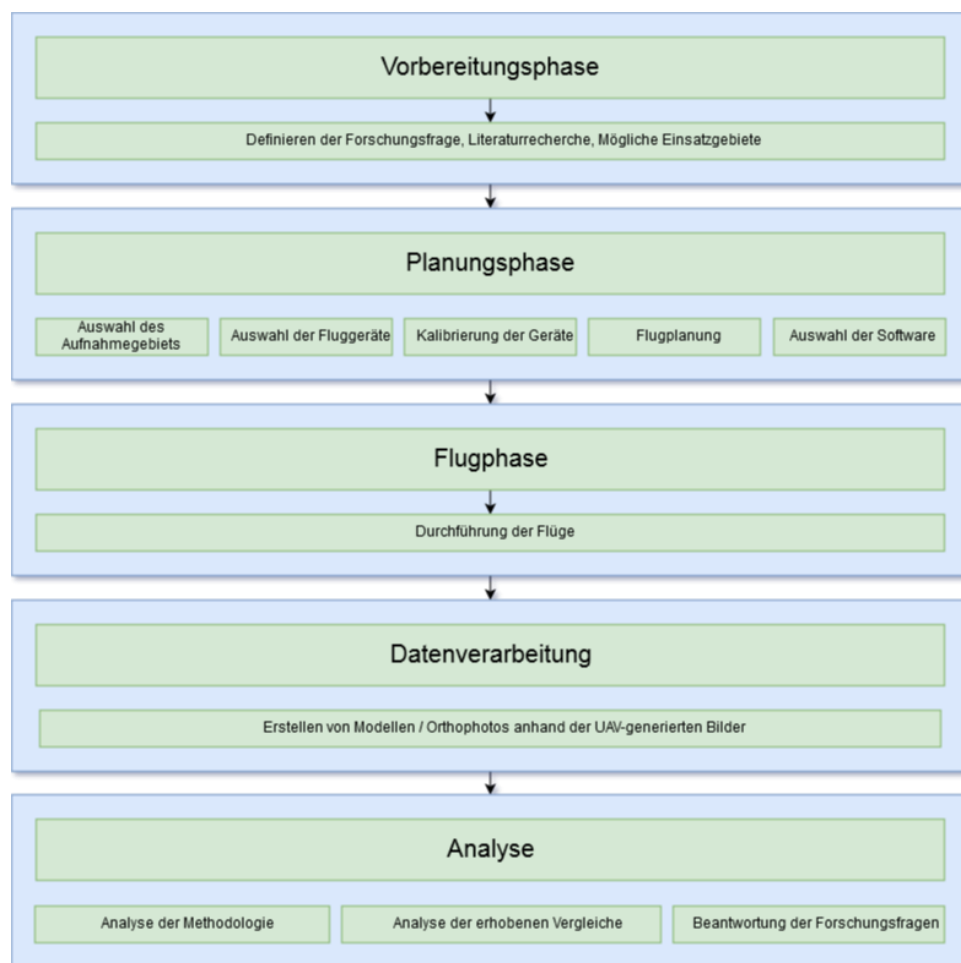


Abbildung 1: Methodologie der Masterarbeit [eigene Abbildung]

Während in Abbildung 1 die Methodologie der gesamten Masterarbeit dargestellt wird, sind in Bezug auf die UAV-Befliegung vor allem die Schritte Planungsphase, Flugphase und Datenverarbeitung wichtig:

- Planungsphase: In der Planungsphase wird das Gebiet ausgewählt und die Flugroute geplant. In diesem Schritt werden auch die zwei nachfolgenden Schritte geplant.
- Flugphase: In diesem Schritt werden die Daten im Gelände akquiriert. In diesem Fall wird also der Flug durchgeführt und Fotos aufgenommen. Um die GPS-Genauigkeit zu erhöhen, werden Ground Control Points gesetzt, welche im nächsten Schritt zur Georeferenzierung genutzt werden.
- Datenverarbeitung: Hier werden die Fotos ausgerichtet, Punktwolken, Geländemodelle und Orthophotos erstellt sowie mit Hilfe der Ground Control Points georeferenziert. In diesem Schritt kommt vor allem ArcGIS Drone2Map zum Einsatz.
- Im Schritt „Analyse“ wird anhand der Ergebnisse eruiert, für welche Kartenelemente sich UAV-Befliegungen am besten eignen, um so die Forschungsfragen zu beantworten.

3 Topographische Kartographie

Bevor die Einsatzmöglichkeiten von UAVs für die topographische Kartographie erhoben werden können, bedarf es einer Definition der topographischen Kartographie. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel behandelt, was die topographische Kartographie ist, woraus eine topographische Karte besteht und wie sie erstellt wird. Dabei werden die einzelnen topographischen Vermessungs- und Aufnahmeverfahren vorgestellt und einander gegenübergestellt.

3.1 Topographische Kartographie

Die topographische Kartographie beschäftigt sich als Teilgebiet der angewandten Kartographie mit der Herstellung und Fortführung von analogen und digitalen topographischen Karten. Die topographische Kartographie schafft somit durch die Herstellung topographischer Karten die Grundlagen für die Erschließung eines Landes, für militärische Zwecke, für die Umweltplanung, die Wissenschaft, die Wirtschaft und die Verwaltung des Landes sowie für die Herstellung anderer Karten [BOL-02].

Auch das Institut für Angewandte Geodäsie definiert die topographische Kartographie als „*Teilgebiet der Kartographie, das sich mit der Bearbeitung und Laufendhaltung von topographischen Karten befasst*“ [INS-99]. Ausführliche Definitionen des Begriffes „topographische Karte“ finden sich im nächsten Kapitel.

Die topographische Kartographie selbst ist eng verbunden mit dem Aufkommen von Regionalkarten im 15. und 16. Jahrhundert sowie mit der Entwicklung der topographischen Aufnahmemethoden und dem Übergang von einer selbst bildhaften zu einer eher abstrakt-geometrischen Darstellung. Zwei Innovationen waren dabei besonders entscheidend für die Entstehung der topographischen Aufnahmen und in weiterer Folge auch für die topographische Kartographie: Nämlich die erste Dreiecksmessung oder Triangulation des Niederländers Willibrord Snellius (1617) sowie die Erfindung des Messtisches (1600). Mit immer genaueren Einzelvermessungen wurde es möglich topographische Gegenstände in einer Grundrissprojektion und nicht – wie davor üblich – aus der Vogelschau darzustellen [HAK-02, S. 535ff.].

3.2 Topographische Karte

Die topographische Kartographie widmet sich – wie im vorigen Kapitel erwähnt – der Erstellung topographischer Karten. Während Konsens darüber besteht, dass die topographische Kartographie der Herstellung und Bearbeitung von topographischen Karten dient, gibt es bei der Definition des Begriffes der topographischen Karte deutlich mehr Abweichungen:

Die internationale kartographische Vereinigung definierte 1973 die topographische Karte als „*Karte, in der Situation, Gewässer, Geländeformen, Bodenbewachsung und eine Reihe sonstiger zur allgemeinen Orientierung notwendiger oder ausgezeichnete Erscheinungen*“

den Hauptgegenstand bilden und durch Kartenbeschriftung eingehend erläutert sind“ [HAK-02, S.417]. Eine deutlich kürzere Definition beschreibt sie als „Karten aller Maßstäbe, in denen die Landschaft charakteristisch vereinfacht dargestellt ist“ [IfAG-71]. Kohlstock beschreibt topographische Karten als Darstellung einer „hauptsächlich maßstabsabhängige Auswahl der natürlichen und künstlichen Objekte der Erdoberfläche mit Hilfe graphischer Elemente“. Des Weiteren unterscheidet Kohlstock zwischen den eigentlichen topographischen Karten und den Bildkarten, wobei die eigentliche topographische Karte ein abstrahiertes Bild (Strichkarte) und die Bildkarte ein photographisches Bild darstellen. [KOH-10, S.77].

Die Gliederung der topographischen Karten basiert meist auf der Maßstabsebene. Folgende Gliederungen werden üblicherweise durchgeführt:

- Topographische Karten im engeren Sinne: Das Ziel ist die Darstellung des Geländes und der damit verbundenen Gegenstände in großen und mittleren Maßstäben. Die Vollständigkeit und Genauigkeit von topographischen Karten sind vom Maßstab abhängig. Die Grenze liegt in etwa bei 1:300.000. Hierbei ergibt sich folgende weitere Unterscheidung:
 - Topographische Grundkarten (bis 1:10.000) als Grundlage für Detailplanungen und als Basiskarte für thematische Darstellungen: Topographische Grundkarten verwenden meist eine grundrisstreue Darstellung.
 - Topographische Spezialkarten (1:20.000 bis 1:75.000): Topographische Spezialkarten verfügen im Gegensatz zu den Grundkarten meist über eine grundrissähnliche Darstellung sowie eine stärkere Farbdifferenzierung [KOH-10, S.77].
 - Topographische Übersichts- oder Generalkarten (ab 1:100.000): Auch hier gibt es betreffend der Maßstabsebene bei verschiedenen Quellen abweichende Angaben. Kohlstock beispielsweise grenzt die topographischen Übersichts- oder Generalkarten mit einem Maßstab von 1:100.000 bis 1:500.000 [KOH-10, S.77], während Hake, Grünreich und Meng 1:100.000 bis 1:300.000 als Abgrenzung anführen [HAK-02, S.417].
 - Wie bereits oben angeführt, können auch Bildkarten auf Basis von Luft- und Satellitenbildern zu den topographischen Karten gezählt werden.
- Topographische Karten im weiteren Sinne – auch als geographische, chorographische oder physische Karten bezeichnet: Das Ziel dieser Karten ist die vereinfachte Darstellung von landschaftlichen Gegebenheiten. Topographische Karten im weiteren Sinne weisen meist einen kleineren Maßstab als 1:300.000 auf und lassen sich weiter in Generalkarten (bis 1:1.000.000), Regional- oder Länderkarten (bis 1:10.000.000) beziehungsweise Erdteil- oder Erdkarten (ab 1:10.000.000) gliedern [HAK-02, S.417].

Topographische Karten werden in folgenden Formen publiziert: Amtliche Kartenwerke, amtliche und private Stadtkarten, touristische Karten, Übersichtskarten, Erdkarten, Atlaskarten, etc.

Für amtliche topographische Kartenwerke ist in Österreich das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) in Wien zuständig. Das BEV veröffentlicht neben Luftbildern und Digitalen Höhenmodellen auch folgende Kartenwerke:

- Österreichische Karte 1:25 000 UTM: Die Österreichische Karte 1:25.000 ist eine vergrößerte Ausgabe der 1:50.000 und wird deshalb zeitgleich mit der 1:50.000-Karte herausgegeben.
- Österreichische Karte 1:50 000 UTM: Die Österreichische Karte 1:50.000-UTM wird zusammen mit dem Institut für Militärisches Geowesen (IMG) veröffentlicht. Grundlage ist das Universale Transversale Mercator (UTM)-System. Einteilung und Benennung folgen dem UTM-System.
- Österreichische Karte 1:250 000: Die ÖK250 wird ebenso wie die ÖK50 gemeinsam mit dem IMG herausgegeben. Dabei handelt es sich um eine offizielle Militärkarte und beinhaltet deshalb zusätzliche Informationen wie Straßenbreite, Engstellen, Durchfahrtshöhen und ähnliches.
- Österreichische Karte 1:500 000: Die Österreichische Karte 1:500.000 ist eine Übersichtskarte des gesamten Bundesgebiets.
- Austrian Map (AMAP): Die Austrian Map stellt auf www.amap.at in verschiedenen Zoomstufen die ÖK50, ÖK250 und ÖK500 dar und kombiniert mit simplen GIS-Funktionen wie Messen.

[vgl. BEV-18].

Die Internationale kartographische Vereinigung führt in ihrer Definition der topographischen Karte die wichtigsten Inhaltsebenen auf. Diese werden im folgenden Kapitel „Karteninhalte“ näher beschrieben.

3.3 Karteninhalte

Die internationale kartographische Vereinigung benennt in ihrer 1973 veröffentlichten Definition der topographischen Karte „*die Situation, Gewässer, Geländeformen, Bodenbewachsung und eine Reihe sonstiger ... Erscheinungen*“ als die wichtigsten Karteninhalte [HAK-02, S.417].

Der Karteninhalt kann zunächst in syntaktischer Hinsicht (Summe der graphischen Darstellungen = Kartenbild) und in semantischer Hinsicht (Summe der Objekte = Kartenthema) unterschieden werden [HAK-02, S.418].

Aus semantischer Sicht kann zwischen Situation und Gelände unterschieden werden:

- Situation: Diese umfasst alle künstlichen und natürlichen Objekte. Zur Situation zählen folgende Objektklassen:
 - Siedlungen: Unter einer Siedlung ist die Ansammlung von Wohn-, Wirtschafts- und öffentlichen Gebäuden zu verstehen. Bis zu einem Maßstab von 1:10.000 werden diese meist grundrisstreu dargestellt. Bei einem kleineren Maßstab werden diese generalisiert.

- Verkehrswege: Die Verkehrswege bezeichnen die Ansammlung von Objekten, die direkt oder indirekt Transportzwecken dienen. Beispiele hierfür sind Autobahnen, Straßen, Wege, Flughäfen, Eisen-, Straßen- oder Seilbahnen sowie dazugehörige Bauwerke. Mit kleiner werdendem Maßstab ist aufgrund der Mindestausdehnung eine maßstabsgetreue Darstellung nicht mehr möglich. Bei einem Maßstab von 1:25.000 ist eine 6m breite Straße beispielsweise bei einer Darstellungsbreite von 1mm bereits viermal so breit wie in der Realität.
 - Gewässer: Als Gewässer wird Ansammlung aller Wasserflächen wie Bäche, Flüsse, Kanäle, Seen, Teiche, Meere etc. Während schmale Wasserläufe einlinig dargestellt werden, werden bei größeren Gewässern die Uferlinien dargestellt.
 - Bodenbedeckungen / Vegetation: Die Darstellung von Vegetation beziehungsweise Bodenbedeckung erfolgt in der topographischen Karte – mit Ausnahme von sehr großmaßstäbigen Karten – nur flächenhaft. Zur Vegetation zählen sowohl natürliche Vegetationsflächen wie Wiesen, Wald oder Moore als auch künstliche Bodennutzung wie Obst- oder Weinbau sowie Gärten, Parks oder Plantagen. Vegetationslose Flächen werden – mit Ausnahme von Sand oder Geröll - nicht dargestellt.
 - Einzelobjekte: Darunter fallen Objekte, die wegen ihrer geringen Ausdehnung nicht grundrisstreu, sondern nur als Signatur dargestellt werden. Dazu zählen beispielsweise Denkmäler, Burgen, Ruinen, Kirchen etc. Neben punkthaften Objekten fallen auch linienhafte Objekte wie Zäune, Mauern, Hochspannungsleitungen, Dämme, Deiche und ähnliches in diese Kategorie [KOH-10, S.83ff].
- Geländedarstellung: Ein wichtiges Element einer topographischen Karte ist die Darstellung des Geländes oder des Reliefs. Darunter versteht man die „*Gestalt der festen Erdoberfläche*“. Diese ist im Gegensatz zur Situation ein Kontinuum [vgl. AHN-96]. Ausnahmen stellen abrupte Geländeänderungen wie Böschungen, Gräben oder ähnliches dar. In frühen Geländedarstellungen wurden zunächst Seitenansichten und später Schrägansichten verwendet. Erst mit zunehmendem technischen Fortschritt konnte eine Orthogonaldarstellung realisiert werden. Diese Ansicht von oben ist immer noch die vorherrschende Darstellung des Reliefs.
 - Höhenlinien: Eine Höhenlinie (Isohypse) „*verbindet alle Punkte gleichen lotrechten Abstands von einer Bezugsfläche*“ [KOH-10, S.92]. Dabei bezeichnet die Höhenlinie eine gedachte Linie, die das Gelände bei gleichem Abstand zur Bezugsfläche schneidet. Die Höhenlinie wird erst seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts in großem Maßstab eingesetzt, da eine genaue und systematische Messung von Höhenpunkten vorher technisch nicht möglich war [KOH-10, S89ff].
 - Schummerung / Schattenplastik: Mit Hilfe von Schatteneffekten sollen Geländeformen möglichst plastisch dargestellt werden. Das Gestaltungsprinzip der Schummerungen lässt sich am besten folgendermaßen erklären: Ein Geländemodell wird von einer meist von links oben kommender Lichtquelle beleuchtet. Je nach Neigung entstehen

unterschiedliche Schattentöne, welche in die Karte übertragen werden. Schummerungen werden in etwa bis zu einem Maßstab von 1:500.000 mit Höhenlinien kombiniert. Bei kleinmaßstäbigeren Karten werden häufig nur Schummerungen, oftmals in Kombination mit Höhenzahlen, als Geländedarstellung verwendet [HAK-02, S.430].

- Gelände- bzw. Kleinformen: Gelände- oder Kleinformen bezeichnen künstliche und natürliche Elemente wie Fels, Geröll, Moränen, Böschungen, Kiesgruben und ähnliches. Diese Objekte sind meist zu klein, um mit Hilfe von Höhenlinien oder Schummerungen dargestellt werden zu können. Häufig stellt auch die Akkumulation der Objekte ein Charakteristikum dar. Die Felsdarstellung nimmt innerhalb der topographischen Hochgebirgskartographie eine Sonderstellung ein: Vor allem in der Schweizer Karte führt die bei der Felsdarstellung verwendete Schraffenmethode in Kombination mit Höhenlinien und Schräglichtschummerung zu einem äußerst plastischen Geländeeindruck [KOH-10, S.100f].

Die von Arnberger und Kretschmer beschriebenen weiteren Inhalte wie Namensgut und Blattrandausstattung werden im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt [ARN-75, S.235].

3.4 Topographische Vermessungen und Aufnahmeverfahren

Die Topographie bzw. die topographischen Erfassungsmethoden fassen „*alle Verfahren zur Erfassung der natürlichen und künstlichen Objekte der Erdoberfläche von der Aufnahme bis zur Präsentation der Ergebnisse*“ zusammen [KOH-10, S.42].

Topographische Vermessungen werden für verschiedene Zwecke durchgeführt, wie zum Beispiel für die Erfassung des Staatsgebiets und die Bereitstellung der Basisdaten als digitale Landschaftsmodelle oder für topographischer Karten, die Herstellung von Planungsunterlagen, die Rohstoffgewinnung im Tagebau oder die Dokumentation archäologischer Stätten [KOH-11, S.1ff]. Das Ziel der Erfassung ist dabei die Erfassung von Situation (Verkehrswege, Gewässer, Siedlungen, Einzelobjekte, Vegetation) und Gelände.

Generell kann zwischen terrestrisch-topographischen Vermessungsmethoden sowie der topographischen Vermessung mittels Fernerkundung unterschieden werden. Im Folgenden werden die einzelnen Vermessungsmethoden zusammengefasst:

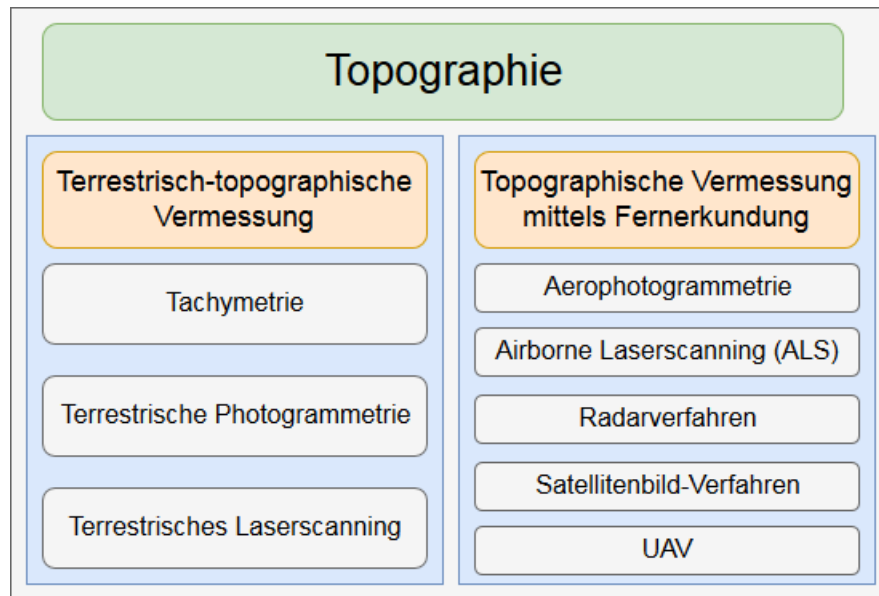


Abbildung 2: Übersicht der topographischer Vermessungsverfahren [eigene Abbildung nach KOH-11]

3.4.1 Topographische Vermessungsverfahren mittels Fernerkundung

Die tachymetrischen Verfahren waren mehrere Jahrhunderte das Standardaufnahmeverfahren der Topographie. Seit den 1930er Jahren wurde es jedoch zunächst von der Aerophotogrammetrie und in weiterer Folge von Satellitenbild-Verfahren abgelöst. Dabei bezeichnet die Fernerkundung „*alle Verfahren, bei denen sich der Aufnahmesensor in größerer Entfernung vom Objekt (hier der Erdoberfläche) befindet und die Objektinformationen aus der von dort remittierten elektromagnetischen Strahlung abgeleitet werden*“ [KOH-11, S.61].

Somit ist die Fernerkundung ein indirektes Beobachtungsverfahren. Das Messgerät befindet sich in einiger Entfernung zum Messobjekt und misst die vom Messobjekt reflektierte oder emittierte Strahlung. Fernerkundung umfasst „*jene Verfahren, welche zur Gewinnung von Informationen die elektromagnetische Strahlung benutzen, die von einem ... Objekt abgestrahlt wird, die Empfangseinrichtungen für diese Strahlung in Luftfahrzeugen oder Raumfahrzeugen mitführen und zur Beobachtung der Erdoberfläche, der Meeresoberfläche oder der Atmosphäre dienen*“ [ALB-01, S.1].

Dementsprechend stimmen die von Kohlstock beschriebenen Fernerkundungsmethoden (Aerophotogrammetrie, Airborne Laserscanning, Radarverfahren und Satellitenbildverfahren) mit dieser Definition überein.

Dabei verweist Kohlstock darauf, dass sich die einzelnen Verfahren nicht nur hinsichtlich der einzelnen Spektralbereiche unterscheiden, sondern auch methodisch. So verwenden ALS und das Radarverfahren aktive Sensoren. Es werden hier also sowohl Sender als auch Empfänger zum Informationsgewinn eingesetzt. Bei der Luftbildphotogrammetrie, Satellitenbildverfahren und beim Einsatz von UAV werden hingegen passive Sensoren eingesetzt und somit nur die reflektierte Strahlung registriert [KOH-11, S. 61f]. Allerdings

können Laserscanner auch auf UAVs befestigt werden, so dass UAVs sowohl aktive als auch passive Sensoren einsetzen können.

In folgenden Unterkapitel sollen die theoretischen Grundlagen der Fernerkundung und die einzelnen Verfahren kurz beschrieben werden. Dem Thema UAV, die per definitionem ebenfalls zu den Fernerkundungsverfahren gezählt werden können, wird ein eigenes Kapitel gewidmet, um genauer auf dieses Thema eingehen zu können.

3.4.1.1 Physikalische Grundlagen der Fernerkundung

Die Deutsche Industrienorm (DIN) definiert Fernerkundung als „...*die Gesamtheit der Verfahren zur Gewinnung von Informationen über die Erdoberfläche oder anderer nicht direkt zugänglicher Objekte durch Messung und Interpretation der von ihr ausgehenden (Energie-) Felder. Als Informationsträger dient dabei die reflektierte oder emittierte elektromagnetische Strahlung*“ [GEO-18].

Elektromagnetische Strahlung bezeichnet ein sich periodisch änderndes elektromagnetisches Feld, das sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegt. Definiert wird die elektromagnetische Strahlung durch die Frequenz (ν) oder durch die Wellenlänge (λ), wobei in der Fernerkundung die Wellenlänge die gängigere Charakterisierung ist.

In der Fernerkundung werden Nanometer (nm, $1 \cdot 10^{-9}$ m), Mikrometer (μm , $1 \cdot 10^{-6}$ m) oder Millimeter (mm, $1 \cdot 10^{-3}$ m) als Einheiten für die Messung verwendet. Als elektromagnetisches Spektrum wird dabei die Gesamtheit der elektromagnetischen Strahlung bezeichnet. Der sichtbare Bereich des Spektrums liegt zwischen 400 und 700 nm, jedoch ist der nicht sichtbare Bereich des Spektrums für die Fernerkundung nicht minder interessant. Hierfür wird der Bereich zwischen dem nahen Ultraviolett und dem mittleren Infrarot sowie dem Mikrowellenbereich herangezogen.

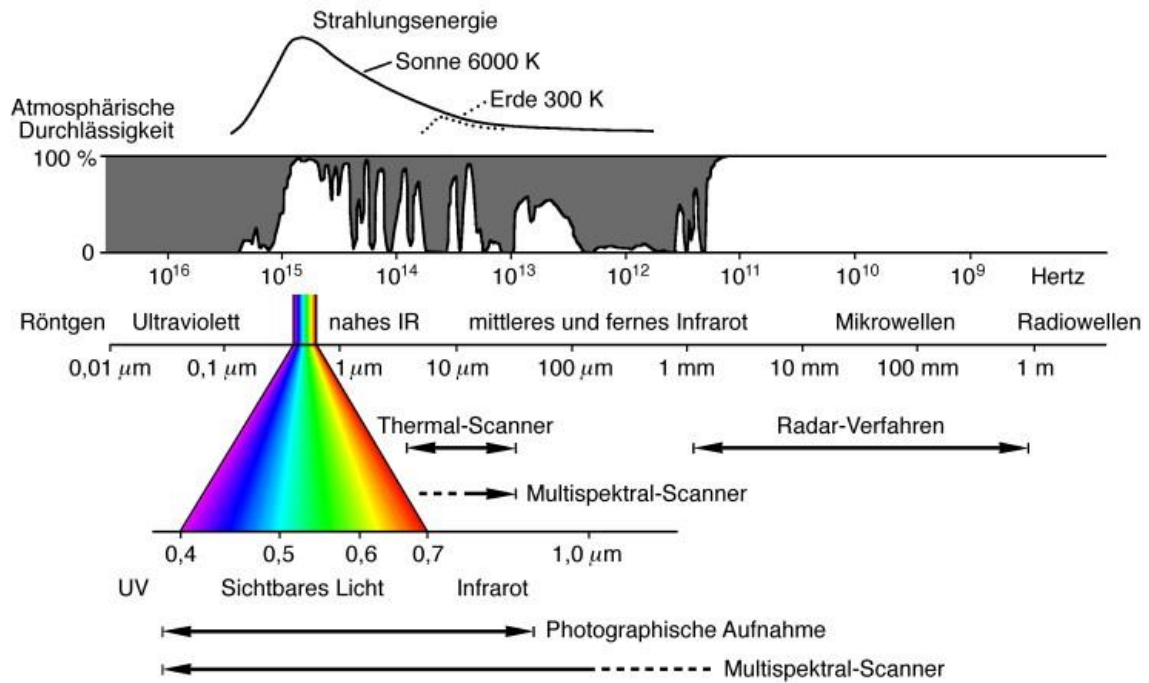


Abbildung 4: Elektromagnetisches Spektrum sowie die verschiedenen Bereiche der einzelnen Sensoren [ALB-01, S.11]

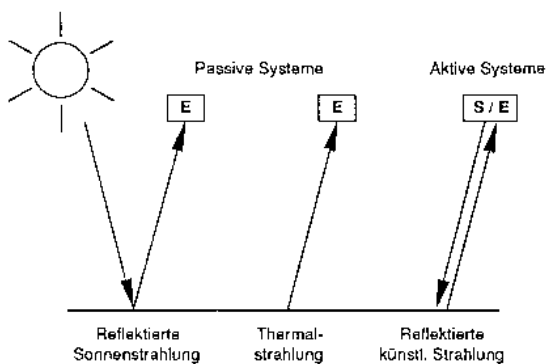


Abbildung 3: Unterscheidung zwischen passivem und aktivem System [ALB-01, S.10]

Bei Fernerkundungssystemen wird zwischen passiven und aktiven Systemen unterschieden. Während passive Systeme reflektierte Sonnenstrahlung oder Thermalstrahlung erfassen, senden aktive Systeme, wie zum Beispiel Laserscanner, „aktiv“ künstliche Strahlung aus und registrieren die reflektierte Strahlung.

Fernerkundungsverfahren registrieren also emittierte und reflektierte Strahlung. Die Art der Reflexion ist allerdings stark abhängig

von den Oberflächeneigenschaften. Es kann dabei zwischen spiegelnder Reflexion, diffuser Reflexion und gemischter Reflexion unterschieden werden. Die spiegelnde Reflexion tritt häufig an Wasserflächen auf und ist in der Fernerkundung unerwünscht. Optimal wäre die diffuse Reflexion, bei der die Strahlung in alle Richtungen reflektiert wird. In der Natur kommt es jedoch häufig zu einer Mischform, bei der die Strahlung zwar in alle Richtungen zurückgeworfen wird, jedoch in bestimmte Richtungen stärker als in andere.

Eine besondere Bedeutung in der Fernerkundung hat der Reflexionsgrad ρ sowie dessen Abhängigkeit von der Wellenlänge der Strahlung. Je nach Oberfläche reflektieren Objekte Strahlung mit einer gewissen Wellenlänge unterschiedlich stark. Daraus ergeben sich wie auf Abbildung 5 charakteristische Reflexionskurven [ALB-01, S.17ff].

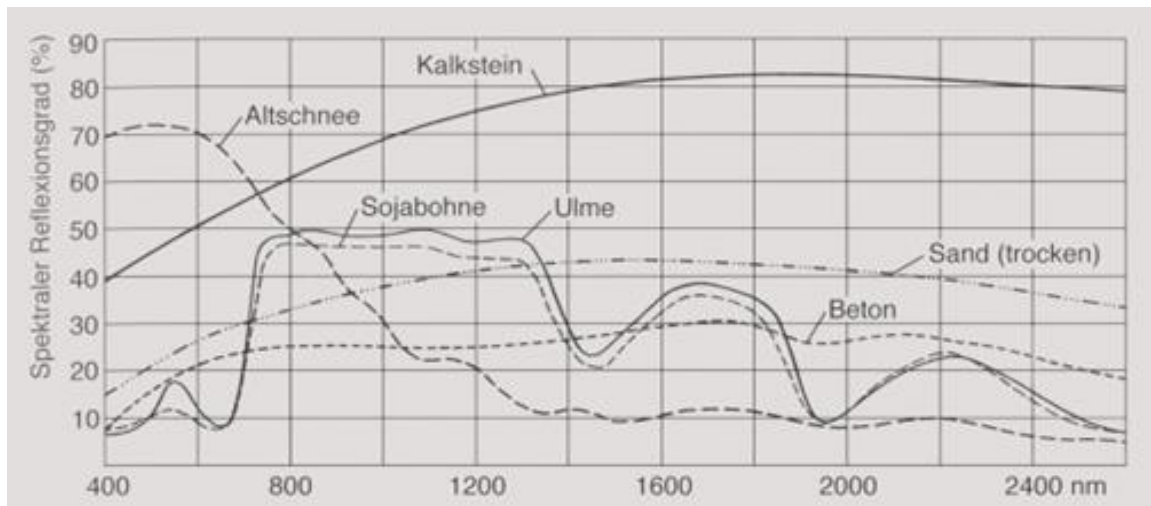


Abbildung 5: Reflexionskurven unterschiedlicher Objekte [ALB-01, S.18]

3.4.1.2 Aerophotogrammetrie

Die Luftbildvermessung oder Aerophotogrammetrie beschäftigt sich mit der Aufnahme und Auswertung von Luftbildern, die meist von Flugzeugen aus, aufgenommen werden. Erkenntnisobjekt der Aerophotogrammetrie ist dabei die geometrische Information (Ausmessung und Rekonstruktion von Objekten) sowie die semantische Information der Objekte (also die Interpretation ihrer Zustände und Veränderungen).

Bei einem Luftbild wird die reflektierte, elektromagnetische Strahlung auf einem strahlungsempfindlichen Sensor registriert und in weiterer Folge als sichtbares Bild abgespeichert. Dabei wird reflektiertes Sonnenlicht im sichtbaren ($0,38 - 0,72 \mu\text{m}$) und nahen Infrarotbereich ($0,72 - 0,90 \mu\text{m}$) aufgenommen [KOH-11, S. 63].

Da Luftbilder mit Hilfe eines Objektivs aufgenommen werden, ist die Abbildung eine Zentralprojektion: Im Gegensatz zur Parallelprojektion ist das Gelände nicht senkrecht auf eine horizontale Bezugsfläche projiziert, sondern zum Bildrand hin nehmen Verzerrungen zu, während sie in der Bildmitte nicht vorhanden sind [ALB-01, S. 73].



Abbildung 6: Parallelprojektion und Zentralprojektion im Vergleich [ALB-01, S.73]

Durch Georeferenzierung beziehungsweise Transformation können die Luftbilder entzerrt werden und so eine Parallelprojektion erstellt werden. Notwendig ist hierfür die Kenntnis der inneren Orientierung (Form des Aufnahmestrahlenbündels, von der Kamera abhängig) sowie der äußeren Orientierung (Lage des Aufnahmegeräts in einem übergeordneten Referenzsystem, wobei hier die Kenntnis über die Lage und die Neigung gegenüber dem Referenzsystem notwendig ist). Sofern die innere und die äußere Orientierung bekannt sind, lassen sich die Koordinaten beliebiger Objektpunkte im Bild berechnen. Dies geschieht durch Umformung der Kollinearitätsgleichungen. Hierfür werden aber mindestens zwei Bilder benötigt. [KOH-11, S. 64f].

In der Regel wird jedoch bei jedem Flug nicht nur eine einzelne Aufnahme gemacht, sondern eine Reihe von Luftbildern, wofür mehrere Flugstreifen benötigt werden. Die Anzahl der Flugstreifen ist abhängig von der Größe des Aufnahmegebiets, dem Bildformat beziehungsweise der Zeilenlänge (bei Zeilenkameras) sowie dem ermittelten Bildmaßstab. Es wird empfohlen, die Befliegung in Ost-West-Richtung durchzuführen, da Schatten, die bei Befliegungen in Nord-Süd-Richtung entstehen, negativen Einfluss auf die Stereobetrachtung beziehungsweise die Bildkorrelation haben. Für die Erstellung eines Orthophotos sollte mindestens eine Überlappung in Längsrichtung von 60% sowie in Querrichtung von 20% erfolgen. Für eine Aerotriangulation, welche für Bildauswertungen notwendig ist, sind Längsüberlappungen von 80% sowie Querüberdeckungen von 60% sinnvoll.

Sind keine flächenhaften, sondern linienhafte Objekte aufzunehmen, so ist ein Puffer von rund 20% zu verwenden. Die Überlappung ist analog zu den flächenhaften Objekten zu wählen. In den meisten Fällen erfolgt dies mit Hilfe der mit gelieferter Software des Kameraherstellers.

Bei der Flugaufnahme ist auf den Flug (Bildflugnavigation) selbst, den Kamerabetrieb sowie die Bestimmung der äußeren Orientierung zu achten. Heute erfolgt die Bildflugnavigation nicht mehr auf Sicht wie es bis in die 1990er Jahre Usus war, sondern mit Hilfe von GPS-Geräten. Für die Lage- und Neigungsbestimmung wird ein Inertiales Navigationssystem (INS) verwendet, welches in Kombination mit dem GPS eine Genauigkeit im Dezimeterbereich ermöglicht. Zum Einsatz kommen meist drei Personen (Pilot, Navigator und Kamerabediener). Flüge sollten in der nicht belaubten Jahreszeit (Frühjahr oder Herbst) und bei klaren dunstfreien Sichtverhältnissen stattfinden.

Ist die äußere Orientierung nicht ausreichend, so sind für die Georeferenzierung Passpunkte (Lage-/Höhenpasspunkte) notwendig [KOH-11, S. 100ff]. Mit Hilfe von verschiedenen Softwares wie ERDAS Imagine [HEX-18], LiMapper [GRE-18] oder Pix4D [PIX-18a] werden die Einzelbilder im Anschluss in Orthophotos umgewandelt und analysiert.

Die Orthophotos können in weiterer Folge auch für topographische Karten genutzt werden: Mit Hilfe von objekt-orientierter Klassifikation von Orthophotos wird beispielsweise die digitale Katastralmappe (DKM) des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen (BEV) aktualisiert. Das BEV verwendet hierfür Echtfarben-Orthophotos mit einer hohen räumlichen Auflösung (Dezimeterbereich). Das objekt-orientierte Klassifikationsverfahren [vgl. BLA-10] ermöglicht die „Klassifikation von Bildobjekten aufgrund der Eigenschaften (spektrale Werte, Form, Nachbarschaften, usw.) vorher identifizierter Bildsegmente“ [STE-

07, S.3]. Über die Zuordnung dieser Bildobjekte werden Regeln aufgestellt. Dabei werden Objekte nach einem mehrstufigen Verfahren Klassen zugewiesen, die sich aus den einzelnen RGB-Kanälen und der Helligkeit ergeben. Die in Abbildung 7 gezeigten Klassifikationsergebnisse wurden jedoch nicht direkt in die DKM übernommen, sondern dienten den Bearbeitern als Entscheidungshilfe zur Aktualisierung.

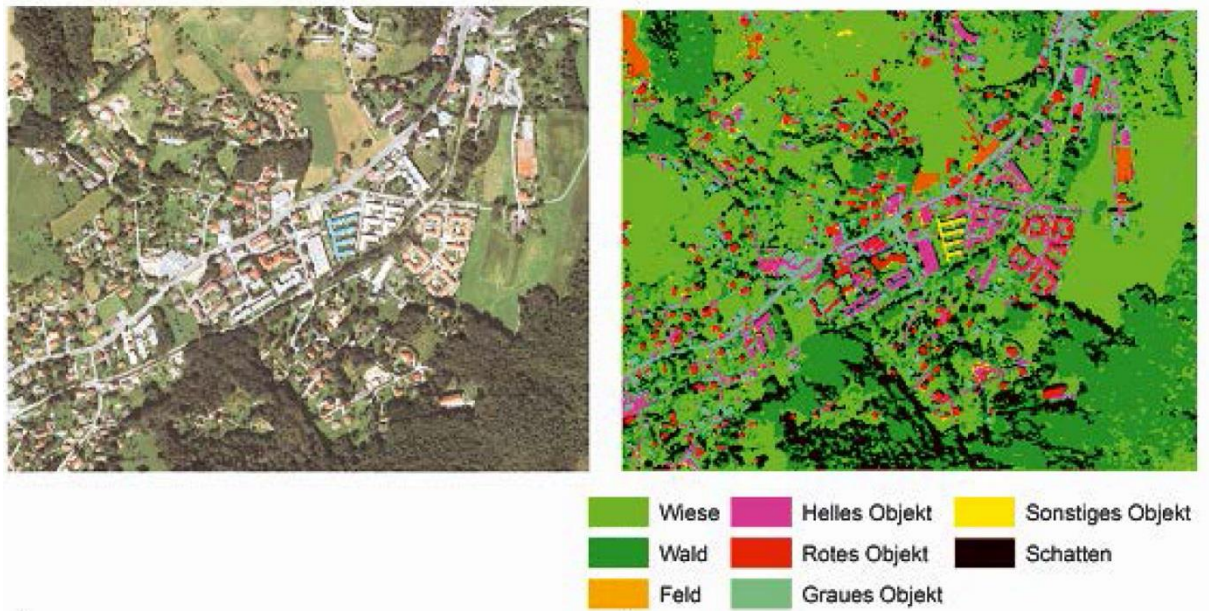


Abbildung 7: Einteilung eines Orthophotos (links) in mehrere Klassen, welche im Anschluss als Informationshilfe für die Aktualisierung der DKM dienen. [STE-07,S.8]

Vorteile	Nachteile
Hohe Lagegenauigkeit	Hohe Erstellungs- und Beschaffungskosten
Große Aufnahmefläche	Hohe regulative Einschränkungen
Verschiedene Spektralbereiche möglich (hohe radiometrische Auflösung)	Wiederholung des Fluges schwer möglich
	Wetterabhängig

3.4.1.3 Airborne Laserscanning (ALS)

Das Airborne Laserscanning ist das flugzeuggetragene Gegenstück zum terrestrischen Laserscanning (TLS). Ebenso wie beim TLS wird auch beim ALS die Laser-Distanzmessung eingesetzt.

Dabei besteht der Laserscanner aus dem eigentlichen Scanner (Sender und Empfänger) sowie der GPS- und der INS-Einheit. Der Sender emittiert Strahlung, welche vom Gelände reflektiert und vom Empfänger registriert wird. Die reflektierte Strahlung ist jedoch stark von der Oberflächenbeschaffenheit des Geländes beziehungsweise der darauf befindlichen Objekte abhängig.

Durch die Lagebestimmung kann in weiterer Folge die Lage jedes Punktes bestimmt werden. In Abbildung 8 wird das Prinzip des Airborne Laserscannings deutlich.

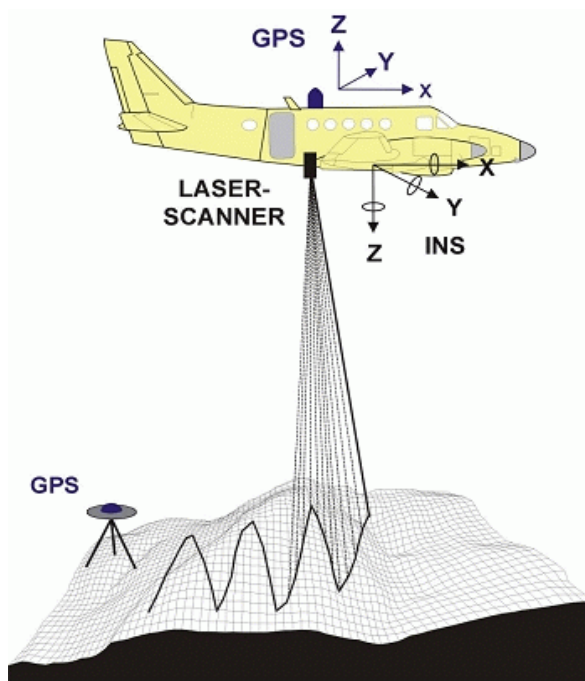


Abbildung 8: Prinzip des Airborne Laserscannings [WIE-18].

Um die Abweichung des Laserstrahls zu ermöglichen, werden verschiedene Spiegelmodelle (siehe Abbildung 9) eingesetzt:

- **Schwingspiegel:** Ein oszillierender Spiegel führt zu einer sinusförmigen Verteilung der Messpunkte. Die Auslenkung des Spiegels ermöglicht die Anpassung an Flughöhe und Streifenbreite.
- **Polygonspiegel:** Ein sich gleichmäßig drehender Polygonspiegel führt zu einer gleichmäßigen, parallelen Punktverteilung.
- **Faserscanner:** Die Laserimpulse werden durch mehrere Glasfaserbündel gesendet und empfangen. Zur Optimierung der Verteilung können diese Glasfaserbündel in Schwingungen versetzt werden.

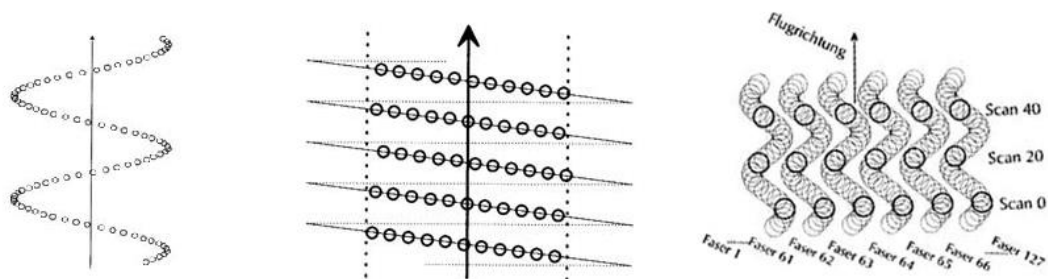


Abbildung 9: Vergleich der Punktverteilung von Schwingspiegel, Polygonspiegel und Faserscanner (v.l.) [KOH-11, S.114ff]

Trifft ein Laserstrahlbündel auf ein Objekt auf der Geländeoberfläche, so werden Teile des Laserstrahls reflektiert und somit kurz aufeinander folgende Echoimpulse registriert. Moderne Scanner nehmen in der sogenannten Full-Waveform-Registrierung alle

Mehrfachreflexionen sowie deren Intensität auf. Dadurch kann sowohl ein Digitales Geländemodell (DEM), also die Geländeoberfläche ohne die darauf befindlichen Objekte, sowie ein Digitales Oberflächenmodell (DSM), also ein Geländemodell inklusive der darauf befindlichen Objekte, aufgenommen werden. Dadurch eignen sich ALS-Aufnahmen nicht nur für Geländemodelle (DEM), sondern auch für Oberflächenmodelle (DSM) sowie für die Aufnahme digitaler Stadtmodelle.

Beim ALS-Verfahren werden also analog zur Aero-Photogrammetrie das Aufnahmegerät selbst sowie GPS- und INS-Einheit verwendet, um die äußere Orientierung zu ermitteln. Ebenso wie bei der Photogrammetrie werden auch beim ALS-Verfahren mehrere überlappende Flugstreifen aufgenommen. Aus der Aufnahme entsteht eine Punktwolke mit allen registrierten Punkten inklusive Gelände, Situation und Vegetation. Für ein Geländemodell werden die Last-Pulse-Signale – also die letzten registrierten Impulse eines Laserstrahlbündels – herangezogen. Mit Hilfe verschiedener Algorithmen wird die Klassifikation von Situation und Vegetation vorgenommen [KOH-11, S. 110ff].



Abbildung 10: Beispiele für mit ALS generierten Gelände- beziehungsweise Oberflächenmodellen (Auflösungen: 100 bzw. 50cm) der Stadt Wien [WIE-18b/c].

Vorteile	Nachteile
Hohe Auflösung	Hohe Aufnahmekosten
Wetterunabhängig	Hohe Anschaffungskosten
Große Aufnahmefläche möglich	Hoher Nachbearbeitungsaufwand
Für Gelände- und Oberflächenmodell einsetzbar (dadurch auch für Stadtmodelle etc.)	

3.4.1.4 Radarverfahren

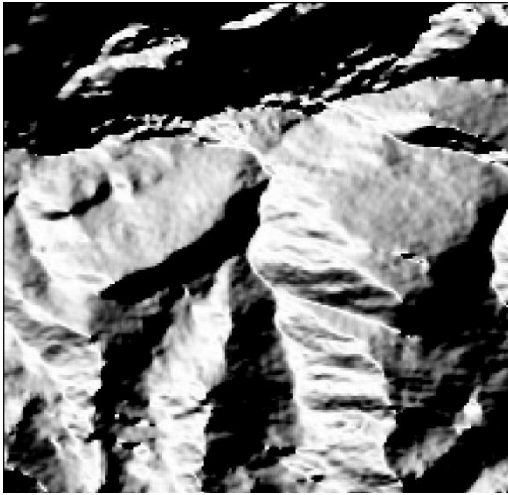


Abbildung 11: Ein Beispiel für eine aus SRTM-Daten generierte Geländeschummerung im Maßstab 1:100.000. Datenquelle: www.earthexplorer.usgs.gov

Beim Radarverfahren werden künstlich erzeugte Mikrowellen zur Geländeerfassung verwendet. Dadurch werden Geländeaufnahmen wetter- und tageszeitunabhängig durch dichte Vegetation hindurch ermöglicht. Von einem Flugzeug oder einem Satellit, auf dem sich sowohl Sender als auch Empfänger befinden, wird ein Mikrowellenimpuls ausgesandt, an der Oberfläche reflektiert und am Empfänger registriert. Wie beim Laserscanning wird sowohl die Laufzeit als auch die Intensität registriert. Zu Beginn des Einsatzes des Radarverfahrens wurde – wie bei der Photogrammetrie und dem Laserscanning – streifenförmig aufgenommen; das Radarinterferometrieverfahren ermöglicht mittlerweile auch eine flächenhafte Aufnahme [KOH-11, S.132].

Ein Beispiel für das satellitengestützte Radarverfahren ist Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): SRTM wurde 2000 von der NASA mit dem Ziel gestartet, ein weltweit homogenes Geländemodell zu erhalten, da es sowohl bei der Verfügbarkeit als auch bei der Qualität von Geländeinformationen gravierende Unterschiede gegeben hat. SRTM ist ein polarumlaufender Satellit, der sich in einer Höhe von etwa 233 Kilometern befindet. Polarumlaufende Satelliten umkreisen die Erde in einem bestimmten Zyklus – im Fall von SRTM in 9,8 Tagen. Seit 2015 sind alle Aufnahmen in einer Auflösung von einer Bogensekunde (ca. 30m) verfügbar. Davor waren Aufnahmen außerhalb der USA nur in einer Auflösung von drei Bogensekunden (ca. 90m) verfügbar [FAR-07, S.1ff].

Vorteile	Nachteile
Wetter- und tageszeitunabhängig	Im Vergleich zu ALS geringe räumliche Auflösung
Große Aufnahmefläche	Keine Oberflächenmodelle möglich
Für Endanwender kostenfrei	Keine Situations- beziehungsweise Vegetationsaufnahmen möglich
Auflösung für die meisten topographischen Karten ausreichend	
Regelmäßiger Aufnahmezyklus	

3.4.1.5 Satellitenbildverfahren

Satellitenbilder sind „Bilder der Erdoberfläche, die von bemannten oder unbemannten Satelliten aus gewonnen werden. Dabei wird kein Unterschied gemacht, ob es sich um photographische Aufnahmen handelt oder um die Ergebnisse von anderen Aufnahmetechniken der Fernerkundung, soweit diese zu einer bildhaften Darstellung der Erdoberfläche führen“ [ALB-01, S.2]. Diese dienen nicht der topographischen Vermessung selbst, stellen aber eine Möglichkeit dar, mit Hilfe von Bildern topographische Informationen zu erhalten.

Fernerkundungssatelliten wie LANDSAT, SENTINEL, SPOT, IKONOS, GeoEye, Quickbird oder ASTER sind mit optisch-mechanischen Multispektralscannern bestückt und senden die Daten im Anschluss an eine Empfangsstation auf der Erde.

In der untenstehenden Tabelle werden die spektralen und räumlichen Auflösungen von Landsat 8 und Sentinel 2 gegenübergestellt:

	LANDSAT8		SENTINEL2	
	Spektral	Räumlich	Spektral	Räumlich
Band 1	0,435-0,451 (Ultra Blau)	30	0,443 (Ultra Blau)	60
Band 2	0,452-0,512 (Blau)	30	0,490 (Blau)	10
Band 3	0,533-0,590 (Grün)	30	0,560 (Rot)	10
Band 4	0,636-0,673 (Rot)	30	0,665 (Rot)	10
Band 5	0,851-0,879 (NIR)	30	0,705 (NIR)	20
Band 6	1,566-1,651 (SWIR1)	30	0,740 (NIR)	20
Band 7	2,107-2,294 (SWIR2)	30	0,783 (NIR)	20
Band 8	0,503-0,673 (Panchromatisch)	15	0,842 (NIR)	10
Band 9	1,363-1,384 (Cirrus)	30	0,865 (NIR)	20
Band 10	10,60-11,19 (TIRS1)	100 * 30	0,940 (NIR)	60
Band 11	11,50-12,51 (TIRS2)	100 * 30	1,375 (Cirrus)	60
Band 12	-	-	1,610	20
Band 13	-	-	2,190	20

Vergleich von LANDSAT8 und SENTINEL2 [USG/ESA-18].

Durch die hohe spektrale und räumliche Auflösung der einzelnen Satellitenbilder ergeben sich zahlreiche Anwendungsbereiche zum Beispiel für die Geomorphologie, die Geologie, die Bodenkunde, die Forst- und Landwirtschaft, die Biologie, die Archäologie, die Ozeanographie, die Meteorologie und Klimaforschung und viele andere mehr.

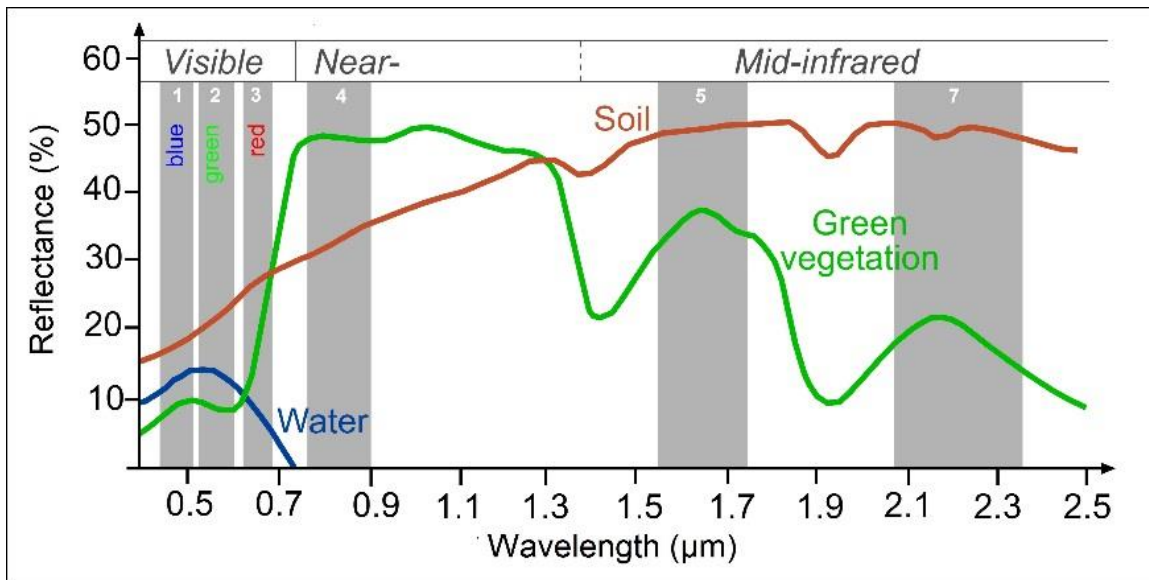


Abbildung 12: Reflexion von Wasser, Boden und Vegetation in verschiedenen Wellenlängen sowie den LANDSAT Kanälen 1,2,3,4,5 und 7. [SEO-18]

Satellitenbilder bieten aber auch für die topographische Kartographie ein großes Potential. Denn einerseits ist die geometrische Information durch die räumliche Auflösung zumindest in mittleren und kleinen Maßstäben klar ersichtlich, andererseits lässt sich die inhaltliche Information durch die hohe spektrale Auflösung zum großen Teil auslesen [ALB-01, S.176ff]. Die hohe spektrale Auflösung ermöglicht Objekte – vor allem Vegetation, Gewässer oder Siedlungen – zuverlässig zu klassifizieren. Ein weiterer Vorteil ist die hohe Aktualisierungsrate von einigen Tagen bis wenigen Wochen.

Vorteile	Nachteile
Große Aufnahmefläche	Für große Maßstäbe noch zu geringe räumliche Auflösung
Hohe räumliche und spektrale Auflösung	Bei Bewölkung sind die Aufnahmen oft nicht verwendbar
Hoher Aktualisierungsrate	
Für den Anwender kostenfrei (zumindest LANDSAT und SENTINEL)	

3.4.2 Gegenüberstellung der topographischen Aufnahmeverfahren

Dieses Kapitel dient dem Vergleich der verschiedenen topographischen Aufnahmeverfahren. Die Eigenschaften sowie Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden werden in Form einer Tabelle dargestellt. Auch die im nächsten Kapitel näher vorgestellten UAVs sind darin bereits enthalten.

	Beschreibung	Vorteile	Nachteile
Tachymetrie	Das Messtischverfahren wurde von satellitengestützten GNSS-Aufnahmen sowie der Polaraufnahme ersetzt. Mit Hilfe von GNSS werden Koordinaten digital aufgenommen.	○ Hohe Genauigkeit ○ Aufnahme in von Satelliten abgeschirmten Bereichen möglich	○ Kleine Abbildungsfläche ○ Lange Aufnahme- und Auswertedauer
Terrestrische Photogrammetrie	Bei der terrestrischen Photogrammetrie werden analog zur Aerophotogrammetrie überlappende Fotos aufgenommen und zu einem 3D-Modell zusammengesetzt. Dieses Verfahren wird jedoch in der Topographie nur selten eingesetzt.	○ Hohe Genauigkeit	○ Kleine Abbildungsfläche
Terrestrisches Laserscanning	Beim terrestrischen Laserscanning wird mit Hilfe eines Lasers mit hoher Frequenz die Distanz zum Objekt gemessen und der Laserstrahl immer wieder vertikal und horizontal abgelenkt. Durch die Aufnahme der Reflexionseigenschaften können die Punkte bestimmten Oberflächen (z.B. Vegetation, Gebäuden, etc.) zugeordnet werden.	○ Extrem hohe Genauigkeit ○ Besonders geeignet für Gelände- und Gebäudeaufnahme	○ Lange Aufnahme- und Auswertedauer ○ Hohe Anschaffungskosten
Aero-photogrammetrie	Mit Hilfe von Kameras oder Multispektralscannern werden überlappende Luftbilder von einem Flugzeug aus aufgenommen und im Anschluss zu einem Orthophoto zusammengesetzt.	○ Hohe Lagegenauigkeit ○ Große Aufnahmefläche ○ Verschiedene Spektralbereiche möglich (hohe radiometrische Auflösung)	○ Hohe Erstellungs- und Beschaffungskosten ○ Hohe regulative Einschränkungen ○ Wiederholung des Fluges schwer möglich ○ Wetterabhängig

Airborne Laserscanning	Das Airborne Laserscanning ist das flugzeuggetragene Gegenstück zum terrestrischen Laserscanning.	○ Hohe Auflösung ○ Wetterunabhängig ○ Große Aufnahme­fläche möglich ○ Für Gelände- und Oberflächenmodell einsetzbar (dadurch auch für Stadtmodelle etc. geeignet)	○ Hohe Aufnahme - und Anschaffungskosten ○ Hoher Nachbearbeitungs­aufwand ○ Nur Gelände-, Vegetations- und Gebäudeaufnahmen möglich
Radarverfahren	Beim Radarverfahren werden von einem Satelliten künstlich erzeugte Mikrowellen zur Geländeerfassung eingesetzt.	○ Wetter- und tageszeit-unabhängig ○ Große Aufnahme­fläche ○ Für Endanwender kostenfrei ○ Auflösung für die meisten topographischen Karten ausreichend ○ Regelmäßiger Aufnahmezyklus	○ Im Vergleich zu ALS geringe räumliche Auflösung ○ Keine Oberflächenmodelle möglich ○ Keine Situations-beziehungsweise Vegetations-aufnahmen möglich
Satellitenbild-Verfahren	Mit Hilfe von Multispektralscannern, welche auf erdumkreisenden Satelliten montiert sind, werden in regelmäßigem Abstand Aufnahmen erstellt.	○ Große Aufnahme­fläche ○ Hohe spektrale, akzeptable räumliche Auflösung ○ Hoher Aktualisierungs-zeitraum ○ Für den Anwender kostenfrei (zumindest LANDSAT und SENTINEL)	○ Für große Maßstäbe noch zu geringe räumliche Auflösung ○ Bei Bewölkung sind die Aufnahmen oft nicht verwendbar
UAVs	Ähnlich wie bei der Aerophotogrammetrie können auf UAVs montierte Kameras für die Erstellung von Orthophotos und 3D-Daten genutzt werden.	○ Geringe Kosten ○ Geringe Aufnahmedauer ○ Hohe räumliche Auflösung ○ Möglichkeit, kostengünstig 3D-Daten aufzunehmen	○ Geringe Aufnahme­fläche ○ Mit Kameras ausgestattete UAVs verfügen nur über eine geringe spektrale Auflösung ○ Strenge Regulierungen ○ Hohe Wetterabhängigkeit

3.4.3 Terrestrisch-topographische Vermessungsverfahren

Die terrestrisch-topographischen Vermessungsverfahren – allen voran die tachymetrischen Aufnahmeverfahren – galten mehrere Jahrhunderte als Standardverfahren der topographischen Erfassung. Dabei wurde anfangs mit einfachsten Instrumenten und geringer Genauigkeit gearbeitet. Erst mit der Erfindung der Messtischtachymetrie konnte genauer und systematisch gearbeitet werden. Bis in die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts war das terrestrisch-topographische Aufnahmeverfahren das vorherrschende Verfahren der topographischen Landesaufnahme [KOH-10, S.41]. Für kleine Flächen und wenn die gewünschte Genauigkeit anderweitig nicht erreicht werden kann, werden terrestrische Verfahren auch heute noch eingesetzt.

3.4.3.1 Tachymetrie

Grundlage der tachymetrischen Messverfahren ist das polare Anhängen. Hierbei werden von einem Messinstrument an einem Standort (F_1) mit bekannten Lage- und Höhenkoordinaten Horizontalwinkel β , Zenitwinkel t und Horizontalstrecke s zu einem Neupunkt P gemessen. Sind Standpunkt F_1 und ein weiterer Festpunkt F_2 in einem Koordinatensystem eingetragen, so kann β und s abgetragen werden und man erhält ohne weitere Rechnung den Neupunkt P [KOH-10, S.52ff].

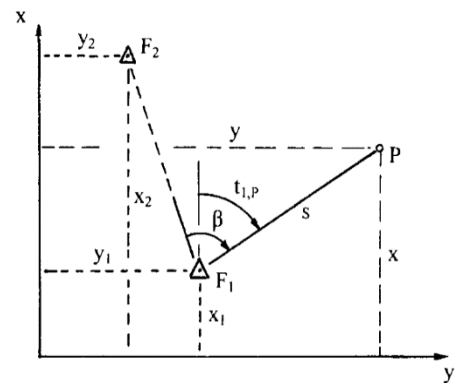


Abbildung 13: Prinzip des Polaren Anhängens [KOH-11, S.25].

Auf veraltete Verfahren wie das Messtischverfahren oder die Zahlentachymetrie wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen [vgl. dazu KOH-10, S.52ff]. In der modernen topographischen Vermessung gibt es folgende drei tachymetrische Aufnahmeverfahren:

- Satellitengestütztes Verfahren: Hier werden alle Neupunkte mit einem GNSS-Empfänger ermittelt, wozu mindestens eine Referenzstation notwendig ist und keine Abschirmung des Satellitenempfangs durch Vegetation, Bebauung oder Geländeformen vorhanden sein sollte.
- Kombination von GNSS und Polaraufnahme mit einem Tachymeter: Ist die Verbindung zu Satelliten nicht vollständig gewährleistet, so ist eher eine Kombination von GNSS und Polaraufnahme mit Hilfe eines Tachymeters angebracht.
- Polaraufnahme mit Hilfe eines Tachymeters: Ist auch die Standortbestimmung mit Hilfe von GNSS nicht möglich, so ist die Polaraufnahme mit Hilfe eines Tachymeters vorzuziehen [KOH-11, S. 24]. Das Prinzip der Polaraufnahme ist in Abbildung 13 ersichtlich.

Vorteile	Nachteile
Hohe Genauigkeit	Kleine Abbildungsfläche
Aufnahme in einem von Satelliten abgeschirmten Bereich möglich	Lange Aufnahme- und Auswertedauer

3.4.3.2 Terrestrische Photogrammetrie

Die terrestrische Photogrammetrie basiert auf demselben Prinzip wie die Aero-Photogrammetrie – also dem Verschneiden mehrerer überlappender Bilder. Allerdings werden die Aufnahmen von der Erde aus und nicht von Flugzeugen oder anderen Luftfahrzeugen erstellt. Die Entfernung zum aufgenommenen Objekt ist mit rund 100 Metern vergleichsweise gering. Diese Aufnahmemethode wird hauptsächlich für Bauaufnahmen oder Industrievermessungen und nur sehr selten in der Topographie durchgeführt [KOH-11, S. 45f].

Vorteile	Nachteile
Hohe Genauigkeit	Kleine Abbildungsfläche

3.4.3.3 Terrestrisches Laserscanning (TLS)



Abbildung 14: Riegl VZ-2000i [RIE-18]

Das Laserscanning entstand in den 1990er Jahren aus dem Gedanken heraus, die Punktdichte bei tachymetrischen Verfahren zu erhöhen ohne gleichzeitig den Aufnahme- und Auswerteaufwand ins Unermessliche steigen zu lassen. Beim terrestrischen Laserscanning wird mit Hilfe eines Lasers die Distanz zum Objekt gemessen. Dabei wird ein Laserstrahl immer wieder vertikal und horizontal abgelenkt, wodurch eine Punktwolke der Umgebung des Scanners entsteht. Neben der Distanz kann auch die Reflexionsintensität aufgenommen werden, sodass auch Aussagen über die Beschaffenheit des aufgenommenen Objekts getroffen werden können.

Durch das Laserscanning entsteht somit ein regelmäßiges Punktraster ohne Berücksichtigung von Kanten, Ecken oder ähnlichem. Ein klarer Vorteil des Laserscanners ist die Unabhängigkeit vom Wetter, da zu fast allen Wetterbedingungen gemessen werden kann [KOH-11, S.52ff].

Beim TLS werden die Polarkoordinaten (α , β , d) gemessen, welche sich in kartesische Koordinaten umrechnen lassen. Somit entsteht ein „Geräte-Koordinatensystem“, das sich in ein übergeordnetes Koordinatensystem umrechnen lässt [KAH-06, S. 207].

Die Punktdichte des Laserscannings ist abhängig von der Schrittweite – also dem Winkel der Ablenkung der Punkte: Je kleiner die Schrittweite, desto kleiner ist auch der Abstand zwischen den einzelnen Punkten. Allerdings muss auch die Größe des Punktes

berücksichtigt werden, welche vom Öffnungswinkel (Strahldivergenz) abhängig ist, berücksichtigt werden.

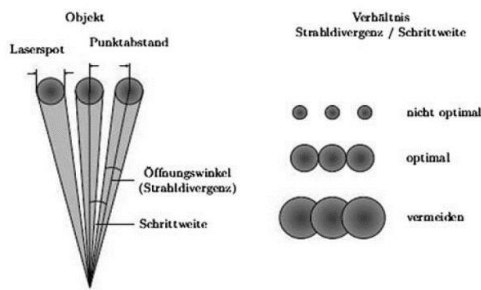


Abbildung 15: Unterscheidung Schrittweite und Strahldivergenz [KOH-11, S.56]

Strahldivergenz und Schrittweite müssen deshalb aufeinander abgestimmt sein, wie in Abbildung 15 ersichtlich ist: Ist die Schrittweite zu groß, ist der Abstand zwischen den einzelnen Punkten zu groß. Eine Überlappung der Punkte durch eine zu große Strahldivergenz und eine zu geringe Schrittweite sollte gänzlich vermieden werden. Das Verhältnis der Strahldivergenz zur Schrittweite ist optimal, wenn sich die Laserpunkte berühren, aber nicht überlappen.

Neben der Einstellung der Schrittweite und der Strahldivergenz sind beim terrestrischen Laserscanning – insbesondere bei der Planung und Durchführung – einige wichtige Punkte zu beachten:

- Ziel der Erfassung: Das Ziel der Erfassung muss bei der Aufnahme berücksichtigt werden. So bedarf die Aufnahme für eine topographische Karte anderer Voraussetzungen als für eine Gebäudeüberwachung.
- Platzierung der Messstandpunkte: Abhängig vom Objekt und dem Aufnahmeziel ist die Positionierung der Messungen von großer Bedeutung.
- Passpunktanordnung: Zur Verknüpfung einzelner Scans müssen Passpunkte gesetzt werden. Die Positionierung dieser Passpunkte ist entscheidend: Sie dürfen nicht in einer Linie positioniert werden und müssen in mindestens zwei Scanpositionen sichtbar sein.

Abbildung 16 zeigt zwei Beispiele für mit Laserscanner generierte Punktwolken. Diese können in weiterer Folge – wie im linken Teil der Abbildung ersichtlich – texturiert werden.



Abbildung 16: Zwei Beispiele für mit einem Riegl VZ2000i generierte Punktwolken [RIE-18b].

Vorteile	Nachteile
Extrem hohe Genauigkeit	Lange Aufnahme- und Auswertedauer
Besonders geeignet für Gelände- und Gebäudeaufnahme	Hohe Anschaffungskosten

4 Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)

In den letzten Jahrzehnten ist die Zahl der verkauften UAVs stetig gewachsen. Diese haben vor allem im letzten Jahrzehnt einen regelrechten Boom erlebt. Alleine in Österreich wurden 2016 rund 40.000 UAVs verkauft. Allerdings wurden in Österreich von 2014 bis 2017 nur 2.800 Betriebsbewilligungen erteilt [PRE-18]. Der Begriff UAV umfasst eine große Palette an Fluggeräten. Dabei kann zwischen Unmanned Aerial Vehicle (UAVs), Remotely Piloted Vehicles (RPVs) und Drohnen unterschieden werden. RPVs bezeichnen Luftfahrzeuge, die von einem anderen Ort gesteuert werden. Somit gelten RPVs immer als UAVs, UAVs jedoch nicht immer als RPVs. Auch der Begriff „Drohne“ ist für die meisten UAVs nicht korrekt, da Drohnen Fluggeräte mit einer eingeschränkten Funktion und Einsatzzweck bezeichnen [FAH-12, S.7].

4.1 Unterscheidungen von UAVs

Der Begriff UAV bezieht sich lediglich auf das Fluggerät selbst. Wird auch von der Steuerungseinheit gesprochen, wird der Begriff UAS (Unmanned Aerial System) verwendet. In dieser Arbeit wird dennoch der Begriff UAV verwendet, da die Steuerungseinheit für die Ergebnisse vernachlässigbar ist.

UAVs lassen sich in folgende Klassen gliedern:

- **Kleine UAVs:** Sehr kleine bis kleine UAVs haben eine Dimension von mehreren Zentimetern bis zu 1-2 Metern. Hier wird meist unterschieden zwischen Fixed Winged UAVs, wie der SenseFly eBee, und Rotary Wing UAVs, wie Quadrocoptern oder Multikoptern. Dieser Typ von UAV ist primär für diese Arbeit relevant.
- **Mittlere UAVs:** Mittlere UAVs sind zu groß und zu schwer, um von einer Person getragen zu werden. Die übliche Flügelspannweite beträgt 5-10 Meter und sie können bis zu 200 Kilogramm transportieren. In diese Klasse fallen meist UAVs für militärische Zwecke.
- **Große UAVs:** Große UAVs können sehr große Distanzen überwinden und große Lasten transportieren. Große UAVs fliegen meist in einer sehr hohen Höhe und werden für militärische Zwecke und zur Überwachung eingesetzt.

Unabhängig von ihrer Größe und Bauweise bestehen alle UAVs aus den folgenden Komponenten:

- Fluggerät (aircraft)
- Nutzlast (payload)
- Kommunikationseinheit (communications unit)
- Steuerung (operator control unit)

Dabei trägt das Fluggerät die Nutzlast und wird mit Hilfe der Steuerung kontrolliert. Die Kommunikationseinheit übergibt Befehle von der Steuerungseinheit an das Fluggerät und in weiterer Folge auch an die Nutzlast. Die Nutzlast entspricht in der wissenschaftlichen

Praxis meist einer Kamera, einem Multispektralscanner oder einem Laserscanner [CRE-15, S. 3].

Für den wissenschaftlichen Gebrauch werden hauptsächlich kleine UAVs eingesetzt. Hier werden beide der oben erwähnten Typen (Rotary Wing und Fixed Wing UAVs) verwendet. Ein großer Vorteil der Quadro- oder Multikopter – also der Rotary Wing UAVs – ist die Fähigkeit, auf kleiner Fläche starten und landen zu können, sich präzise steuern zu lassen und in der Luft schweben zu können [GLE-16, S.75ff]. Denn während die Rotary Wing UAVs einfach per Fernbedienung abheben können, müssen Fixed Wing UAVs per Hand oder mit Hilfe eines speziellen Abschussapparats in die Luft gebracht werden.



Abbildung 17: Gegenüberstellung von Fixed Wing UAVs (SenseFly eBee Plus) und Rotary Wing UAVs (Phantom 4 Pro) [SEN-18a / DJI-18]

Ob Fixed Wing UAVs oder Rotary Wing UAVs eingesetzt werden, ist stark abhängig vom Einsatzzweck. So eignen sich Fixed Wing UAVs eher für die Kartierung größerer Flächen, da sie aufgrund ihrer Fähigkeit zu gleiten weniger Energie verbrauchen und meist schneller und in größerer Höhe fliegen.

Der UAV-Hersteller SenseFly, der sich auf die Herstellung von UAV für Kartierungs- und Fernerkundungszwecke spezialisiert hat, hat auf seiner Website die Vor- und Nachteile von Fixed Wing und Rotary Wing UAVs gegenübergestellt:

		
Projects	Mapping	Small area mapping & inspection
Applications	Land surveying (rural), agriculture, GIS, mining, environmental mgt, construction, humanitarian	Inspection, cinematography/ videography, real estate, surveying (urban), construction, emergency response, law enforcement
Cruising speed	High	Low
Coverage	Large	Small
Object resolution	cm/inch per pixel	mm per pixel
Take-off/landing area	Large	Very small
Flight times & wind resistance	High	Low

© senseFly 2015

Abbildung 18: Gegenüberstellung von Fixed und Rotary Wing UAVs [SEN-18b]

Ebenso wie beim Airborne Laserscanning oder dem Satellitenbildverfahren ist eine UAV jedoch nur Träger für die einzelnen Sensoren beziehungsweise Kameras, welche für die Datenerfassung verantwortlich sind.

Die Methodik für die Verwendung für kartographische und geodätische Zwecke soll im folgenden Kapitel erläutert werden.

4.2 Einsatzmöglichkeiten von UAVs für die Fernerkundung und die topographische Kartographie

Auch die Vermessung, Geoinformation und Kartographie haben UAVs als Träger für Aufnahmegeräte für sich entdeckt: Bereits im Jahr 2009 – also noch vor dem kommerziellen

Durchbruch der UAVs – prägte Eisenbeiß in seiner Dissertation den Begriff UAV-Photogrammetrie und definierte einen Workflow für die UAV-Photogrammetrie [EIS-09]. Colomina und Molina [COL-14] zeigten einige Anwendungsbereiche von UAVs in der Photogrammetrie und Fernerkundung auf:

- Landwirtschaft, Ökologie und Biologie: Für landwirtschaftliche Zwecke können Agrarflächen und ihre Vitalität aufgenommen werden. Am besten eignen sich hierfür UAVs, die mit einem Spektralscanner im nahen Infrarot versehen wurden. So kann durch Berechnung des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Auskunft über die Vitalität von Pflanzen erhalten werden. Hierbei werden Daten aus dem nahen Infrarotbereich und dem roten Spektralbereich normiert, um Auskunft über die Vitalität zu erhalten [ALB-01, S. 219]. Einige UAV-Photogrammetrie-Programme (wie Pix4D oder ArcGIS Drone2Map) bieten die Berechnung des NDVI bereits als Standardfeature an.

Die Ökologie und Biologie genießen eine Pionierrolle in der Implementierung von UAVs. So können etwa Wildtiere und ihr Habitat durch den Einsatz von UAV überwacht und inventiert werden [CRE-15, S. iii]. Ein weiterer Anwendungsbereich ist beispielsweise die Erhebung von Laichplätzen von Bachforellen mit Hilfe von UAVs [STA-18].

- Monitoring im Bauwesen: UAVs eignen sich auch besonders zur Erfassung und Inspektion von Anlagen wie Pipelines, Stromleitungen, Straßen, Schienen und anderen linienhaften Objekten, aber auch von Gebäuden. Dabei wird sowohl auf das Structure from Motion-Verfahren als auch auf Laserscanning mit Hilfe von UAVs gesetzt.
- Archäologie: Von besonderem Interesse für archäologische Forschungen sind die hohe räumliche Auflösung der Orthophotos, die Möglichkeit 3D-Modelle zu erhalten sowie der Einsatz von UAVs getragenen Laserscannern.
- Militärische Überwachung: Das Konzept der UAVs stammt ursprünglich aus dem militärischen Bereich. Dort werden die unbemannten Luftfahrzeuge immer noch stark eingesetzt. Neben der Verwendung von UAVs als Waffenträger werden hauptsächlich große Fixed Wing UAVs, welche mit hochauflösenden Kameras beziehungsweise Infrarotsensoren versehen sind, eingesetzt. Kleine UAVs werden von Kampftruppen benutzt, um eine Übersicht über das Gelände zu erhalten.
- Geowissenschaften: Auch für die Geowissenschaften sind UAV-Aufnahmen geeignet. Denn so können Geländeformen, Gletscher, Hangrutschungen und ähnliches schnell und kostengünstig auch in besonders schwierigem Terrain aufgenommen werden, wo terrestrische Verfahren wie Laserscanning nicht anwendbar wären. Außerdem ist das nötige Equipment leichter und kostengünstiger als ein Laserscanner. Anwendungsmöglichkeiten sind beispielsweise die Risikobewertung von Hangrutschungen [JAU-16] oder die Erfassung von bereits abgegangenen gravitativen Massenbewegungen [MIC-18].

Auch in der Topographie und Geodäsie werden UAVs als Aufnahmegeräte verwendet und deren Möglichkeiten aus wissenschaftlicher Perspektive untersucht. Bereits 2009 prägte Eisenbeiß den Begriff „UAV-Photogrammetrie“ und definierte einen allgemeinen Workflow für den Einsatz von UAV für die Photogrammetrie. Aber auch explizit für den Themenbereich der topographische Kartographie wurden bereits Arbeiten verfasst: Einige Arbeiten wie jene von Gao et al. [GAO-17], Chi et al. [CHI-16] oder Azmi et al. [AZM-14] beschäftigen sich mit der Genauigkeit von aus UAV generierten Aufnahmen. Auch James et al. versuchten UAV-Aufnahmen weiter zu optimieren [JAM-17].

Zwar wurde die Aufnahme einzelner Objekte, wie des Geländes oder der Vegetationsaufnahme, in einigen Publikationen behandelt, aber eine holistische Auseinandersetzung mit der Verwendung von UAVs als Aufnahmegerät für die topographische Kartographie gibt es in der Form nicht. Dies ist – wie bereits im Kapitel „Ziele und Fragestellungen“ definiert – Ziel dieser Arbeit. Durch die hochauflösenden Orthophotos können mit Hilfe der objektbasierten Bildanalyse die Kartenelemente klassifiziert werden. Bei objektorientierter Klassifikation von Echtfarben-Orthophotos – wie sie mit den meisten UAVs entstehen – werden Bildsegmente aufgrund ihrer Eigenschaften, wie Spektralwerten, Form oder Nachbarschaften, verschiedenen Klassen zugeordnet. Eine automatische Klassifikation aufgrund der unterschiedlichen Strukturen und der spektralen Unterschiede bei mehreren Aufnahmezeitpunkten nicht möglich, weshalb es einer manuellen Überprüfung der Klassifikationsergebnisse bedarf. Diese können jedoch beispielsweise einer qualitativen Verbesserung des Aktualisierungsprozesses der DKM dienen [STE-07, S. 3]. Aber auch eine überwachte Klassifikation kann als Verfahren zur möglichen Herstellung einer topographischen Karte auf Grundlage von UAV-Aufnahmen herangezogen werden.



Abbildung 19: Der Riegl RiCopter ist ein mit Laserscanner und Kamera bestückter Quadrocopter. [RIE-18c]

Neben der Verwendung des Structure from Motion-Verfahrens mit Hilfe von mit Kameras bestückten UAVs können auch Laserscanner auf UAVs eingesetzt werden. Durch den Einsatz von Laserscannern kann ein deutlich genaueres Geländemodell erstellt werden, was vor allem für die Archäologie und der Objekterfassung von großem Vorteil sein kann.

4.3 Regulierungen

Obwohl der Einsatz von UAVs ein hohes Potential für die Geowissenschaften und auch die topographische Kartographie bietet, müssen die Aufnahmen im Rahmen der gesetzlichen Beschränkungen stattfinden. Im folgenden Kapitel werden die gesetzlichen Regulierungen in Österreich, Deutschland und Tschechien beleuchtet.

4.3.1 Österreich

In Österreich regelt seit dem 1.1.2014 das Luftfahrtgesetz den Betrieb von unbemannten Luftfahrzeuge. Die zuständige Stelle für die Ausstellung von luftfahrtrechtlichen Bewilligungen ist die Austro Control GmbH. Das Gesetz unterscheidet zwischen unbemannten Luftfahrzeugen der Klasse 1 (mit Sichtverbindung) und Klasse 2 (ohne Sichtverbindung).

Für den wissenschaftlichen Betrieb von UAV in Österreich sind die Bestimmungen für unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1 (mit Sichtverbindung) relevant. Zunächst muss festgestellt werden, ob eine UAV bewilligungspflichtig ist. Dies ist von der Bewegungsenergie und somit auch vom Gewicht abhängig. Wird eine Bewegungsenergie von 79 Joule überschritten, was bei einem Gewicht von 250 Gramm bei 30 Metern Flughöhe der Fall ist, so ist eine Bewilligung notwendig. Unter 79 Joule fällt die UAV in die Kategorie „Spielzeug“, weshalb keine Bewilligung erforderlich ist.

Bewilligungspflichtige UAVs werden je nach Einsatzgebiet (unbebaut, unbesiedelt, besiedelt, dicht besiedelt) und Gewichtsklassen (bis 5kg, bis 25kg und über 25kg bis 150kg) in verschiedene Kategorien unterteilt. Aus der Kombination von Einsatzgebiet und Gewichtsklasse lässt sich auf die jeweilige Klasse und somit auch auf die Voraussetzungen im Bewilligungsverfahren schließen. Die Voraussetzungen für das Bewilligungsverfahren sind im Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitshinweis Nr. 67 nachzulesen. Für alle bewilligungspflichtigen UAVs sind in Österreich jedenfalls Haftpflichtversicherungen notwendig [AUS-17].

Die einzelnen Einsatzgebiete lassen sich wie folgt beschreiben:

- Einsatzgebiet I (Unbebautes Gebiet) bezeichnet ein Gebiet, in dem sich kein Gebäude befindet.
- Einsatzgebiet II (Unbesiedeltes Gebiet) weist sekundäre Bebauung (z.B. Lagerhallen, Silos, Strohballen) oder Gebäude, die aufgrund ihres Verfalls nicht dauerhaft bewohnbar sind, auf.
- Einsatzgebiet III (Besiedeltes Gebiet) definiert einen Siedlungsbereich mit primären Gebäuden, wie zum Beispiel Wohnhäusern, Schulen oder Geschäften, welcher als Wohn-, Gewerbe- oder Erholungsgebiet genutzt wird.
- Einsatzgebiet IV (Dicht besiedeltes Gebiet) beschreibt ein räumlich geschlossenes Siedlungsgebiet, wie eine Marktgemeinde oder eine Bezirkshauptstadt [AUS-18a].

	Einsatzgebiet			
	I unbebaut	II unbesiedelt	III besiedelt	IV dicht besiedelt
Betriebsmasse bis einschließlich 5 kg	A	A	B	C
Betriebsmasse bis einschließlich 25 kg	A	B	C	D
Betriebsmasse über 25 kg und bis einschließlich 150 kg	B	C	D	D

Abbildung 20: Kategorisierung von UAVs in Österreich [AUS-17]

Der Großteil der verkauften UAVs ist der Kategorie A zuzuteilen. Hier kann mit einem Fluggerät bis 5kg in unbebautem und unbesiedeltem Gebiet in Sichtverbindung und bis zu einer Höhe von 150 Meter geflogen werden. Für die Kategorie C und D ist auch eine bestandene Luftrechtsprüfung nachzuweisen.

Um UAVs in besiedeltem beziehungsweise dicht besiedeltem Gebiet fliegen lassen, ist mindestens eine UAV der Kategorie B notwendig. Unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1 in der Kategorie B und C benötigen spezielle Bauvorschriften, welche in der Anlage B zu LBTH festgelegt sind. Ab Kategorie B müssen die UAVs ein redundantes System darstellen. Die Austro Control definiert diese redundanten Systeme wie folgt: „Die technische Bauart der Systeme muss so gestaltet sein, dass die Systeme doppelt ausgeführt sind und im Fehlerfall das redundante System automatisch übernimmt oder eine Notfunktion bzw. die manuelle Steuerung den Fehlerfall kompensiert“. Solche Fehlerfälle können der Ausfall von Sender, Empfänger, GNSS oder der Stromversorgung sein [AUS-18b].

Eine Übersicht über die Lufträume Österreichs ist auf map.dronespace.at sowie in der Austro Control App „Drone Space“ abrufbar.

4.3.2 Deutschland

Der Betrieb von UAVs wird in Deutschland durch die „Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten“ geregelt. Diese Verordnung unterscheidet die UAVs primär nach Gewicht.

- Ab 250 Gramm besteht eine Kennzeichnungspflicht. Dies bedeutet, dass eine Plakette an der UAV mit Namen und Adresse des Eigentümers angebracht werden muss, um im Schadensfall schnell den Eigentümer feststellen zu können.
- Ab 2kg ist ein Kenntnissnachweis notwendig. Um diesen Kenntnissnachweis zu erlangen, muss einer der folgenden Punkte erfüllt werden:
 - Gültige Pilotenlizenz
 - Prüfung durch eine vom Luftfahrt-Bundesamt anerkannte Stelle. Dies kann auch online erfolgen. Hier beträgt das Mindestalter 16 Jahre.
 - Einweisung durch einen beauftragten Luftsportverband (DMFV oder DAeC). Hier beträgt das Mindestalter 14 Jahre.

- Ab 5kg beziehungsweise beim Betrieb in der Nacht besteht eine Erlaubnispflicht. Diese Genehmigungen werden von den Landesluftfahrtbehörden erteilt. Ausgenommen von dieser Erlaubnispflicht sind Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben. Für den Betrieb unter 5kg ist grundsätzlich keine Genehmigung mehr notwendig.

Auf folgenden Gebieten gilt in Deutschland völliges Flugverbot:

- Verfassungsorgane, Bundes- oder Landesbehörden
- Kontrollzonen von Flugplätzen
- Industrieanlagen
- Wohngrundstücke
- Naturschutzgebiete
- Menschenansammlungen
- Einsatzorte von Rettungskräften

Ausgenommen von diesen Regelungen sind Modellflugplätze [BMV-18]. Abbildung 21 fasst die deutsche „Drohnen-Verordnung“ anschaulich zusammen.



Abbildung 21: Die neue Drohnenverordnung ist seit 2017 gültig und regelt Flugverbotszonen und Pflichten und Nachweise. [BMV-18]

4.3.3 Tschechien

In der Tschechischen Republik wird bei der Regulierung von UAVs nach Freizeit – und Sportflügen sowie Flügen für kommerzielle Zwecke unterschieden:

- Freizeit- und Sportflüge:
 - Das Gewicht der UAV beträgt weniger als 25kg.

- Der Zweck des Fluges ist nicht kommerzieller Natur.
- Beim Flug muss die Richtlinie L2, Anhang X, eingehalten werden. Diese Richtlinie enthält unter anderem folgende Punkte:
 - Es muss Sichtkontakt zur UAV bestehen
 - Die maximale Flughöhe beträgt 100m
 - UAVs über 0,91kg müssen ein Sicherheitssystem eingebaut haben, welches den autonomen Rückflug zum Piloten ermöglicht
 - Flugverbotszonen müssen eingehalten werden. [CAA-18a]
- Flüge für kommerzielle Zwecke: Dient der Flug kommerziellem Zwecke muss eine Genehmigung der CAA-CZ (Civil Aviation Authority CZ) eingeholt werden. Auch hier gilt die Richtlinie L2, Anhang X [CAA-18b].

5 Klassifikations- und Bildinterpretationsmethoden

Bei den meisten für wissenschaftliche Zwecke verwendeten UAVs kommen keine speziellen Sensoren zum Einsatz auf, sondern es nehmen hier lediglich Kameras Fotos auf. Damit diese einzelnen Fotos für die topographische Kartographie genutzt werden können, muss zunächst mit Hilfe von UAV-Photogrammetrie-Softwares in eine Form gebracht werden, die als Grundlage eingesetzt werden kann. Dafür werden aus überlappenden Fotos Orthophotos, Gelände- oder Oberflächenmodelle beziehungsweise eine Punktwolke erstellt. Diese wird anschließend klassifiziert und können so als Grundlage für die topographische Kartographie verwendet werden. Dieses Kapitel stellt die Methodik der UAV-Photogrammetrie-Softwares und verschiedene Klassifikationsmethoden vor.

5.1 Structure from Motion-Verfahren

Die UAV stellt nur den Träger für die einzelnen Sensoren dar, welche Aufnahmen vom jeweiligen Objekt erstellen. Dabei können digitale Kameras, multispektrale Sensoren oder auch Laserscanner eingesetzt werden. Der Großteil der handelsüblichen UAV ist mit digitalen Kameras bestückt, die Aufnahmen mit hoher räumlicher Auflösung erstellen können und so mit Hilfe von eingebauten GPS- oder GNSS-Empfängern oder Passpunkten (sogenannte Ground Control Points) hochauflösende georeferenzierte Orthophotos ermöglichen [STA-16, S.22].

Einzelne von UAVs aufgenommene Bilder sind nur zentralperspektivisch und müssen entzerrt werden. Außerdem decken die einzelnen Bilder nur eine kleine Fläche ab, so dass mehrere überlappende Bilder verwendet werden müssen.

Mit Hilfe von photogrammetrischer Software wie beispielsweise Agisoft Photoscan, Pix4D oder Drone2Map können nicht nur überlappende Bilder zusammengesetzt werden und zu Orthophotos entzerrt werden, sondern auch Gelände- und Oberflächenmodelle sowie 3D-Modelle erstellt werden. Dazu wird das „Structure-from-Motion-Verfahren“ (SfM) angewandt:

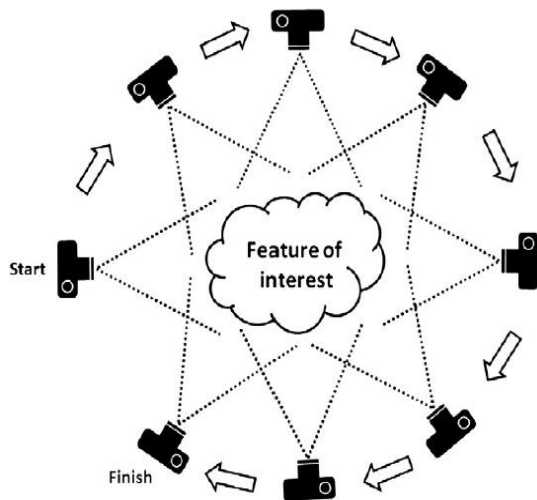


Abbildung 22: Prinzip des SfM-Verfahrens [WES-12, S.301]

Beim SfM-Verfahren werden mehrere, stark überlappende Bilder verwendet, um aus 2D-Bildern 3D-Daten berechnen zu können. Dazu werden Bilder aus leicht versetzten Aufnahmewinkeln aufgenommen und nach markanten, gemeinsamen Punkten untersucht. Diese gemeinsamen Punkte können in weiterer Folge zu einer 3D-Punktwolke berechnet werden. Diese Punktwolke kann zunächst zu einem Mesh umgewandelt und in weiterer Folge texturiert werden [FIS-15, S.1f].

Das SfM-Verfahren basiert also auf demselben Prinzip wie die stereoskopische Photogrammetrie – nämlich, dass 3D-Informationen aus überlappenden, geringfügig versetzten Bildern gewonnen werden können.

Im Gegensatz zur stereoskopischen Photogrammetrie muss kein Netzwerk an Höhen- und Lagepunkte vorhanden sein, um die Szene zu verorten. Dies ist durch die Kamerapositionen möglich. Werden Höhen- und Lagepunkte verwendet, wird die Genauigkeit erhöht.

Der Vorteil des SfM-Verfahrens ist, dass so mit Hilfe einfacher Aufnahmegeräte hochauflösende Modelle entstehen. Dabei können im Fall von UAV-Aufnahmen nicht nur 3D-Modelle von Objekten gemacht werden, sondern auch Gelände- beziehungsweise Oberflächenmodelle und Orthophotos erstellt werden. UAV-Anwendungen können durch die GPS-Empfänger, welche sich in der UAV befindet, georeferenziert werden. Das Setzen von Passpunkten erhöht die Genauigkeit jedoch [WES-12, S.301ff]. Der SfM-Workflow wird in der folgenden Abbildung erläutert:

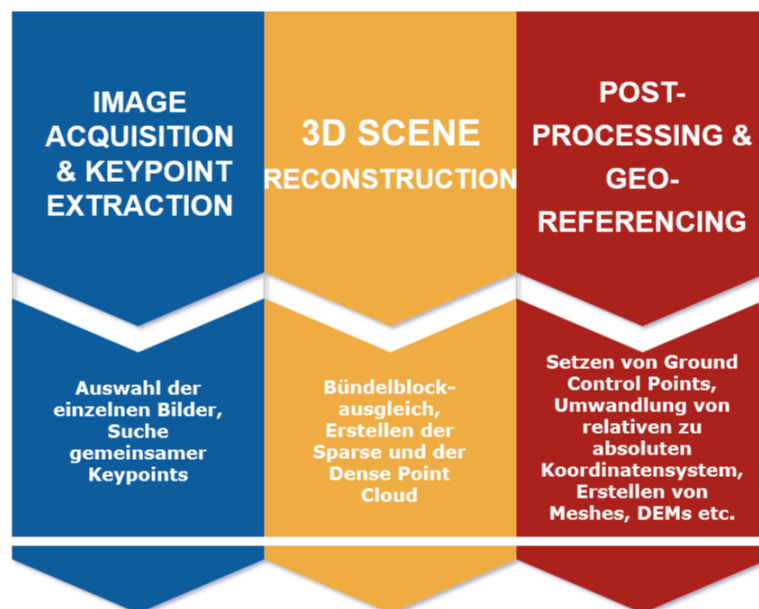


Abbildung 23: Workflow des SfM-Verfahrens [eigene Abbildung nach WES-12, S. 303]

5.2 UAV-Photogrammetrie

Die Anwendungsbereiche von UAVs in der Fernerkundung und in den Geowissenschaften sind vielfältig. Der Ablauf folgt jedoch immer dem gleichen Schema und lässt sich in folgende Schritte zusammenfassen:

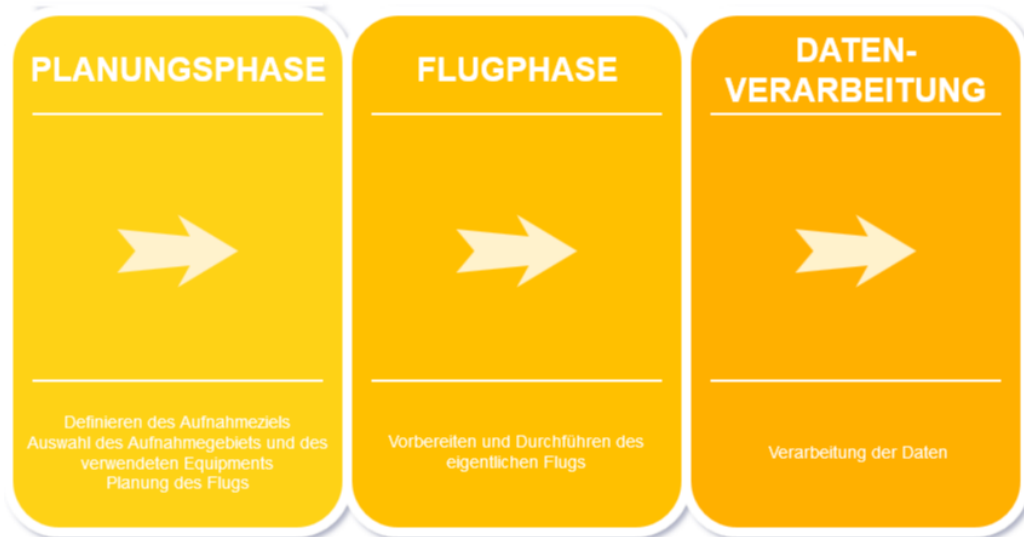


Abbildung 24: Workflow von UAV-Aufnahmen [STA-16, S.24]

Planungsphase:

Hier sind folgende Fragen zu klären:

- Was soll aufgenommen werden?
- Welches Aufnahmegebiet ist aufzunehmen?
- Wie groß ist die Fläche, die aufgenommen ist?
- Was sind das Ziel und der Zweck der Aufnahme?
- Welches Equipment wird eingesetzt beziehungsweise steht zur Verfügung?
- Müssen Ground Control Points gesetzt werden?
- Welche gesetzlichen Rahmenbedingungen sind zu beachten?

Flugphase:

In der Flugphase wird das in der Planungsphase definierte Gebiet abgeflogen. Dabei ist zu beachten, dass je nach Aufnahmeziel unterschiedliche Routen geflogen werden: So ist etwa für ein 3D-Modell eines einzelnen Objektes – wie zum Beispiel eines Gebäudes eine kreisförmige Befliegung notwendig, während für ein Orthophoto, Gelände- oder Oberflächenmodell eine rasterförmige Befliegung durchgeführt werden muss. Abbildung 25 zeigt die Befliegungsmethoden wie sie bei der UAV-Flugplanungs-App Pix4Dcapture ausgewählt werden können.

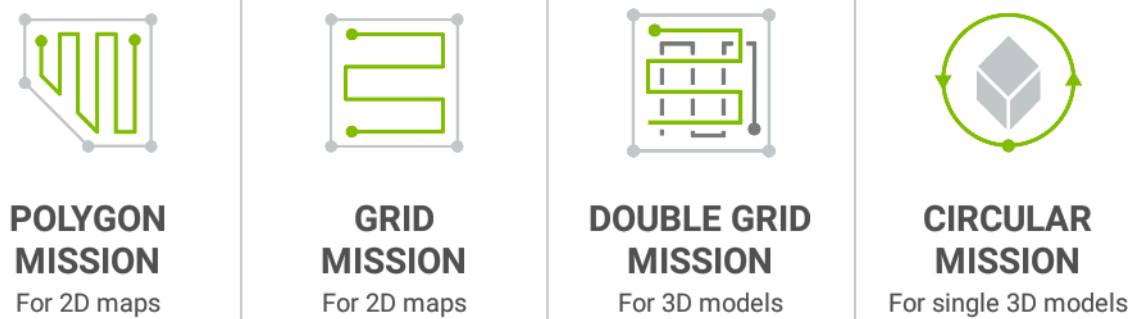


Abbildung 25: Mögliche Befliegungsarten für UAV-Aufnahmen mit Hilfe von Kameras. [PIX-18b]

Die Fernsteuerung beziehungsweise die Steuerung mit Hilfe vorher definierter Flugrouten funktioniert sehr simpel. Dabei wird mit Hilfe einer Fernsteuerung, welche üblicherweise mit zwei Joysticks versehen ist, gesteuert. Auf einem Smartphone, Tablet oder Laptop können die Kameraperspektive sowie wichtige Informationen wie die Flughöhe, der Akkustand oder die Anzahl der GPS-Satelliten abgerufen werden. Durch einen Knopfdruck können Fotos oder Videos aufgenommen werden. Wird die UAV mit Hilfe einer vorher definierten Flugroute (siehe Abbildung 25) geflogen, so nimmt diese automatisch die Aufnahmen auf und berücksichtigt dabei die notwendige Überlappung. Werden für das jeweilige Projekt Ground Control Points gesetzt, so sind diese vor der Befliegung einzumessen und danach in der jeweiligen UAV-Photogrammetrie-Software zu georeferenzieren. Um die Überlappung gleichmäßiger steuern und ein vorgegebenes Befliegungsgebiet genauer befliegen zu können, empfiehlt es sich mit Hilfe von Apps, wie Pix4DCapture oder DJI GS Pro, eine vorgegebene Flugroute zu befliegen.

Datenverarbeitung:

Im dritten und letzten Schritt werden die Fotos mit einer Software – wie Agisoft Photoscan, Pix4D oder ArcGIS Drone2Map – bearbeitet. Dazu werden zunächst die Fotos in die Software geladen und die Fotos ausgerichtet, um in weiterer Folge eine Sparse Point Cloud sowie eine Dense Point Cloud zu erstellen, welche dann in ein 3D-Modell oder ein Orthophoto, ein Gelände- oder Oberflächenmodell umgerechnet werden. Je nachdem, ob Ground Control Points gesetzt wurden, müssen diese vor der Berechnung des Modells georeferenziert werden. Im Folgenden soll der Prozess anhand des Agisoft Tutorials erläutert werden:

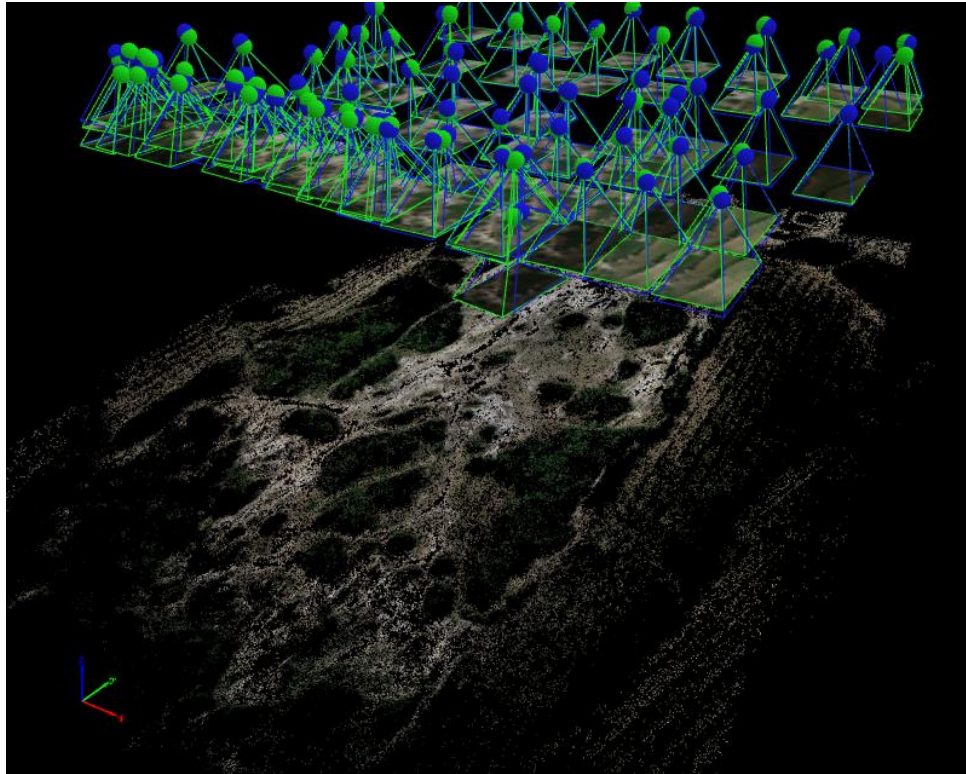


Abbildung 26: Im ersten Schritt werden Bilder eingefügt, ausgerichtet und eine Sparse Point Cloud zur Orientierung erstellt. [PIX4D-Screenshot]

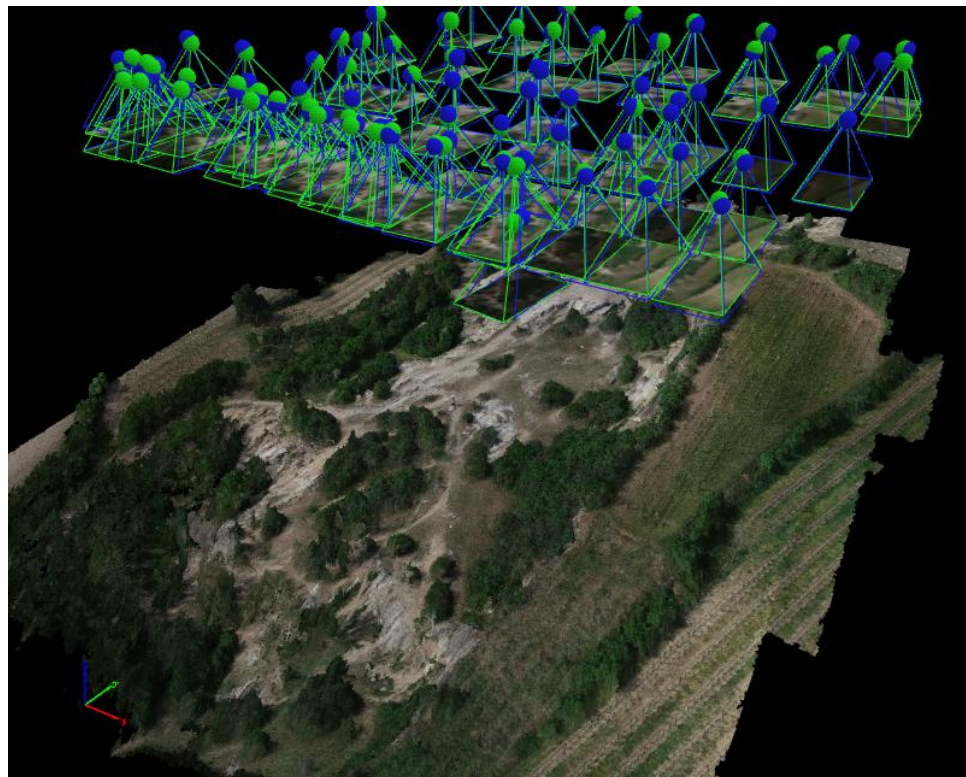


Abbildung 27: Nachdem die Ground Control Points mit mehreren Fotos verknüpft wurden, um die Genauigkeit zu erhöhen, wird eine Dense Point Cloud - also eine dichtere Punktwolke als die Sparse Point Cloud - errechnet. Diese wird nun zu einem Mesh und texturiert. [PIX4D-Screenshot]

In den oben dargestellten Screenshots wird das Prozedere einer Modellerstellung in Pix4D erläutert. Der Ablauf funktioniert in verschiedenen Programmen im Ansatz gleich, variiert jedoch geringfügig. So werden die einzelnen Schritte in ArcGIS Drone2Map sowie Pix4D teilweise automatisiert ausgeführt, während man sich bei Photoscan selbst durchklicken muss.

5.3 Klassifikationsmethoden

Das mit Hilfe von UAV-Photogrammetrie-Softwares erstellte Orthophoto bietet ein aktuelles, hochauflösendes Luftbild. Um dieses für die topographische Kartographie nutzen zu können, muss es zunächst klassifiziert werden. Dabei werden Bildelemente aufgrund ihrer spektralen oder anderer Eigenschaften verschiedenen Klassen zugeordnet.

Hierbei kann zwischen unüberwachten und überwachten Klassifikationsmethoden unterschieden werden. Die unüberwachte Klassifikation teilt die Bildelemente in eine Anzahl von Klassen ähnlicher spektraler Eigenschaften ein – ohne, dass etwas über die Bedeutung dieser Klassen bekannt sein muss. Aus diesem Grund müssen im Gegensatz zur überwachten Klassifikation keine Testgebiete oder Referenzdaten definiert werden. Bei der überwachten Klassifikation werden hingegen vor der eigentlichen Klassifikation der Bilddaten Klassen definiert, welchen die Daten mit Hilfe verschiedener Verfahren zugeordnet werden [ALB-09, S. 165ff].

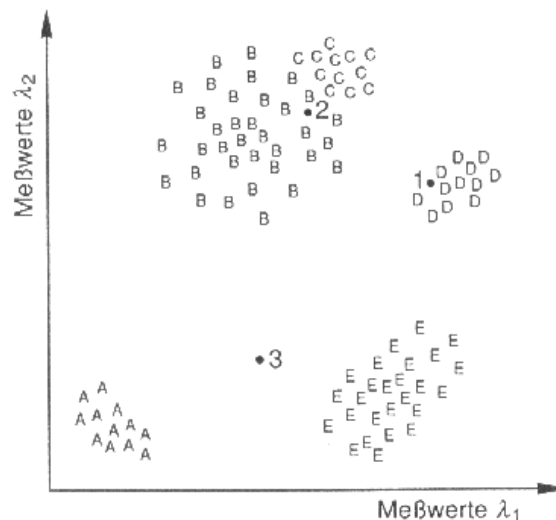


Abbildung 28: Multispektral-Klassifikation anhand eines simplen Beispiels mit zwei Spektralkanälen [ALB-09, S.164]

Da handelsübliche UAVs nur in Echtfarben aufnehmen, ist das spektrale Profil sehr gering ausgeprägt, weshalb eine unüberwachte Klassifikation deutlich erschwert wird. Aus diesem Grund werden im Folgenden mehrere überwachte Klassifikationsverfahren erläutert.

5.3.1 Maximum Likelihood Verfahren

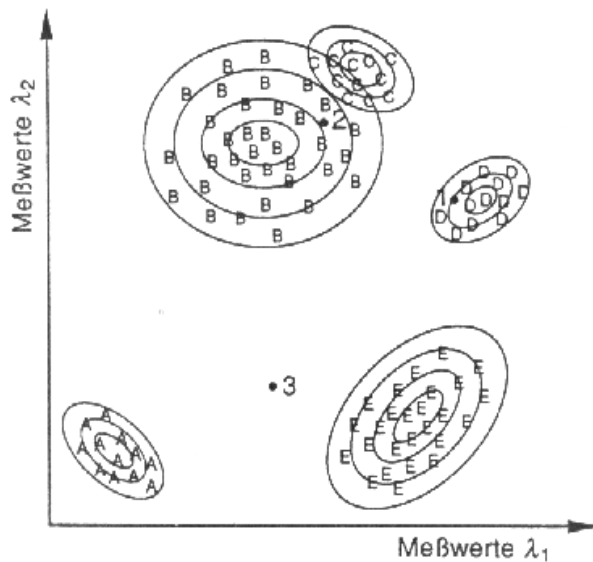


Abbildung 29: Die Ellipsen stellen Linien gleicher Wahrscheinlichkeiten für die Zugehörigkeit von Pixeln zu den Klassen dar. [ALB-09, S. 165]

Das Maximum-Likelihood-Verfahren ermittelt anhand vorgegebener Klassen die Wahrscheinlichkeiten, mit denen die Pixel jeder einzelnen Klasse angehören. Das Pixel wird jener Klasse zugewiesen, wo die höchste Wahrscheinlichkeit besteht, dass es ihr angehört. Das Verfahren ist im Vergleich zu anderen überwachten Klassifikationsmethoden rechenintensiver, liefert jedoch auch zuverlässigere Daten als andere Verfahren [ALB-09, S. 165].

5.3.2 Support-Vector-Machine-Klassifikation

Bei der Support-Vector-Machine-Klassifikation wird versucht einen möglichst breiten Abstand zwischen den einzelnen Klassen zu erhalten. Bei der Definition der Stichprobe versucht die Support-Vector-Machine eine Grenze mit dem größtmöglichen Abstand zur nächsten Stichprobe zu ziehen. Aufgrund dieses breiteren Abstands zwischen den Klassen ist die Support-Vector-Machine-Klassifikation robuster gegenüber Ausreißern als andere Klassifikationsmethoden [POU-13, S.357].

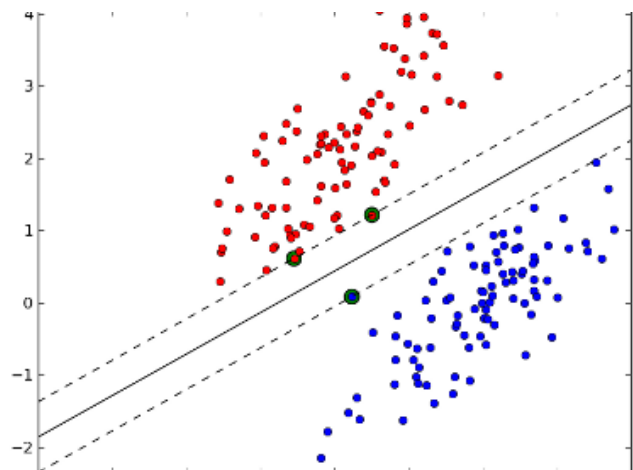


Abbildung 30: Zuordnung der SVM-Klassifikation [ANC-18]

5.3.3 Objektbasierte Bildanalyse (Object Based Image Analysis)

Im Gegensatz zu den bereits erwähnten Verfahren handelt es sich bei der objektbasierten Bildanalyse nicht um eine pixelbasierte, sondern um eine objektbasierte Klassifikation. Dabei werden die einzelnen Bildelemente nicht nur aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften einer Klasse zugewiesen, sondern es werden auch die benachbarten Bildelemente untersucht, um homogene Flächen zu bilden. Im Unterschied zur pixelbasierten Bildanalyse wird neben den Nachbarschaftsbeziehungen auch die Form berücksichtigt. Das zugrundeliegende Prinzip ist dabei die Bildsegmentierung. Dabei wird das Bild in mehrere zusammenhängende, homogene Regionen unterteilt, wobei Farbe, Textur, Form, Höhe und Ähnliches als Kriterium für die Homogenität verwendet wird [LAN-06, S. 14ff].

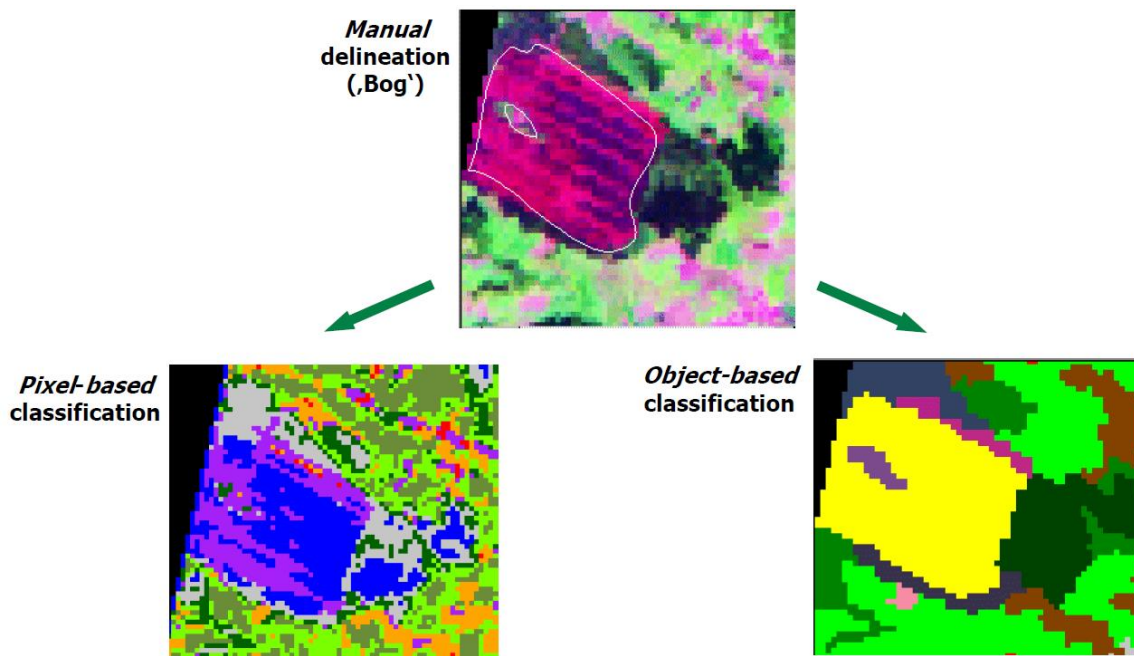


Abbildung 31: Gegenüberstellung von pixelbasierter und objektbasierter Klassifikation [LAN-06, S.16]

5.3.4 Klassifikation von LAS-Daten

Die Ergebnisse von UAV-Photogrammetrie-Softwares liefern neben Orthophotos auch Punktwolken und texturierte Meshes. Durch die Klassifikation von LAS-Daten können beispielsweise Boden, Vegetation, Gebäude et cetera besser unterteilt werden.

Im Gegensatz zu den anderen bereits beschriebenen Klassifikationsmethoden werden hier nicht Pixel, sondern Elemente einer Punktwolke zur Klassifikation herangezogen. Da unterschiedliche Oberflächen unterschiedliche Reflexionseigenschaften besitzen, können diese anhand dieser Eigenschaften klassifiziert werden [ELA-14, S. 79ff].

An den mit UAV-Photogrammetrie-Software erstellten Punktwolken ist problematisch, dass diese im Unterschied zu den LAS-Punktwolken, die mit Hilfe von Laserscanning generiert wurden, keine Reflexionseigenschaften, sondern lediglich Lage- und RGB-Werte besitzen. Dadurch lassen sich keine LAS-Klassencodes generieren. Dennoch ist es möglich –

beispielsweise mit Hilfe von ArcMap oder ArcGIS Pro den Datensatz in Boden und Nicht-Boden zu unterteilen. Dabei wird den LAS-Punkten ein von der ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) vorgegebener Wert zugewiesen. In weiterer Folge kann auch die Vegetation nach ihrer Höhe über dem Boden unterteilt werden [ESR-18]. Die Unterteilung in Boden- und Nichtboden wird sich im empirischen Teil als sehr nützlich herausstellen, da dadurch Wald- und Wiesenflächen deutlicher unterschieden werden können als beispielsweise mit Hilfe der überwachten Klassifikation, da sich die RGB-Werte von Wald- und Wiesenflächen oft nur geringfügig unterscheiden.

6 Möglichkeiten von UAV-Aufnahmen für die topographische Kartographie

Nachdem nun die wichtigsten Begriffe wie Topographische Kartographie, UAVs oder Bildklassifikation definiert wurden, wird in diesem Kapitel erläutert, wie mit Hilfe von UAV-Aufnahmen anhand diverser Klassifikations- und Bildinterpretationsverfahren topographische Karten erstellt werden können.

6.1 Umsetzung des Structure from Motion-Prinzips zur Erstellung von Orthophotos, Geländemodellen und 3D-Daten als Grundlage für die topographische Karte

Da einzelne Fotos eine zu geringe Ausprägung aufweisen und durch den Neigungswinkel der Kamera und die Kameraperspektive verzerrt sind, sind UAV-Photogrammetrie-Softwares zur Bearbeitung der Einzelbilder notwendig. Bei ausreichender Überlappung der Bilder und Flugstreifen können nicht nur entzerrte Orthophotos erstellt werden, sondern auch 3D-Modelle, Gelände- und Oberflächenmodelle. Die Möglichkeiten der UAV-Photogrammetrie werden in Kapitel 5.2 näher beschrieben.

Der Ablauf eines UAV-Photogrammetrie-Prozesses besteht aus drei Phasen: der Planungsphase, der Flugphase und der Datenverarbeitung. In der Planungsphase wird das Ziel und das Fluggebiet definiert. Das Ziel einer Befliegung als Grundlage für eine topographische Karte ist es, ein möglichst großes Gebiet zu befliegen, dieses mit möglichst geringem Aufwand nach den jeweiligen Objekten zu klassifizieren und mit Höheninformation zu versehen.

Von dem primären Ziel der Aufnahme sind auch mehrere Faktoren, wie die Wahl der UAV, die Flughöhe und die Flugroute abhängig. So ist es sinnvoll, in möglichst hoher Flughöhe zu fliegen und je nach Verfügbarkeit eine Fixed Wing UAV zu verwenden, da diese für die Aufnahme großer Flächen geeigneter sind als Rotary Wing UAVs. Die geringere Bildauflösung – ist dabei immer noch ausreichend beziehungsweise für kleinmaßstäbige Karten sogar noch zu hochauflösend. Da auch die Flugroute vom Aufnahmeziel abhängig ist, muss auch diese angepasst werden: So sind für flächenhafte Aufnahmen, die als Grundlage für topographische Karten genutzt werden sollen, mehrere, stark überlappende Flugstreifen aufzunehmen.

Ist das Aufnahmegebiet befliegen, sind – wie oben bereits erwähnt – UAV-Photogrammetrie-Softwares zu verwenden: Agisoft Photoscan, Pix4D oder ArcGIS Drone2Map wandeln die einzelnen Bilder in Orthophotos, Gelände-, Oberflächen- und 3D-Modelle um, welche als Grundlage für die Klassifikation dienen.

6.2 Verwendung der Orthophotos als Grundlage für die Klassifikation

Im Gegensatz zu Satellitenbildern wie LANDSAT oder SENTINEL verfügt der Großteil der mit Hilfe von UAV generierten Orthophotos lediglich über drei Kanäle: Rot, Grün und Blau. Befinden sich auf der UAV als Nutzlast andere Sensoren, ist es auch möglich, Multispektralaufnahmen zu erstellen. Somit verfügen die mit Hilfe von UAVs generierten Orthophotos über eine hohe räumliche Auflösung. Die spektrale Auflösung ist jedoch deutlich geringer als bei Satellitenbildern. Aufgrund dieser niedrigen spektralen Auflösung ist eine genaue Klassifikation, wie dies bei Satellitenaufnahmen möglich ist, nur eingeschränkt durchführbar. Es empfehlen sich hierfür hauptsächlich überwachte Klassifikationsmethoden wie das Maximum Likelihood- oder das Support Vector Machine-Verfahren oder Segmentation.

Bei der überwachten Klassifikation werden vorab Trainingsgebiete definiert, um die Bildelemente anhand der Ausprägung ihrer Farbwerte den definierten Klassen zuzuordnen. Die Erstellung dieser Trainingsgebiete ist abhängig vom jeweiligen Untersuchungsgebiet. Es empfiehlt sich, sich an die gängigen Karteninhalte (versiegelte Fläche, Gewässer, Bebauung und Vegetation) zu halten. Einzelobjekte (wie Zäune, Strommasten, etc.) lassen sich anhängig von ihrer Größe nur schwer klassifizieren und werden deshalb nicht berücksichtigt. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung können die Orthophotos jedoch als Digitalisierungsgrundlage verwendet werden.

In Kapitel 7 werden die Möglichkeiten der mit Hilfe von UAV-generierten Orthophotos für folgende Karteninhalte behandelt: Gewässer, Verkehrswege, Vegetation und Bebauung. Dies geschieht in ArcGIS mit Hilfe diverser Klassifikationsverfahren.

6.3 Verwendung der 3D-Daten als Klassifikationshilfe

Gerade bei Vegetation und Bebauung sind die RGB-Orthophotos nicht ausreichend, um zuverlässige Klassifikationsergebnisse zu liefern, da beispielsweise im Vegetationsbereich aufgrund ähnlicher Grün-, Braun- oder Grautöne Klassifikationsproblemen entstehen können. UAV-Photogrammetrie-Softwares liefern jedoch nicht nur Orthophotos, sondern auch 3D-Daten. Während die digitalen Geländemodelle lediglich der Geländedarstellung dienen, können die 3D-Punktwolken auch zur Klassifikation herangezogen werden.

Diese kann in diversen GIS-Softwares (in diesem Fall ArcGIS Pro) oder einem Programm zur Bearbeitung von Punktwolken klassifiziert werden. Dazu wird die Punktwolke in Boden und Nicht-Boden eingeteilt und in ein Rasterformat umgewandelt, damit dieses als Maske zur Optimierung der Klassifikation herangezogen werden kann. Dies empfiehlt sich vor allem bei den Karteninhalten Vegetation (Wald) und Bebauung. Denn wo die Punktwolke als Boden klassifiziert wurde, kann sich kein Gebäude oder Baum befinden, auch wenn dies in der überwachten Klassifikation fälschlicherweise so berechnet wurde. Somit wird die überwachte Klassifikation mit Hilfe der Punktwolke „bereinigt“: Hierzu wird die klassifizierte Punktwolke in ein Rasterbild umgewandelt und als Maske verwendet. Es

werden somit nur jene Bereiche der überwachten Klassifikation für Wald oder Bebauung berücksichtigt, wo sich kein Boden befindet.

Die mit Hilfe von UAV-Photogrammetrie-Software erstellten 3D-Daten stellen also nicht nur eine Ergänzung für die Klassifikation dar, sondern können je nach Bodenbedeckung auch als Interpolationsgrundlage für die Erstellung des digitalen Geländemodells verwendet werden.

6.4 Einsatz des digitalen Geländemodells für die Geländedarstellung

UAV-Photogrammetrie-Softwares liefern nicht nur hochauflösende Orthophotos und digitale Oberflächenmodelle, sondern erstellen auch digitale Geländemodelle. Hier werden also die sich auf der Erdoberfläche befindlichen Objekte aus dem Oberflächenmodell entfernt, um lediglich die Erdoberfläche darzustellen. Dies ist besonders bei starker Vegetation und Bebauung schwierig. Die mit Hilfe von UAV-Photogrammetrie-Software erstellten Geländemodelle sind also besonders bei dichter Vegetation unzuverlässig. Es empfiehlt sich auch das Setzen von Passpunkten oder Ground Control Points um die Genauigkeit des Geländemodells beziehungsweise des Oberflächenmodells zu erhöhen. Zu beachten ist jedoch die hohe räumliche Auflösung: Im Vergleich zu aus Satelliten generierten Geländemodellen, die eine geringe räumliche Auflösung besitzen, stellen die UAV-basierten Geländemodelle trotz der Ungenauigkeiten eine gute Unterstützung für die Erstellung topographischer Karten dar.

7 Use Cases – Nutzung von UAVs für die topographische Kartographie am Beispiel dreier Befliegungen

Um die Möglichkeiten von UAVs für die topographische Kartographie anhand praktischer Beispiele aufzuzeigen, werden die im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführten UAV-Befliegungen behandelt. Zunächst wird das verwendete Equipment und das Befliegungsgebiet vorgestellt. Danach werden die Ergebnisse der Klassifikation präsentiert und die Nutzung von UAV-Aufnahmen für die einzelnen Kartenelemente diskutiert.

7.1 Eingesetztes Equipment

Im Rahmen der Masterarbeit wurden Befliegungen durchgeführt, für die eine DJI Phantom 4 Pro zum Einsatz kam. Diese 1,38 Kilogramm schwere Rotary Wing UAV verfügt pro Batterie über eine maximale Flugzeit von rund 30 Minuten. Abhängig von der Fluggeschwindigkeit, der Höhe und der Temperatur können problemlos mehrere Hektar Fläche abgeflogen werden. Geflogen wurde manuell – also ohne Flugplanungssoftware – in einer Höhe zwischen 50 und 100 Metern.



Abbildung 32: DJI Phantom 4 Pro inklusive eines Ground Control Points [eigene Abbildung]

Für das Kapitel „Bebauung“ wurde eine Erhebung mit Hilfe einer DJI Spark durchgeführt. Diese 388 Gramm schwere Mini-Drohne verfügt über eine schwächere Kamera, eine einfachere Kamerabefestigung (=Gimbal) und eine geringere Akkulaufzeit als die DJI Phantom. Da sie bis zu einer gewissen Höhe jedoch nicht als unbemanntes Luftfahrzeug, sondern als Spielzeug klassifiziert wird, sind niedrige Flüge auch ohne Genehmigungen möglich. Dadurch ergibt sich zwar eine geringere Auflösung und Genauigkeit jedoch ist es

mit deutlich geringerem Aufwand möglich in bebautem Gebiet zu fliegen. Die im Kapitel „Bebauung“ verwendete Befliegung wurde in Portoroz (Slowenien) durchgeführt. Hier wurden einzelne Gebäude aufgenommen.



Abbildung 33: Setzen von Ground Control Points mit Hilfe eines Leica GG04 Plus GNSS-Geräts [eigene Abbildung]

Bei der Aufnahme Retz und Podhradí nad Dyjí I wurden Ground Control Points (GCPs) gesetzt. Dabei fungierten bemalte Holzplatten als Passpunkte. Die Koordinaten dieser Punkte wurden mit einem Leica GG04 Plus GNSS-Gerät gemessen. Dieses besonders leichte GNSS-Gerät liefert korrigierte Koordinaten mit einer vertikalen und horizontalen Genauigkeit von 2-3cm Klassifikation an ein Smartphone. Im Anschluss werden diese Koordinaten exportiert und in der jeweiligen UAV-Photogrammetrie-Software mit den Bildern verknüpft.

Als UAV-Photogrammetrie-Software wurde in dieser Masterarbeit ArcGIS Drone2Map verwendet. Drone2Map liefert je nach Konfiguration folgende 2D- und 3D-Ergebnisse:

- Orthomosaik
- DTM (Digital Terrain Model): Geländemodell
- DSM (Digital Surface Model): Oberflächenmodell
- Point Cloud (LAS, PLY, XYZ, ZLAS)
- Mesh (MTL, OBJ, 3D.PDF)

Ebenso wie bei anderen UAV-Photogrammetrie-Softwares wird nach der Erstellung der Ergebnisse ein Processing Report erstellt, der wichtige Parameter wie Genauigkeit (mean RMS error) oder Ground Sample Distance (GSD) enthält.

7.2 Befliegungen

Ziel dieser Masterarbeit ist es, die Möglichkeiten und Problemstellungen von UAVs als Aufnahmegerät für die topographische Kartographie auszuloten. Deshalb war es wichtig folgende Rahmenbedingungen zu beachten:

Vor allem sollte vor und während der Vegetationsperiode aufgenommen werden und möglichst alle Elemente einer topographischen Karte enthalten sein. Dass kleine Bereiche beflogen wurden, hängt einerseits mit gesetzlichen Regulierungen zusammen – so muss auf Sicht geflogen werden, weshalb die UAV nicht zu weit vom Piloten entfernt sein darf –, andererseits damit, den Rechenaufwand für UAV-Photogrammetrische Prozesse und die Klassifikation so gering wie möglich zu halten.

Eine Übersicht über die durchgeführten Befliegungen findet sich in der folgenden Tabelle:

	Podhradí nad Dyjí (CZ) I	Retz (NÖ)	Podhradí nad Dyjí (CZ) II	Portoroz
Datum der Befliegung	24.3.2018	28.4.2018	1.7.2018	18.7.2018
Flughöhe	90m	50m	100m	30m
Aufgenommene Fläche	12,85ha	1,72ha	16,15ha	2,5ha
Ground Sampling Distance (Größe eines Pixels)	2,47cm	1,41cm	3,07cm	2,91cm
Ziel der Aufnahme	• Aufnahmen vor der Vegetationsperiode • Nadelwald • Gewässer • Straßen	• Aufnahmen während der Vegetationsperiode • Weinbau • Fels / Gelände	• Aufnahmen während der Vegetationsperiode • Wald • Gewässer • Straßen • Gelände	• Aufnahmen von Gebäuden
Geo-referenzierung mit Hilfe von GCPs	Ja, ohne Korrekturdaten; Genauigkeit: mean RMS error = 0,074m	Ja, mit Korrekturdaten; Genauigkeit: mean RMS error = 0,039m	Nein	Nein

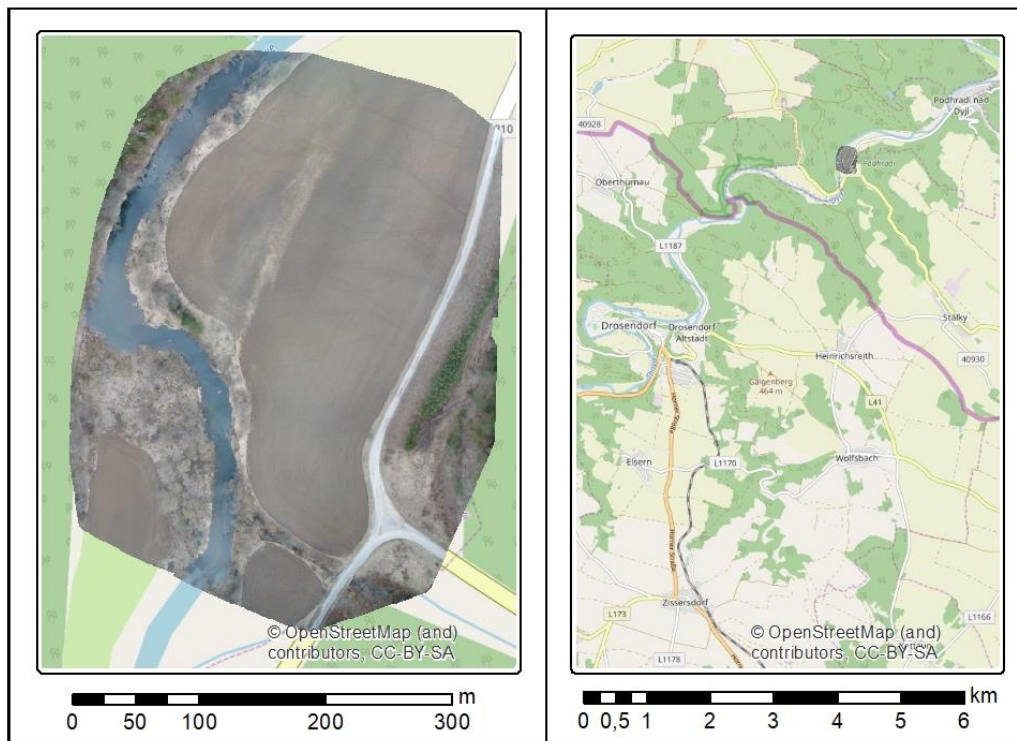


Abbildung 34: Übersicht des ersten Aufnahmegebiets bei Podhradí nad Dyjí [eigene Abbildung]

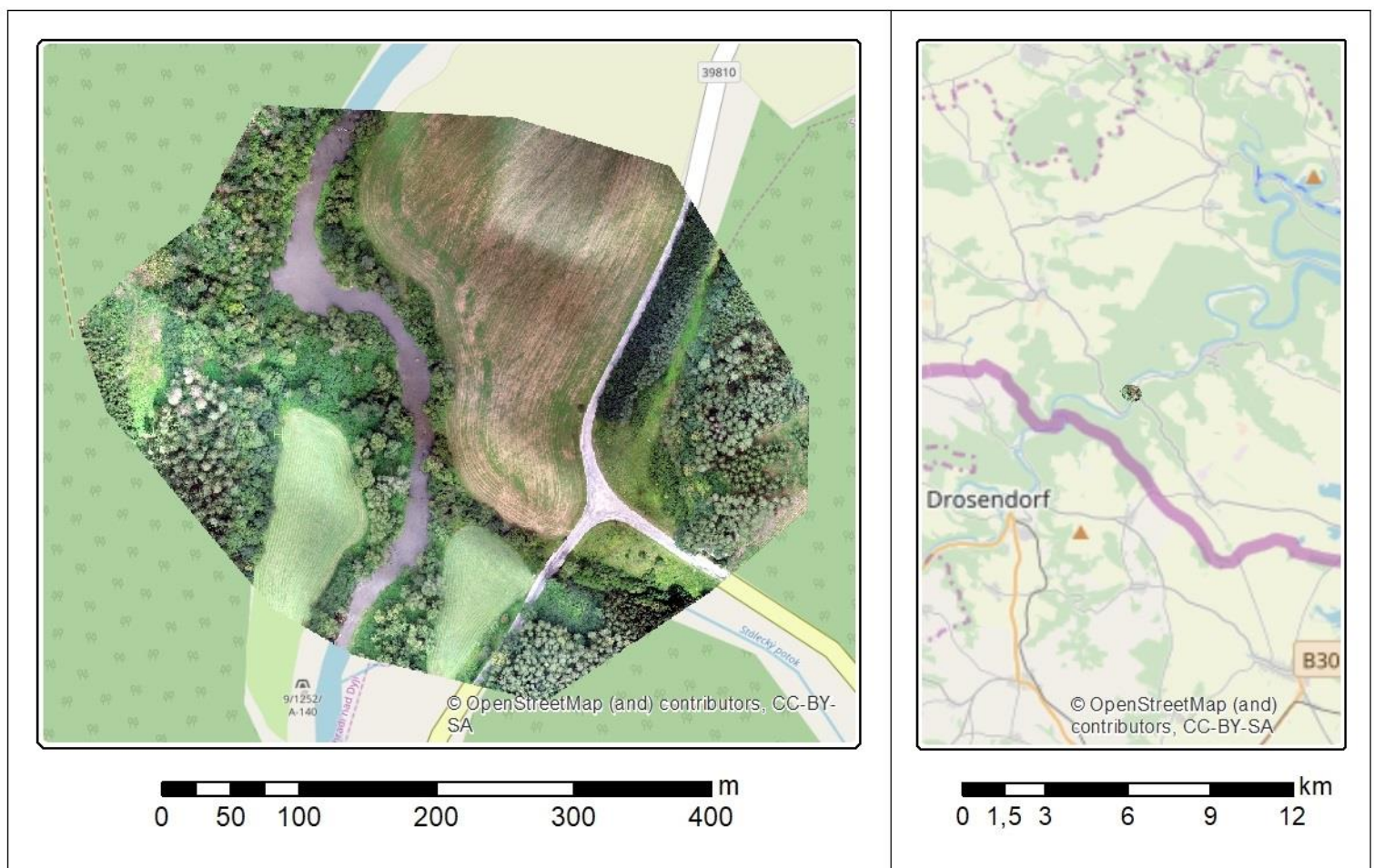


Abbildung 35: Übersicht über die zweite Befliegung in Podhradí nad Dyjí [eigene Abbildung]

Das Aufnahmegebiet „Podhradí nad Dyjí“ befindet sich am tschechischen Teil der Thaya nahe Podhradí nad Dyjí und Stálky. Dass in Tschechien aufgenommen wurde, hat pragmatische Gründe: Die Austro Control-Lizenz für die verwendete UAV war zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausgestellt, in der Tschechischen Republik darf hingegen über nicht bebauten Gebiet für nicht-gewerbliche Zwecke ohne Lizenz geflogen werden.

Das Gebiet bietet zudem gute Voraussetzungen: So befinden sich Nadel – und Laubbäume, Äcker, Wiesen, Straßen und größere Fließgewässer (Thaya) auf dem Gebiet. In der ersten Aufnahme („Podhradí nad Dyjí I“) wurde vor der Vegetationsperiode geflogen, so dass die Laubbäume noch unbelaubt waren. Die zweite Befliegung („Podhradí nad Dyjí II“) wurde im Juli – also mitten in der Vegetationsperiode – auf demselben Gebiet durchgeführt. Die Befliegungsfläche ist bei der zweiten Befliegung um etwa 4 Hektar größer, da bei der ersten Befliegung zu wenig Geländeneigung aufgenommen. Weitere Informationen zu den Testgebieten sind der Tabelle auf Seite 64 zu entnehmen.

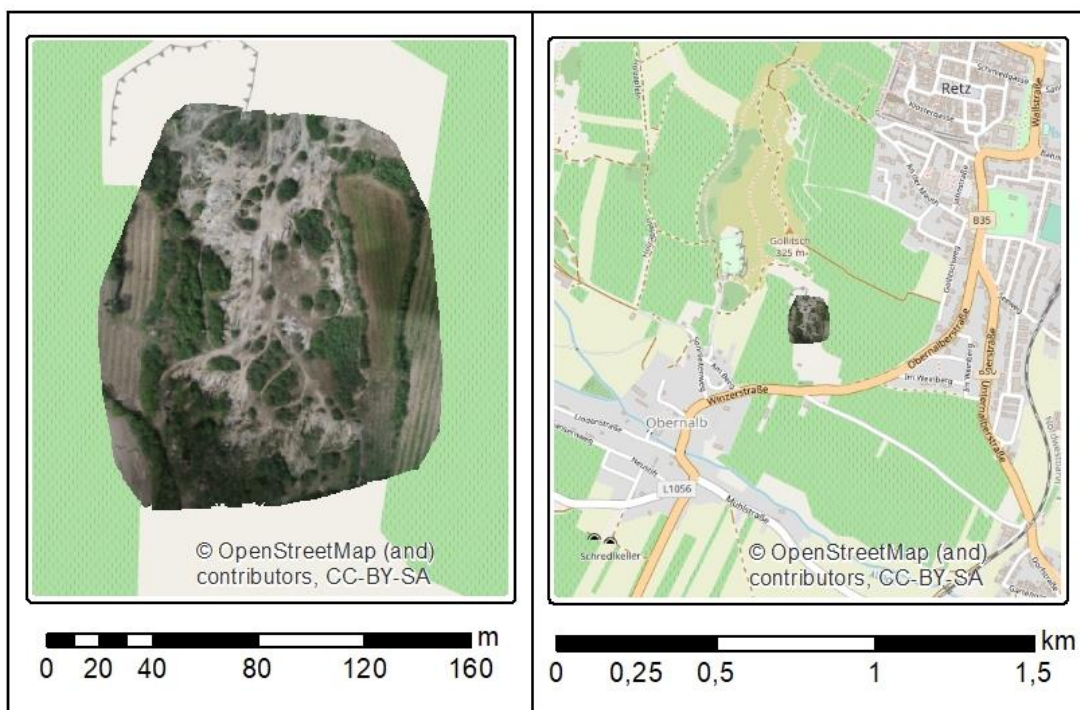


Abbildung 36: Übersicht des zweiten Aufnahmegebiets [eigene Abbildung]

Das zweite Aufnahmegebiet befindet sich zwischen Retz und Obernalb in Niederösterreich. Bei diesem Gebiet handelt es sich um eine Mountainbike-Strecke mit vergleichsweise hoher Neigung, Felsflächen, Laubbaumbewuchs sowie Wiesen und Weingärten. Die Luftbilder wurden am 28.4.2018 aufgenommen, sodass die Vegetation bereits voll belaubt war. Hier wurde durch das Setzen von Ground Control Points die höchst mögliche Genauigkeit überprüft. Nähere Informationen zur Befliegung sind in der Tabelle auf Seite 64 ersichtlich.

7.3 Klassifikation

Um die einzelnen Kartenelemente extrahieren zu können, ist es notwendig, die Orthophotos entweder zu segmentieren und im Anschluss zu klassifizieren oder – wie im Kapitel „Klassifikationsmethoden“ beschrieben – mit Hilfe von Testgebieten zu klassifizieren.

7.3.1 Podhradí nad Dyjí I

Für die Klassifikation wurden zunächst mit Hilfe des ArcGIS-Classification-Wizards Testgebiete definiert und als Shapefile beziehungsweise Signature-File gespeichert. Eine Übersicht der Trainings-/Testgebiete finden sich in Abbildung 37. Es wurden 16 Gebiete in sechs Klassen definiert.

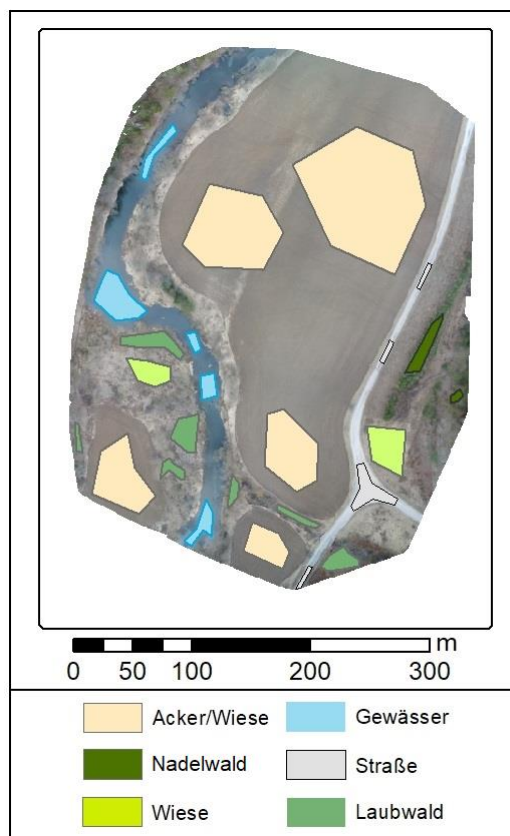


Abbildung 37: Definition der Trainingsgebiete „Podhradí nad Dyjí I“ [eigene Abbildung]

Nach der Definition der Trainingsgebiete wurden zwei verschiedene Klassifikationsmethoden durchgeführt: die Support Vector Machine - und Maximum Likelihood-Klassifikation. In Abbildung 38 werden die Ergebnisse der Klassifikation einander gegenübergestellt. Diese unterscheiden sich nur geringfügig.

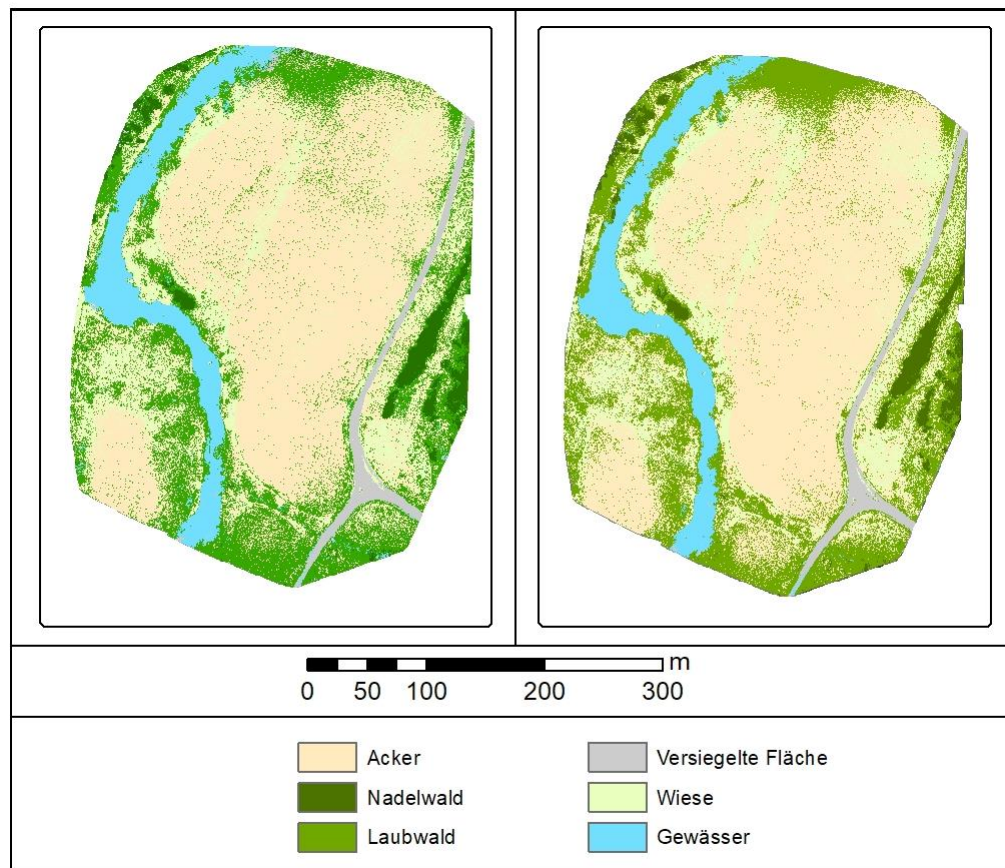


Abbildung 38: Gegenüberstellung von Support Vector Machine (links) und Maximum Likelihood (rechts)
Klassifikationsergebnissen [eigene Abbildung]

Neben dem Orthophoto wurden auch die LAS-Daten klassifiziert. Hier wurde die Punktwolke zunächst mit Hilfe von ArcGIS Pro in Ground/Non-Ground unterschieden. Hierzu wurde das Tool „Classify LAS Ground“ verwendet.

7.3.2 Podhradí nad Dyjí II

Ebenso wie bei der ersten Befliegung wurden auch bei der zweiten Befliegung zunächst Trainingsgebiete (26 Gebiete in 4 Klassen) definiert. Im Anschluss wurden mit Hilfe dieser Trainingsgebiete Maximum-Likelihood- und Support-Vector-Machine-Klassifikationen durchgeführt.

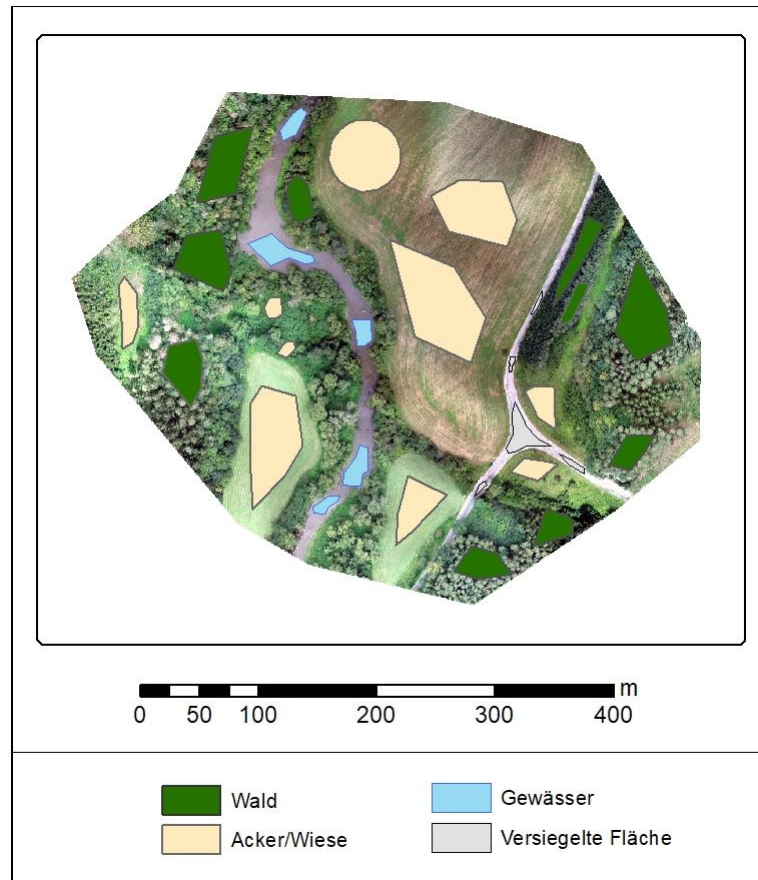


Abbildung 39: Trainingsgebiete der Befliegung „Podhradí nad Dyjí II“ [eigene Abbildung]

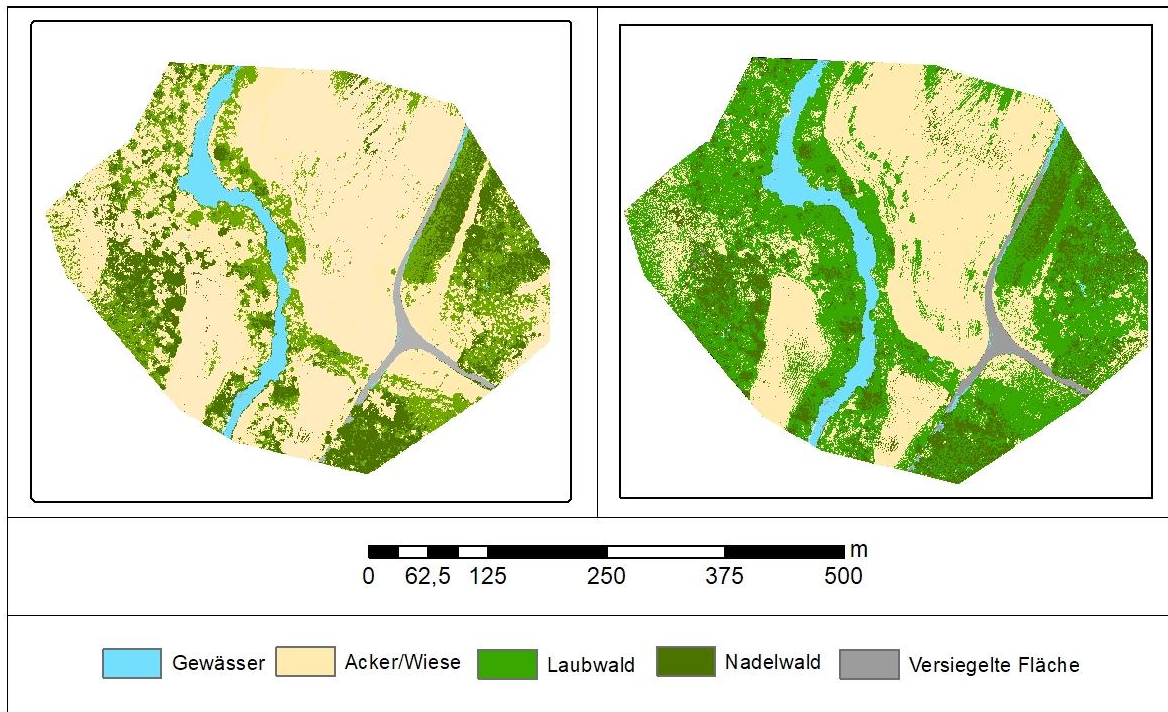


Abbildung 40: Gegenüberstellung von Maximum Likelihood (links) und Support Vector Machine (rechts) Klassifikationsergebnissen [eigene Abbildung]

Neben dem Orthophoto wurden auch bei dieser Befliegung die LAS-Daten klassifiziert, um eine bessere Klassifikation der Vegetation zu erreichen. Dabei wurden, wie schon bei der ersten Befliegung des Gebiets „Podhradí nad Dyjí“, die LAS-Daten in Boden und Nicht-Boden klassifiziert und nur die Boden-Daten als Raster exportiert, um diese in weiterer Folge als Maske zu verwenden.

7.3.3 Retz

Das Ziel der Befliegung in Retz war, die Vegetation während der Vegetationsperiode sowie das Gelände aufzunehmen und dabei die höchstmögliche Genauigkeit zu überprüfen. Für die Klassifikation wurden drei Trainingsgebiete verwendet: Boden, Fels und Vegetation. Danach wurde das Orthophoto mit Hilfe der Support-Vector-Machine-Klassifikation und der Maximum-Likelihood-Klassifikation klassifiziert.

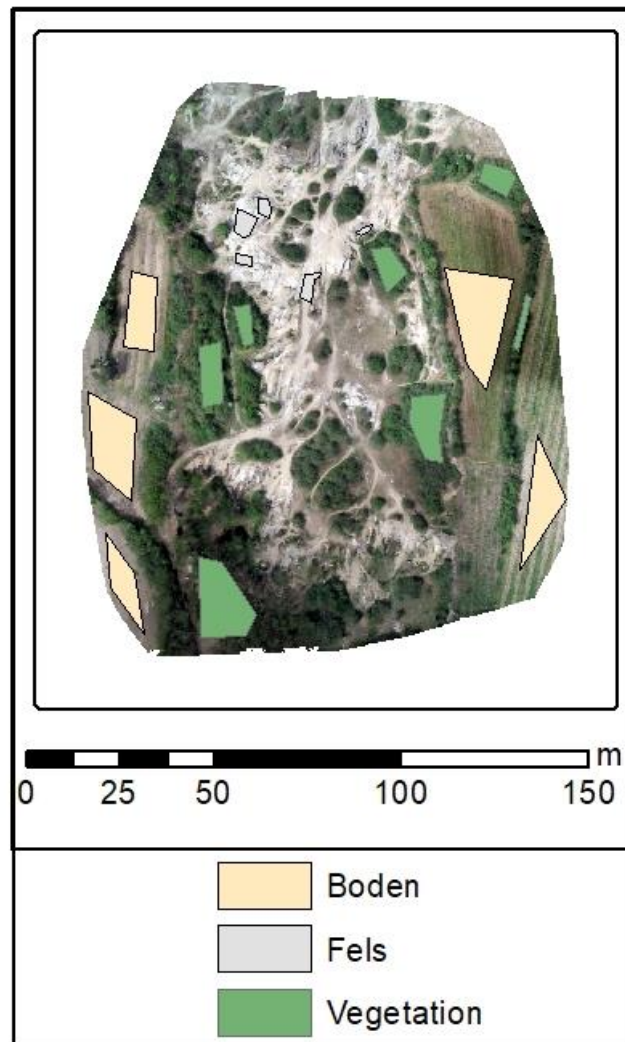


Abbildung 41: Trainingsgebiete der Befliegung in Retz [eigene Abbildung]

Bei der Erstellung der unterschiedlichen Klassifikationsmethoden zeigt sich abermals, dass die Klassifikationsergebnisse Großteils ähnlich, im Detail aber geringfügig voneinander abweichen können. So wirken die Ergebnisse der Maximum Likelihood-Klassifikation homogener. Allerdings werden in beiden Klassifikationsmethoden Wiesen am südöstlichen Teil des Orthophotos als Wald/Vegetation klassifiziert. Auch im Südwesten wurde Boden als Fels klassifiziert. In dieser Klassifikation zeigt sich ein für UAV-Aufnahmen typisches Problem: Schattenwurf. Dies zeigt sich vor allem am westlichen Rand des Orthophotos bei den Bäumen.

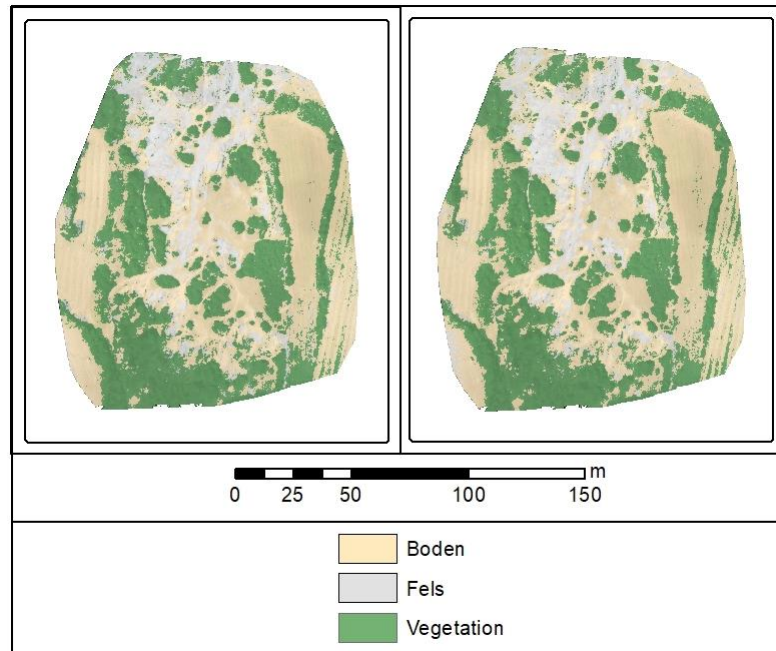


Abbildung 42: Gegenüberstellung von Support Vector Machine (links) und Maximum Likelihood (rechts) Klassifikationsergebnisse [eigene Abbildung]

7.4 Nutzung von UAV-Aufnahmen für die einzelnen Elemente einer topographischen Karte

In diesem Kapitel sollen die Möglichkeiten von UAV-Aufnahmen anhand selbst aufgenommener Beispiele analysiert werden. Ziel ist es alle Elemente der topographischen Karte zu extrahieren, um im Anschluss eine fertige topographische Karte in großem Maßstab generieren zu können.

7.4.1 Gewässer

Gewässer, in diesem Fall die Thaya, lassen sich aufgrund des Farbwerts leichter extrahieren als andere Objekte. Im Gegensatz zu anderen Elementen (wie innerhalb der Vegetation) gibt es hier kaum andere Objekte, die diese spektralen Charakteristika aufweisen, so dass die Klassifikation und Extraktion von Gewässern vergleichsweise einfach möglich ist.

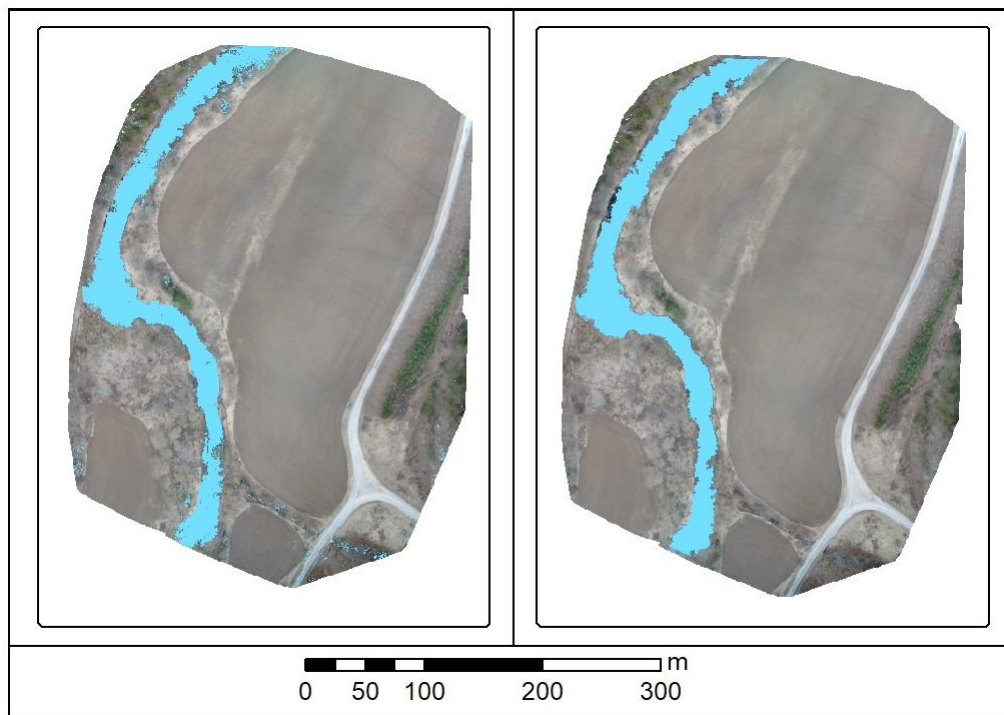


Abbildung 41: Gegenüberstellung der Gewässer des Gebiets Podhradí nad Dyjí I direkt nach der Klassifikation (links) sowie nach der Bearbeitung (rechts) [eigene Abbildung]

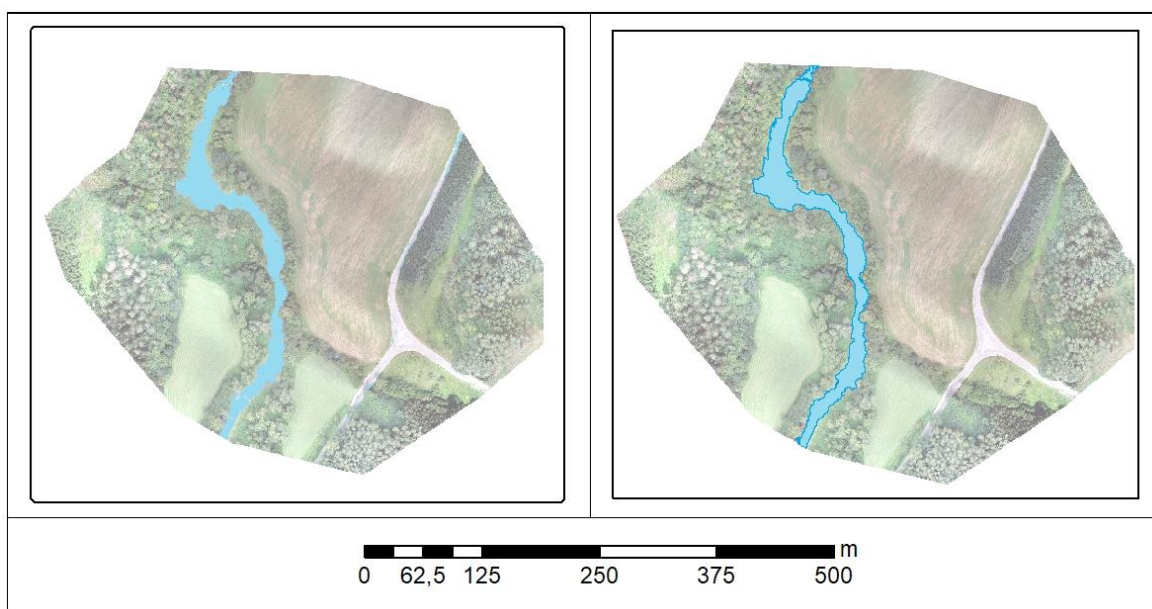


Abbildung 42: Gegenüberstellung der Gewässer des Gebiets Podhradí nad Dyjí II direkt nach der Klassifikation (links) sowie nach Bearbeitung (rechts) [eigene Abbildung]

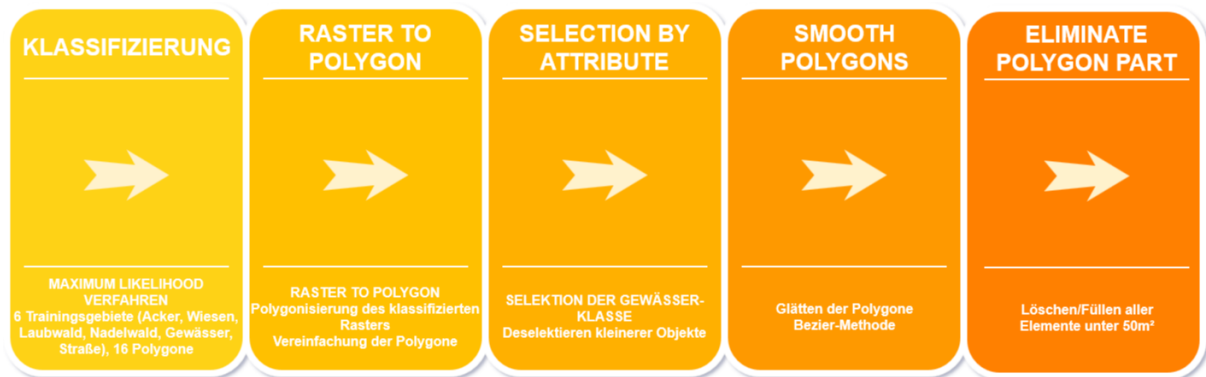


Abbildung 43: Workflow für die Extraktion des Gewässers [eigene Abbildung]

Folgende Schritte wurden für die Extraktion des Gewässers durchgeführt:

Klassifikation des Testgebiets (Podhradí nad Dyjí I&II) mit Hilfe von Trainingsgebieten anhand des Maximum-Likelihood-Verfahrens:

Definiert wurden folgende sechs Trainingsgebiete: Acker, Fluss, Laubwald, Nadelwald, Straße, Wiese. Diese Trainingsgebiete sind in Abbildung 35 und 37 ersichtlich. Das klassifizierte Rasterbild wird in Abbildung 36 und 38 dargestellt. Für die Auswahl des Flusses wurde bei „Podhradí nad Dyjí I“ die Klassifikationsmethode Support Vector Machine gewählt. Dabei wurde die Thaya geringfügig besser klassifiziert. Der gesamte Fluss wird der Klasse „Fluss“ zugewiesen. Einzelne kleinere Ausreißer finden sich beispielsweise am südlichen Teil der Straße. Hier wurde ein Teil der Straße als Gewässer klassifiziert, obwohl es sich hierbei um eine Straße handelt. Auch im Laubwald finden sich vereinzelt Pixel, die der Klasse „Fluss“ zugewiesen wurden. Allerdings wurden nicht alle Gewässer identifiziert. Von Südosten kommend fließt ein Bach durch den Wald unter der Straße hindurch in die Thaya. Dieser Bach wurde nur teilweise identifiziert, fällt allerdings aufgrund seiner geringen Größe der Generalisierung zum Opfer. Vor allem in der Vegetationsperiode konnte der Bach aufgrund der Belaubung kaum identifiziert werden.

Polygonisierung von Gewässer:

Durch das ArcGIS-Tool „Raster to Polygon“ wurden jene Pixel, die dem Rasterwert „Gewässer“ zugeordnet wurden, zusammengefasst, vereinfacht und polygonisiert.

Glätten der Polygone:

Mit Hilfe des ArcGIS-Tools „Smooth Polygon“ wurden die Kanten der Polygone geglättet. Beim Glätten wurde bewusst die Bezier-Methode gewählt, welche die ursprünglichen Umrisse besser beibehält als etwa PAEK (=Polynomial Approximation with Exponential Kernel). Um einzelne Inselflächen im Gewässer zu eliminieren, wurde das Tool „Eliminate Polygon Part“ mit einer Toleranz von 50m² angewandt. Somit wurden alle etwaigen Inseln, die durch Treibholz oder Steinen entstehen, aus dem Polygon ausgeschlossen und nur der Umriss der Thaya dargestellt.

Bei den Gewässern ergaben sich folgende Probleme:

- Die Thaya wurde gut klassifiziert, allerdings wurden einige wenige Flächen auf dem südlichen Teil der Straße als Gewässer identifiziert und klassifiziert. Diese wurden ebenso wie einige Bildelemente im Laubwald, die als Gewässer identifiziert wurden, ausgeblendet.
- Der Bach, der aus dem Südosten in die Thaya fließt, wurde nur vereinzelt identifiziert. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass der Bach durch den Wald fließt und deshalb Bäume über den Bach ragen können. Dieser Bach war jedoch nur bei der Aufnahme „Podhradí nad Dyjí I“ sichtbar, da bei der Aufnahme „Podhradí nad Dyjí II“ die Vegetation zu dicht war und den Bach somit verdeckte.
- Für eine optimale Erfassung der Gewässer empfiehlt es sich, nicht allzu kurz nach Niederschlägen aufzunehmen, da dadurch kleinere Wasserflächen auf Straßen oder in Feldern als Gewässer identifiziert werden. Außerdem verändern Niederschläge durch Trübstoffe, die durch Bodenerosion ins Gewässer gelangen, die Farbe des Gewässers.

7.4.2 Versiegelte Flächen

Bei den versiegelten Flächen wurde dieselbe Vorgehensweise wie bei den Gewässern verwendet. Nach der Klassifikation wurden jene Pixel, die der Klasse „Versiegelte Fläche“ zugeordnet wurden, mit Hilfe des ArcGIS-Tools „Raster To Polygon“ polygonisiert. Einige Pixel finden sich in allen anderen Flächen wie Acker, Wald, Gewässer und Wiese. Auf den im Orthofoto erkennbaren versiegelten Flächen sind einige Stellen als vermeintliche Wasserflächen oder Laubwald klassifiziert worden.

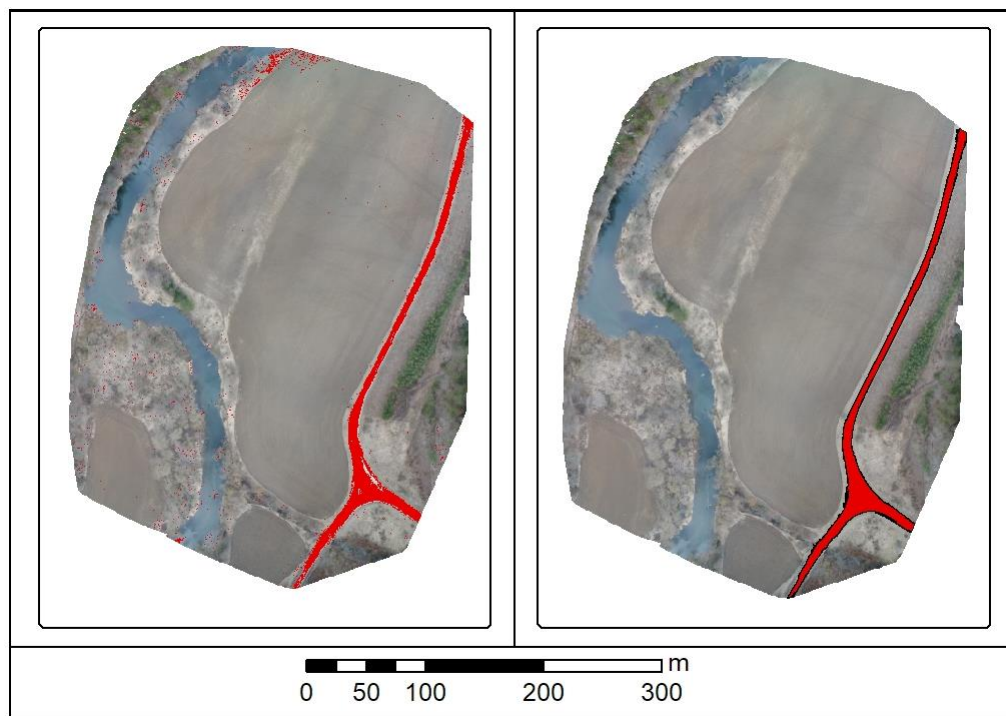


Abbildung 44: Die versiegelten Flächen direkt nach der Klassifikation (links) sowie nach der Polygonisierung und Glättung (Bezier-Methode) und nach dem Eliminieren der Polygonteile (rechts) [eigene Abbildung]

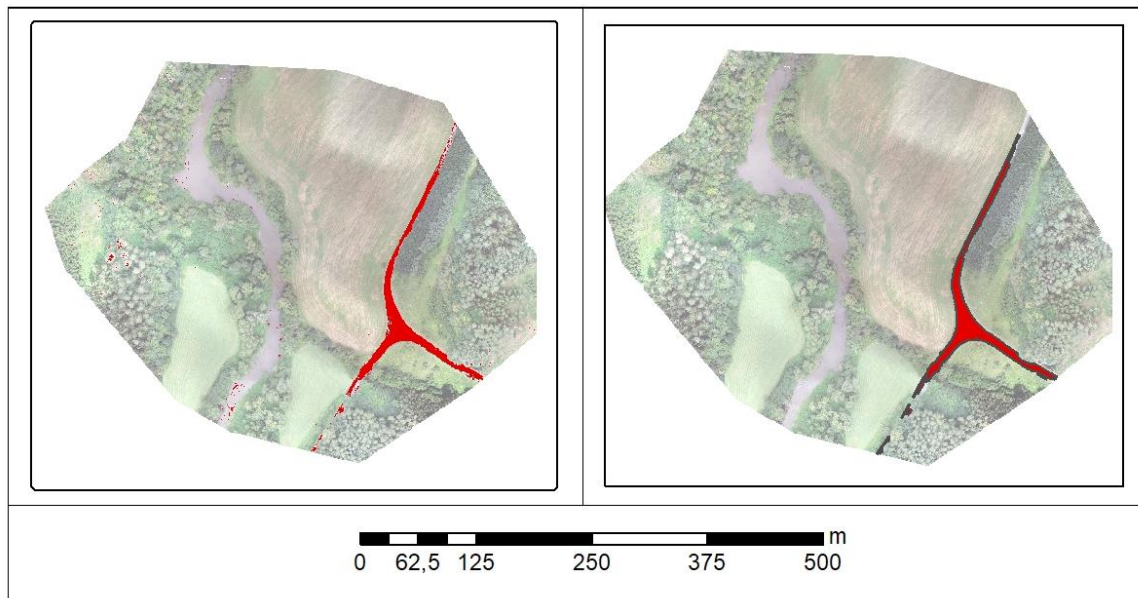


Abbildung 45: Gegenüberstellung der Klassifikationsergebnisse mit den bearbeiteten Ergebnissen (rechts). Die Straße ist aufgrund der Vegetation teilweise unterbrochen [eigene Abbildung].

Folgende Schritte wurden durchgeführt, um die Verkehrsflächen zu extrahieren:

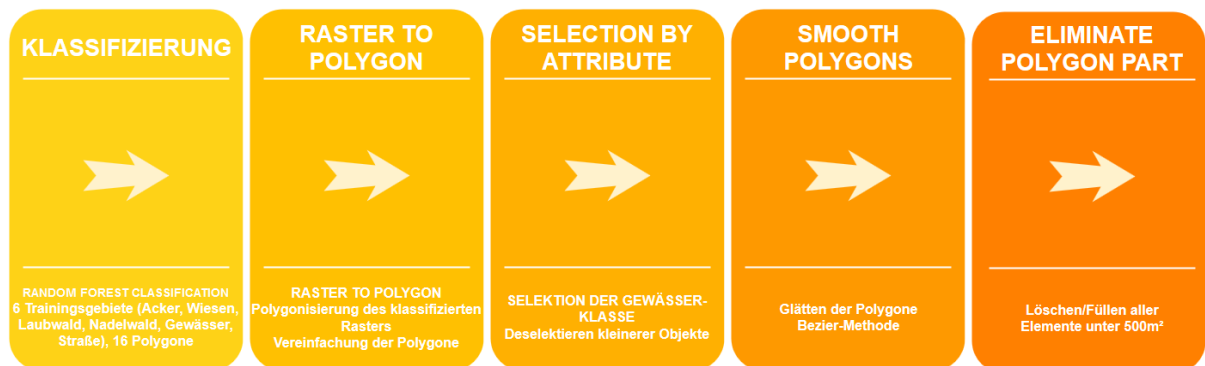


Abbildung 46: Workflow für die Extraktion von Verkehrsflächen [eigene Abbildung]

Diese oben genannten Schritte wurden bis auf die Klassifikationsmethode analog zu den Gewässern durchgeführt. Für die versiegelten Flächen wurde die Support-Vector-Machine-Klassifikation verwendet, da diese bei den Straßen – vor allem im südlichen Bereich – bessere Ergebnisse lieferte. Nach der Polygonisierung wurden die Polygone wie bei den Gewässern geglättet und Inselflächen mit Hilfe des Tools „Eliminate Polygon Parts“ eliminiert.

Die Straße ist bis auf einige Ausbuchtungen bei der Kreuzung und im südlichen Bereich der Straße homogen. Problematisch sind jedoch Pfützen, Erde oder Blätter auf der Straße, da dies zu Klassifikationsproblemen führen kann. Diese können im kleineren Rahmen mit Hilfe des Tools „Eliminate Polygon Part“ beseitigt werden. Sind diese mit Wasser, Erde oder

Blättern bedeckten Stellen allerdings zu groß und reichen beispielsweise quer über die Straße, kann die versiegelte Fläche nicht mehr als Polygon dargestellt werden.

Bei den versiegelten Flächen ergaben sich folgende Probleme:

- Generell lassen sich versiegelte Flächen gut als einheitliche Flächen klassifizieren und in weiterer Folge vektorisieren. Problematisch sind jedoch Stellen, die entweder nass oder mit Blättern oder Erde bedeckt sind. Diese können nicht als Verkehrsweg klassifiziert werden. Mit Hilfe des Tools „Eliminate Polygon Part“ werden diese „Inselflächen“ in den Verkehrsflächen beseitigt. Problematisch ist es, wenn diese Flächen am Rand der Straße liegen. In diesem Fall können die Straßen nicht in ihrer eigentlichen Form klassifiziert werden.
- In der Vegetationsperiode können Bäume über die Straße reichen, wodurch die darunter liegende Straße nicht als solche identifiziert werden kann. Dieses Problem trat vor der Vegetationsperiode nicht auf.
- Es empfiehlt sich also, vor der Vegetationsperiode und bei trockener Witterung aufzunehmen, um die oben genannten Probleme zu umgehen.

7.4.3 Vegetation

Die größte Problematik bei der Klassifikation von Vegetation liegt in der ähnlichen Farbgebung von Wald, Wiese und Ackerflächen. Um die Unterscheidung dieser Flächen zu verbessern, ist es notwendig, zusätzlich auch die 3D-Daten der UAV-Aufnahmen zu verwenden.

Wie bereits im Kapitel Klassifikation von LAS-Daten erwähnt, sind die Punktwolken der UAV-Aufnahmen eine wertvolle Quelle für die Optimierung der Klassifikationsergebnisse. Mit ihrer Hilfe kann der Boden mit Hilfe des Tools „Classify Ground“ klassifiziert werden. Somit kann definiert werden, dass sich auf Bodenflächen kein Wald befinden kann. In der Gegenüberstellung des Orthophotos und der Klassifikation zeigt sich deutlich, dass Nadelwaldgebiete (beispielsweise am östlichen oder westlichen Rand) zwar gut klassifiziert wurden, aber dass sich auf Ackerflächen und Wiesen zahlreiche Wald-„Einsprengsel“ befinden. Diese gilt es nun mit Hilfe der Klassifikation der LAS-Daten zu beheben.

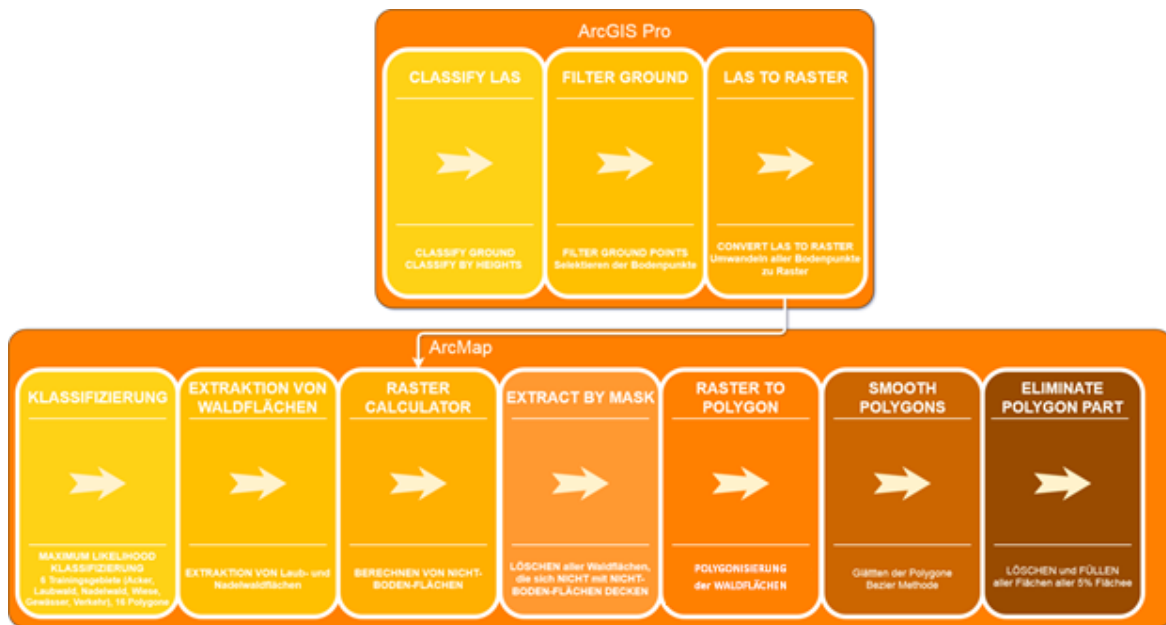


Abbildung 47: Workflow der Vegetationsextraktion [eigene Abbildung]

Mit Hilfe des ArcGIS Pro-Tools „Classify Ground“ können LAS-Daten in Boden und Nicht-Boden unterteilt werden. Nach der Unterteilung werden die als Boden klassifizierten LAS-Daten selektiert und als Raster exportiert. Dieser Raster kann nun in ArcMap als Maske verwendet werden, um jene Waldflächen, die sich nicht auf Bodenflächen befinden, zu löschen. Danach werden diese bereinigten Waldflächen polygonisiert und geglättet. Polygonteile ab einer gewissen Größe werden automatisch eliminiert.

Die kombinierte Klassifikation liefert deutlich validere Daten als die Maximum-Likelihood-Klassifikation ohne Berücksichtigung der Punktwolke. Zwar werden am Beispiel von „Podhradi nad Dyji I&II“ am nördlichen und südlichen Bildrand immer noch fälschlicherweise Waldgebiete festgestellt, doch ansonsten liefert die kombinierte Klassifikation bessere Ergebnisse als die alleinige Klassifikation des Rasters. Ein Nachteil ist hingegen, dass Baumschatten und Spiegelungen im Fluss sowie Äste oder Steine im Fluss auch bei Anwendung der kombinierten Klassifikation als Wald identifiziert werden. Dies ist damit zu erklären, dass Flussgebiete nicht als Boden klassifiziert werden. An Land liefert die kombinierte Klassifikation mit Ausnahme der Randgebiete jedoch plausible und valide Ergebnisse.

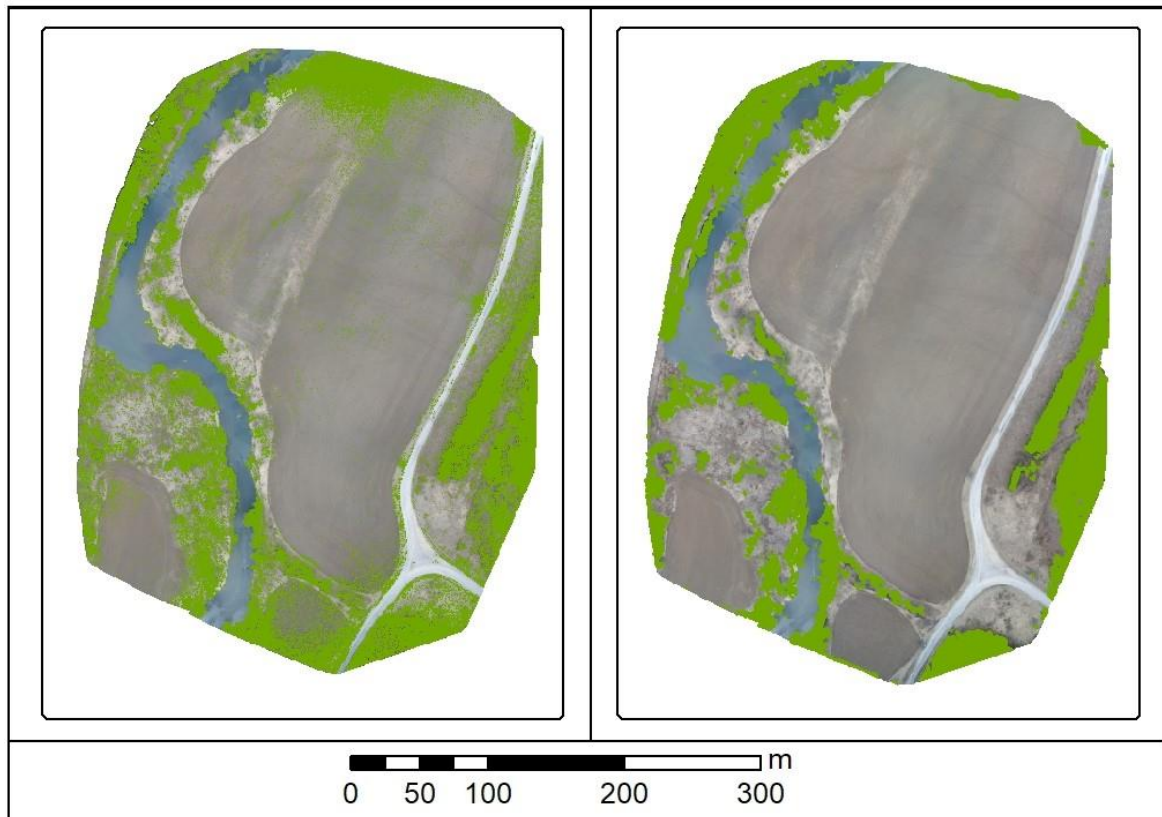


Abbildung 48: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Maximum Likelihood Klassifikation und der kombinierten Klassifikation [eigene Abbildung]

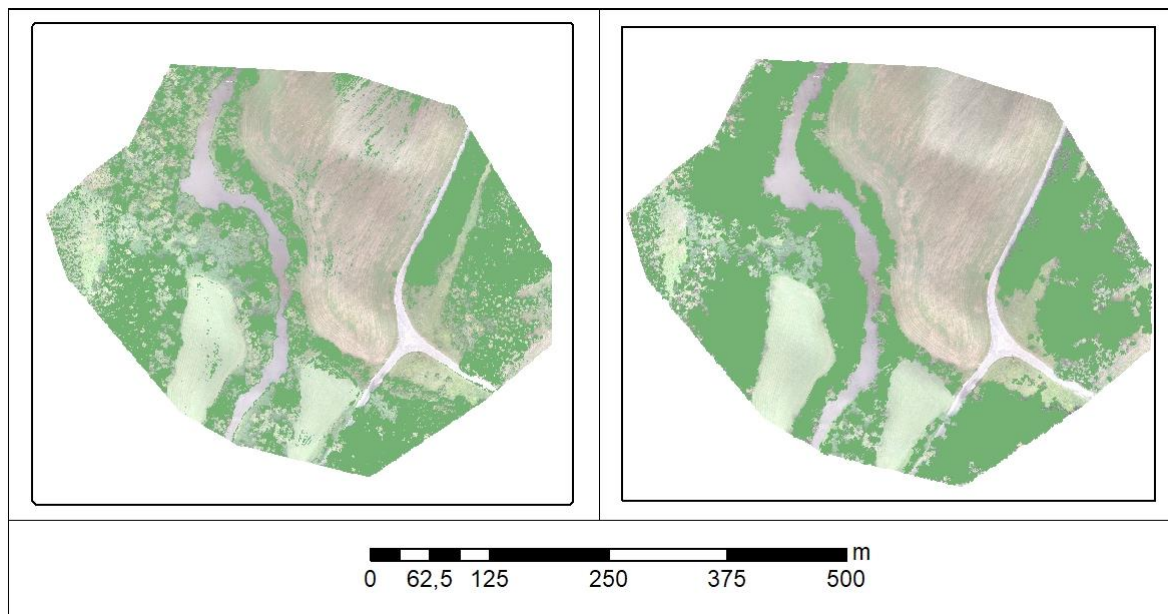


Abbildung 49: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Maximum Likelihood Klassifikation und der kombinierten Klassifikation [eigene Abbildung]

Im Zuge der Befliegung wurde das Gebiet „Podhradí nad Dyjí“ vor und während der Vegetationsperiode aufgenommen. Bei der Aufnahme vor der Vegetationsperiode zeigt



Abbildung 50: Dünne Laubbäume wie Pappeln können bei höherer Flughöhe nicht dreidimensional erfasst werden. [eigene Abbildung]

sich, dass sehr dünne Laubbäume als Boden klassifiziert wurden. Das liegt daran, dass das 3D-Modell beziehungsweise die Punktwolke aus Ressourcengründen per Default mit einer fünffachen Auflösung der Ground Sampling Distance, in diesem Fall also circa 12 cm, berechnet wird und somit sehr dünne, unbelaubte Stämme nicht erfasst werden können. Bei der Befliegung „Podhradí nad Dyjí II“ wurden diese Waldgebiete korrekt zugewiesen. Bei einem Einzelbild, aus welchem in weiterer Folge das Orthophoto berechnet wurde, sind diese dünnen Laubbäume gut ersichtliche.

Auch am Beispiel von Retz zeigt sich, dass die kombinierte Klassifikation verbesserte Ergebnisse liefert. Vereinzelt werden Büsche allerdings nicht mehr dargestellt, da Flächen unter 4m² ausgeblendet wurden. Somit wurden aber auch einzelne Weinreben, die groß genug waren, um bei den LAS-Daten nicht als Boden klassifiziert zu werden, nicht dargestellt. Wiesenflächen werden mit Hilfe der kombinierten Klassifikation ausgeblendet.

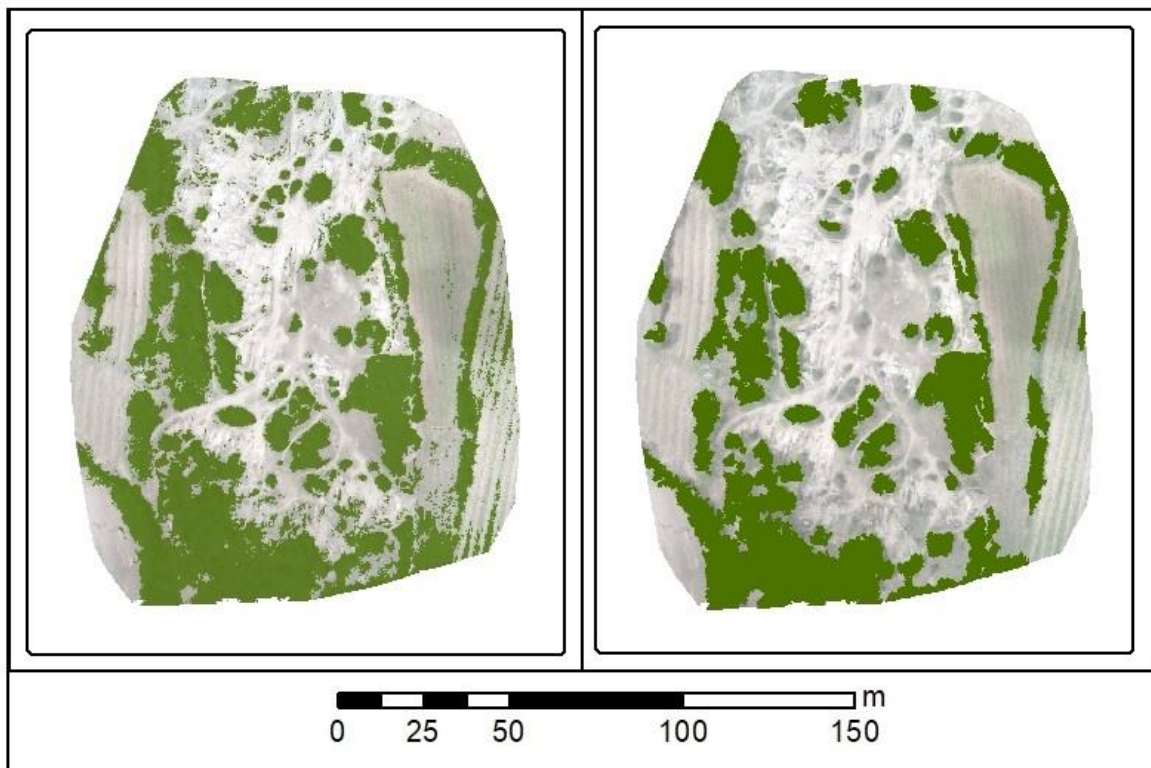


Abbildung 51: Gegenüberstellung der überwachten Klassifikation sowie der kombinierten Klassifikation mit Hilfe der LAS-Daten [eigene Abbildung]

Folgende Probleme traten bei der Vegetationsklassifikation auf:

- Vor der Vegetationsperiode wurden vor allem dünne Laubbäume wie Pappeln weder durch die Maximum Likelihood-Klassifikation noch durch die kombinierte Klassifikation als Vegetation erfasst. In der Vegetationsperiode wurden diese jedoch problemlos erfasst. Im Vergleich der Aufnahmen zeigt sich, dass in der Vegetationsperiode deutlich größere Waldflächen identifiziert wurden, als vor der Vegetationsperiode.
- Große Wiesen- und Ackerflächen wurden durch die Maximum-Likelihood-Klassifikation fälschlicherweise als Waldflächen identifiziert. Dieser Fehler ließ sich jedoch größtenteils mit Hilfe der kombinierten Klassifikation beheben.
- Für optimale Ergebnisse von Vegetation empfiehlt es sich, in der Vegetationsperiode aufzunehmen, um auch dünne Laubbäume, die außerhalb der Vegetationsperiode aus einer großen Höhe nicht erkannt werden, zu erfassen.

7.4.4 Bebauung

Der Karteninhalt „Bebauung“ wird in dieser Masterarbeit nur kurz behandelt, da die Erhebung von bebautem Gebiet in Österreich mit dem verwendeten Equipment nicht erlaubt ist. Aus diesem Grund wurde mit Hilfe einer DJI Spark in Slowenien bebautes Gebiet befliegen. Um die Gebäude aus dem Luftbild zu extrahieren, wurde im Gegensatz zu anderen Objekten keine Maximum-Likelihood- beziehungsweise Random-Forest-Klassifikation gewählt, sondern ein Segmentationsverfahren. Dieses wird im Kapitel „Objektbasierte Bildanalyse (Object based image analysis)“ näher beschrieben. Es unterscheidet sich deutlich von den oben genannten Klassifikationsmethoden, da es sich bei diesen um pixelbasierte Klassifikationsmethoden sind und deshalb Pixel aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften einer gewissen Klasse zugewiesen werden. Bei der objektbasierten Bildanalyse – beziehungsweise Segmentation – werden auch benachbarte Elemente berücksichtigt und dadurch homogene Gebiete ausgewiesen. Dieses Verfahren bietet sich aufgrund der klaren Strukturen von bebautem Gebiet an. Pixelbasierte Klassifikationsmethoden sind bei bebautem Gebiet nur bedingt geeignet, da die Farbe von Dächern stark variieren kann.

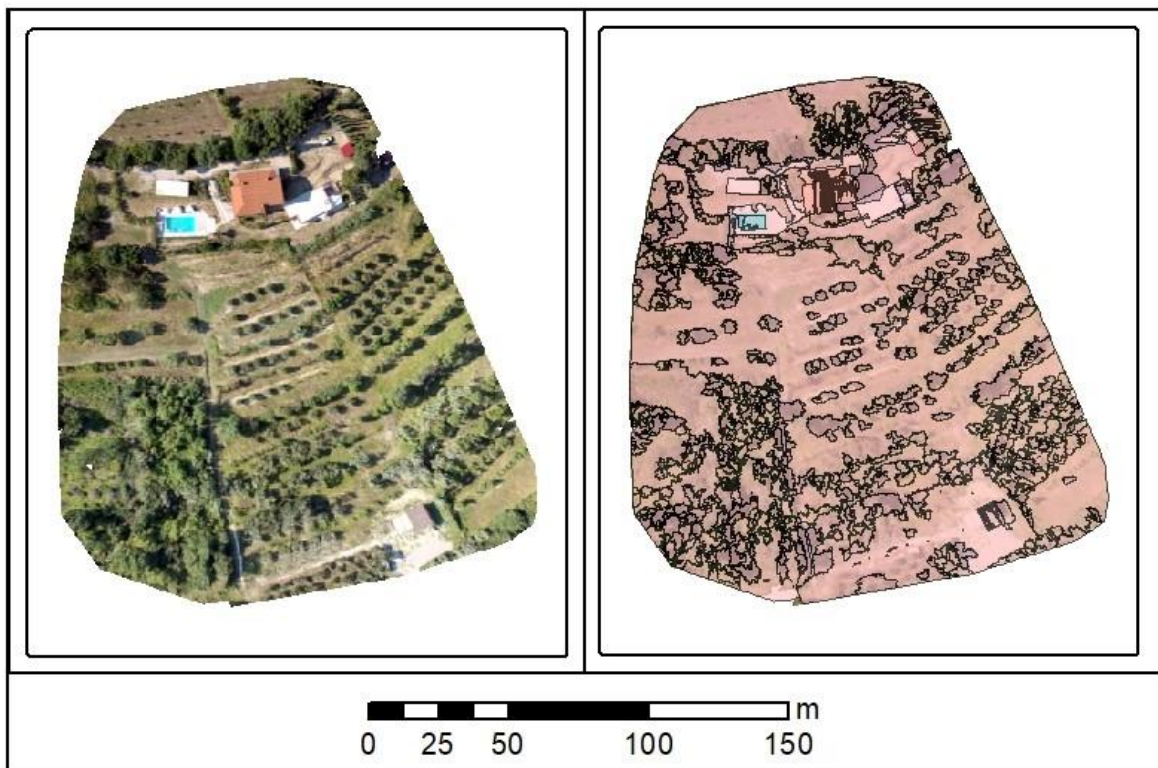


Abbildung 52: Gegenüberstellung des Orthophotos und des segmentierten Rasterbilds [eigene Abbildung]

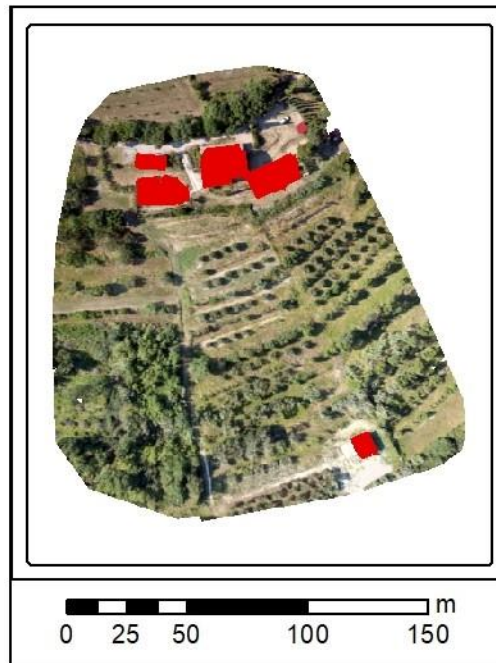


Abbildung 53: Polygonisierte Gebäude nach der manuellen Selektion von Gebäuden [eigene Abbildung]

Der Workflow wird in Abbildung 54 zusammengefasst. Zunächst wird das Orthophoto mit Hilfe des ArcGIS-Tools „Segmentation“ in homogene Flächen unterteilt, welche in weiterer Folge polygonisiert werden („Raster to Polygon“). Durch manuelle Auswahl können die Gebäude im Anschluss selektiert und exportiert werden.



Abbildung 54: Workflow zur Extraktion der Gebäude [eigene Abbildung]

Bei der Extraktion von Gebäuden ergaben sich folgende Probleme und Schwierigkeiten:

- Für das Befliegen von bebautem Gebiet sind eigene Genehmigungen notwendig. So darf in Österreich nur mit Klasse C-uLFZ geflogen werden und auch die Flüge müssen genehmigt werden.
- Da es sich bei dieser Befliegung nur um wenige Objekte gehandelt hat, wurde manuell selektiert. Sollen jedoch deutlich mehr Gebäude selektiert werden, so können vor der Polygonisierung Attribute zur Kompaktheit und Rechteckigkeit des Segments hinzugefügt werden und nur rechteckige beziehungsweise runde Segmente ausgewählt werden. Mit Hilfe der von UAV-generierten 3D-Punktwolken lassen sich die Ergebnisse analog zur Vegetation optimieren.

7.4.5 Geländedarstellung

Neben der Situation stellt die Geländedarstellung ein wesentliches Element topographischer Karten dar. Im Fall von mit UAV-generierten Aufnahmen können die von der UAV-Photogrammetrie-Software erstellten Gelände-, Oberflächen- oder 3D-Modelle als Basis herangezogen werden. Diese weisen zwar eine hohe räumliche Auflösung auf, jedoch auch hohe Ungenauigkeiten. Diese Ungenauigkeiten sind durch die Vegetation und Bebauung zu erklären.

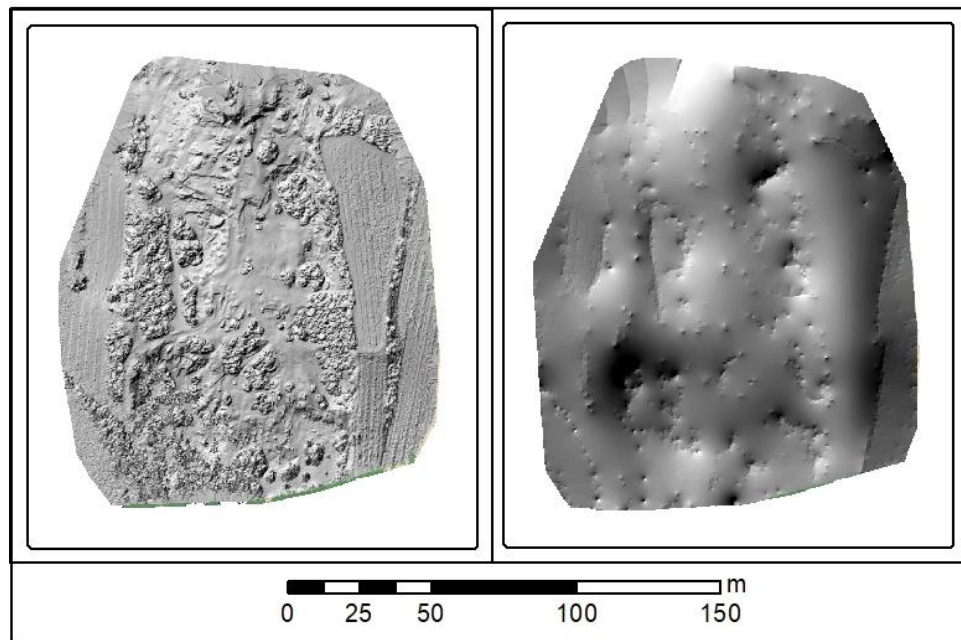


Abbildung 55: Gegenüberstellung des digitalen Oberflächenmodells und des digitalen Geländemodells der Befliegung Retz (erstellt mit Drone2Map) [eigene Abbildung]

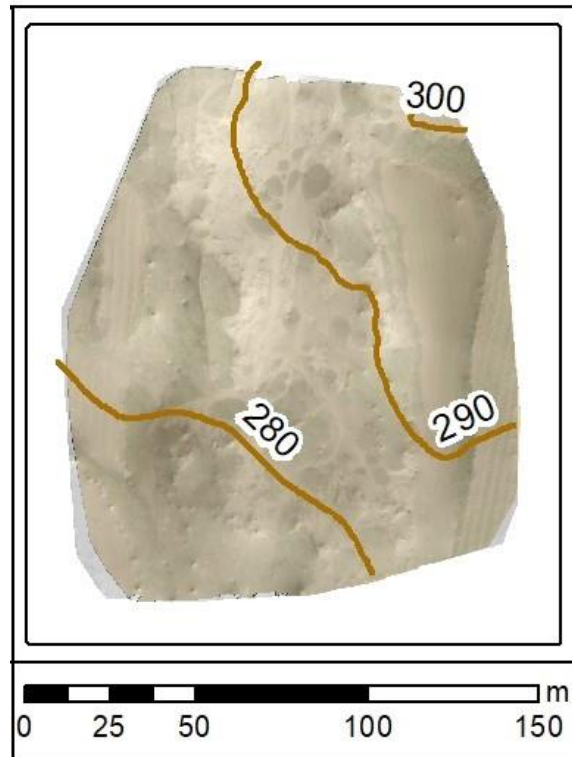


Abbildung 56: Höhenlinien im Befliegungsgebiet Retz [eigene Abbildung]

Um die Genauigkeit der Aufnahmen zu überprüfen, wurden die Höhenwerte der Ground Control Points aus der GNSS-Messung mit jenen des amtlichen Geländemodells des Landes Niederösterreichs sowie mit jenen des mit Hilfe der UAV-Photogrammetrie-Software generierten Geländemodells verglichen. Dabei zeigt sich, dass die Höhenwerte von atlas.no.e.gv.at sowie jene des selbst generierten Geländemodells zwischen 1 und 1,5m darunter liegen.

	Höhe GNSS	Höhe atlas.no.e.gv.at	Höhe Geländemodell
Punkt 1 (48,75019 / 15,94488)	286,415m	285,6m	284,882m
Punkt 2 (48,75032 / 15,94433)	283,115m	282,3m	281,83m
Punkt 3 (48,75042 / 15,94452)	286,401m	285,6m	284,881m
Punkt 4 (48,75062 / 15,94477)	289,785m	289,0m	289,540m

Bei der zweiten Befliegung in Podhradí nad Dyjí wurde der Fokus gezielt auf den Hang gelegt, um einen größeren Reliefunterschied im Vergleich zur ersten Befliegung zu erreichen. Es ergibt sich hier im digitalen Geländemodell ein Niveauunterschied von 113m. In Abbildung 57 wird das digitale Höhenmodell (links) dem digitalen Geländemodell (rechts) gegenübergestellt. Hier zeigt sich, dass sich die Vegetation vergleichsweise gut ausblenden lässt. Es ist jedoch zu beachten, dass bei der Befliegung „Podhradí nad Dyjí II“ keine Ground Control Points mit Hilfe von GNSS gesetzt wurde. Aus diesem Grund weicht das Geländemodell von „Podhradí nad Dyjí I“ von „Podhradí nad Dyjí II“ ab.

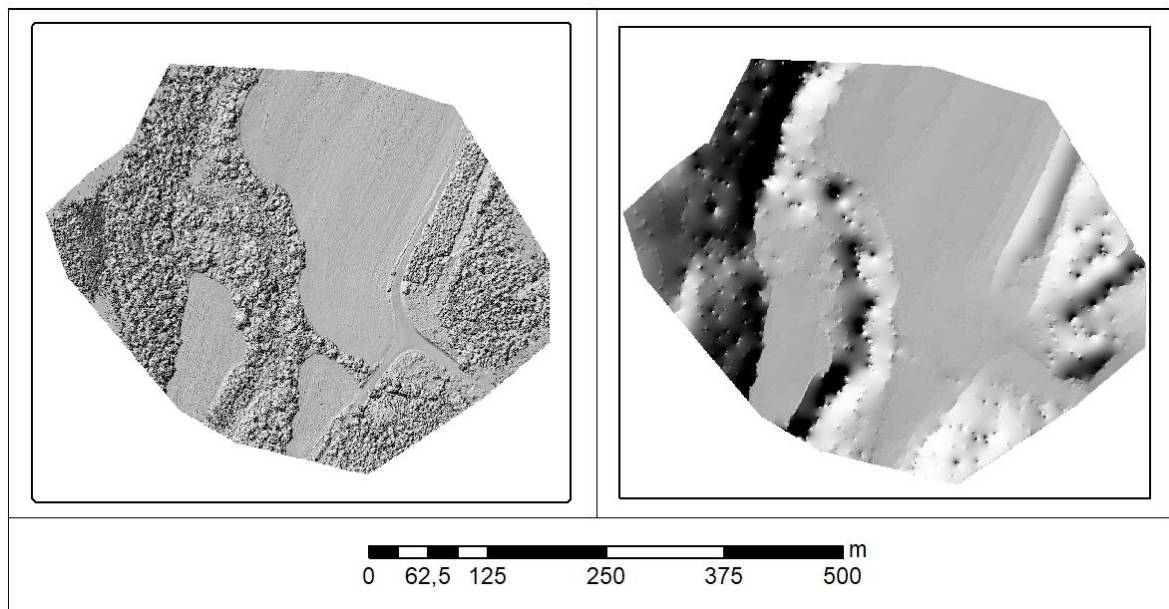


Abbildung 57: Gegenüberstellung des Oberflächenmodells und des Geländemodells bei der Befliegung „Podhradí nad Dyjí II“ [eigene Abbildung]

Bereits bei der Berechnung des Geländemodells ist zu beachten, dass die Auflösung des Geländemodells höher eingestellt werden muss als die Ground Sampling Distance um bessere Ergebnisse zu liefern. Abbildung 58 zeigt zwei Geländemodelle, wobei beim linken die Auflösung der Ground Sampling Distance und beim rechten Bild die Auflösung dem fünffachen der Ground Sampling Distance entspricht. Hier zeigt sich, dass die Vegetation besser extrahiert wurde und auch das Flussbett klarer zum Vorschein kommt.

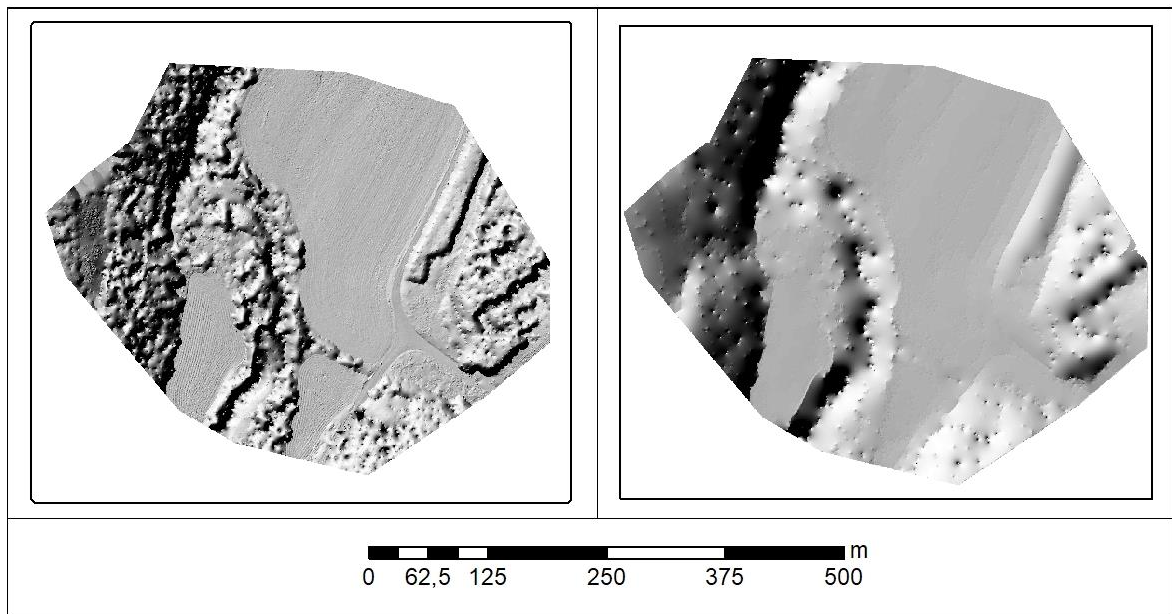


Abbildung 58: Gegenüberstellung zweier Geländemodelle: links entspricht die Auflösung der GSD, rechts entspricht die Auflösung 5x der GSD. [eigene Abbildung]

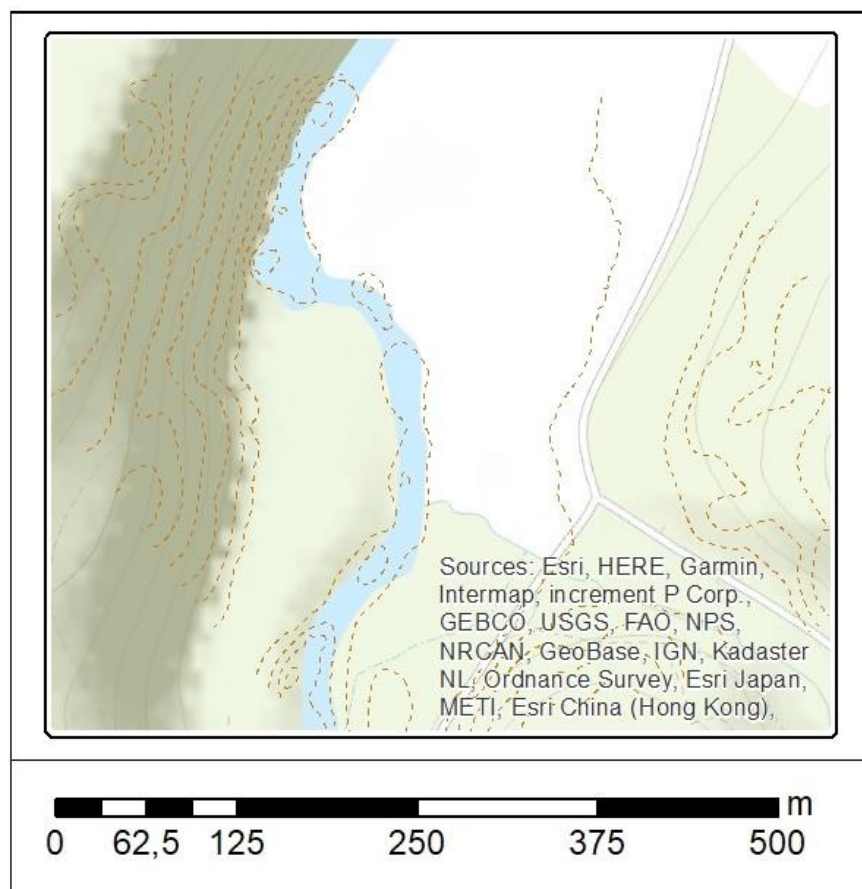


Abbildung 59: Gegenüberstellung der mit Hilfe der UAV-Photogrammetrie-Software erstellten Höhenlinien mit jenen einer ESRI Basemap [eigene Abbildung]

Die Gegenüberstellung der Höhenlinien zeigt, dass die mit UAV-Photogrammetrie-Software generierten Höhenlinien mit jenen der ESRI-Basemap vor allem in Bereichen mit

höherer Steigung übereinstimmen. In flachen Bereichen, wie dem Feld westlich der Straße, weichen die Höhenlinien teilweise deutlich ab. Im Bereich des Flussbettes gibt es einige Fehldarstellungen, welche auf Verklausungen zurückzuführen sind.

Bei der Berechnung des Differentialbilds zeigt sich, dass die Geländemodelle der beiden Befliegungen teils deutlich abweichen. Dies ist auf die Methodik der Höhenberechnung zurückzuführen. Die Höheninformationen der einzelnen Bilder werden mit Hilfe des eingebauten Barometers gelesen und sind dementsprechend ungenau.

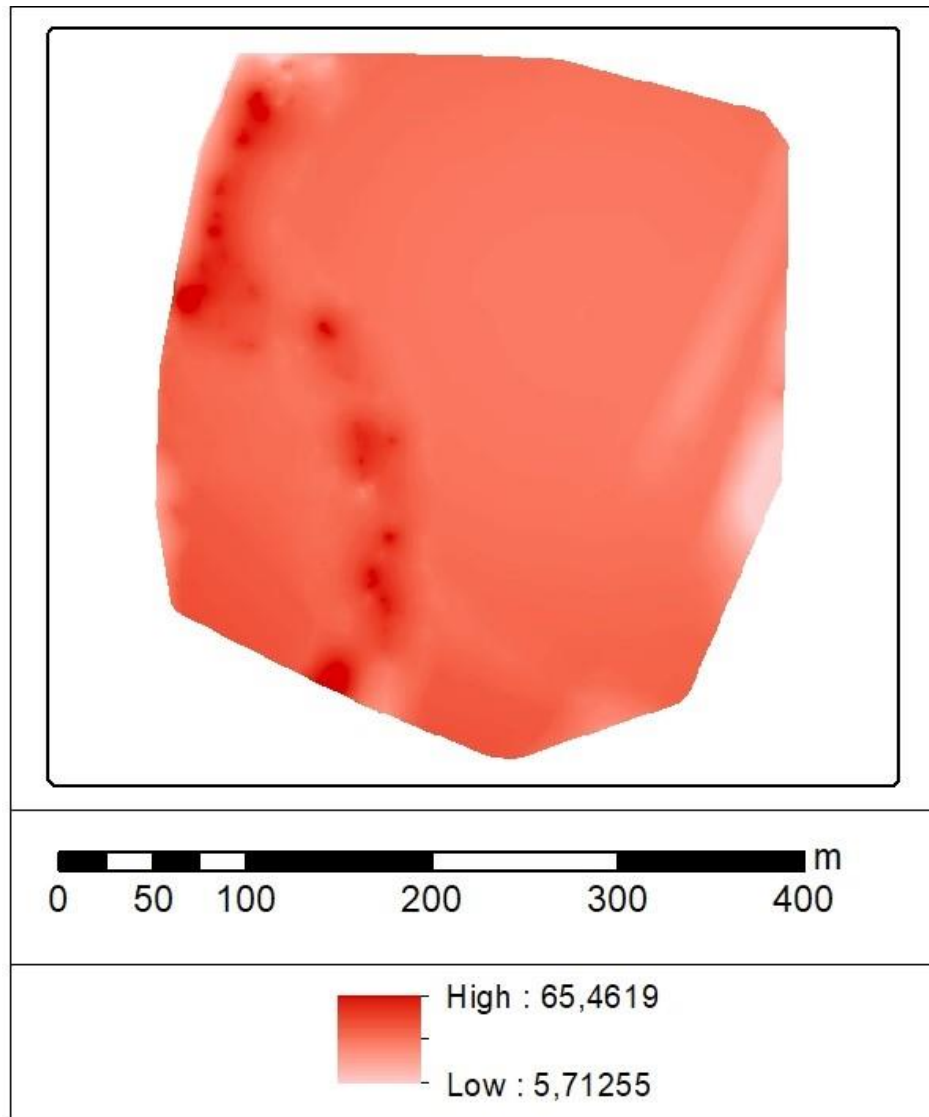


Abbildung 60: Abweichung der Befliegung „Podhradí nad Dyjí II“ von „Podhradí nad Dyjí I“. Zu beachten ist, dass bei der ersten Befliegung Ground Control Points gesetzt wurden, wodurch diese Befliegung deutlich genauer wurde [eigene Abbildung]

Folgende Probleme ergaben sich bei der Erstellung der Geländedarstellung:

- Bereits vor der Berechnung ist auf eine möglichst optimale Einstellung der Auflösung zu achten: Es empfiehlt sich eine rund fünffache Auflösung der Ground Sampling Distance, da der Glättungsalgorithmus hier deutlich besser funktioniert und zu besseren Ergebnissen führt.
- Zwar ist die horizontale Lagetreue aufgrund des GPS-Sensors auch ohne Setzung von Ground Control Points im akzeptablen Bereich, die vertikale Lagetreue ist jedoch deutlich schlechter, da die Informationen der UAV zur Höhe entweder aus der Starthöhe oder mit Hilfe eines Barometers gewonnen werden. Dadurch kann es auch innerhalb eines Befliegungsgebiets aufgrund von Luftdruckschwankungen zu enormen Unterschieden kommen. Im Differentialbild des gemeinsamen Gebiets zeigt sich deutlich, dass es innerhalb des Befliegungsgebiets zu mehr als 60 Meter Unterschied zwischen Geländemodellen zweier Befliegungen kommen kann.

7.5 Zusammenfassung der Use Cases

In den vorangegangenen Kapiteln wurde erläutert, wie aus UAV-Aufnahmen die Grundlage für die einzelnen Kartenelemente gewonnen werden kann. In diesem Kapitel sollen diese einzelnen Kartenelemente nun zu einer topographischen Karte zusammengeführt werden. Dazu wurden die einzelnen Ebenen (Wald, Gewässer, Verkehrswege, Höhenlinien) übereinandergelegt und eine leicht transparente Geländeschummerung hinzugeschaltet.

Die Befliegungen „Podhradí nad Dyjí I und II“ unterscheiden sich in puncto Gewässer und Verkehrswege nur marginal, wobei die Verkehrswege hauptsächlich aufgrund der überhängenden Vegetation abweichen. Das Gewässer hat sich in der kurzen Dauer zwischen den Befliegungen (rund 4 Monate) kaum verändert. Bei der Vegetation erkennt man, dass bei der zweiten Befliegung deutlich mehr Bäume erfasst wurden. Dies hängt mit der Belaubung in der Vegetationsperiode zusammen. Denn wie im Kapitel 7.4.3 beschrieben, wurden außerhalb der Vegetationsperiode dünne Bäume nur schwer erfasst. In der Vegetationsperiode wurden diese aufgrund der Belaubung erfasst, weshalb sich hier ein teils eklatanter Unterschied ergibt.

Beim Vergleich der beiden Befliegungen „Podhradí nad Dyjí“ zeigt sich, dass es vor allem bei der Höheninformation zu gravierenden Unterschieden gekommen ist. Zwar ist, wie im Kapitel 7.4.5. ersichtlich, die Lage der Höhenlinien vielfach deckungsgleich, die absolute Höhe kann allerdings deutlich abweichen.

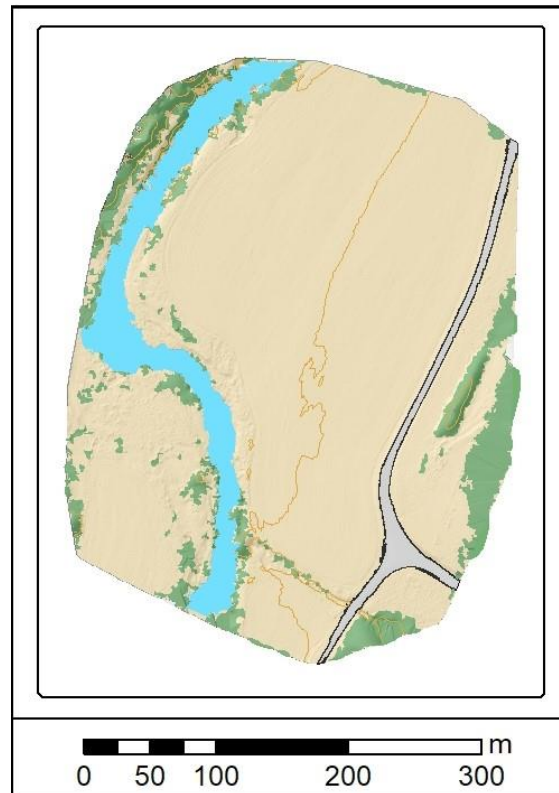


Abbildung 61: Topographische Karte des Befliegungsgebiets „Podhradí nad Dyjí I“ [eigene Abbildung]

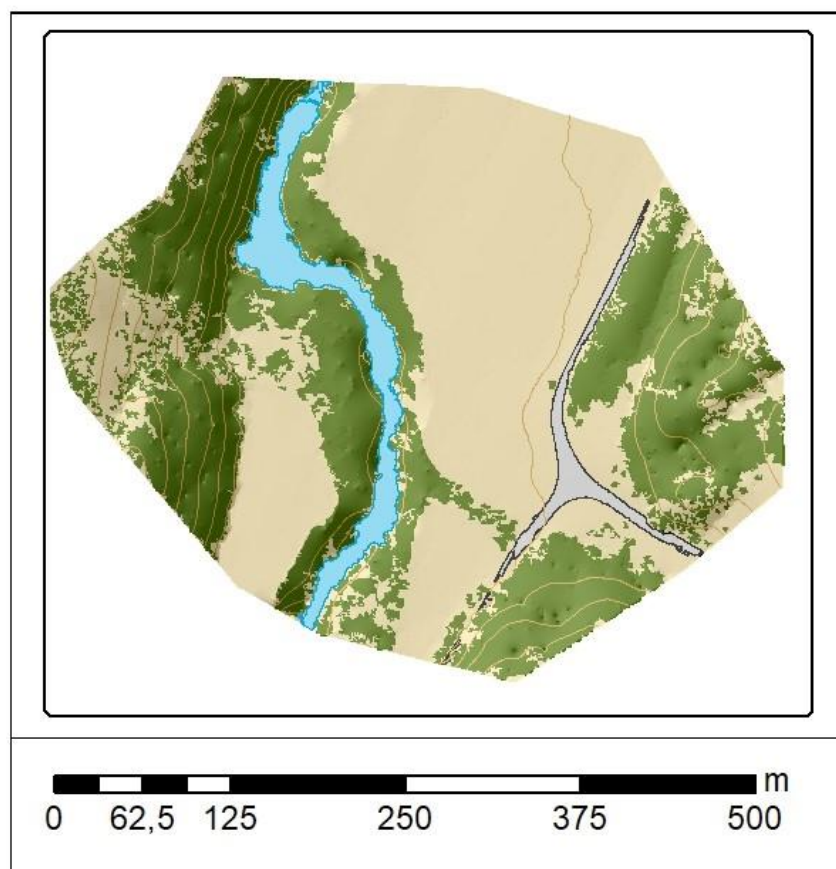


Abbildung 62: Topographische Karte des Befliegungsgebiets „Podhradí nad Dyjí II“ [eigene Abbildung]



Abbildung 63: Topographische Karte des Befliegungsgebiets Retz [eigene Abbildung]

Folgende Schwierigkeiten beziehungsweise Verbesserungen ergaben sich im Zuge der Befliegungen sowie Datenbearbeitungen:

- Um eine optimale Überlappung zu erhalten, empfiehlt sich das Verwenden einer Mission Planning Software.
- In der Vegetationsperiode lässt sich die Vegetation besser klassifizieren. Dies liegt daran, dass die Klassifikation in Boden sowie Nicht-Boden bei belaubten Bäumen besser funktioniert als bei nicht belaubten Bäumen.
- Große Steine sowie Verkläuerungen in Gewässer werden entweder als versiegelte Flächen oder als Vegetation klassifiziert. Indem man Inselflächen füllt, können diese eliminiert und so eine homogene Gewässerfläche hergestellt werden.
- Das Erstellen von homogenen Verkehrswegen erweist sich als schwierig, vor allem wenn Bäume neben einer Straße stehen, die Straße Pfützen aufweist oder verschmutzt ist. Hier kann es sein, dass nicht ganze Straßenzüge, sondern nur mehrere einzelne Flächen definiert werden können. Da mit Hilfe von überwachter Klassifikation nur entschieden werden kann, welcher Klasse ein Bildelement zugeordnet und keine Wertigkeit der Straßen (Straße 1. Ordnung, 2. Ordnung,...) getroffen werden kann, empfiehlt es sich, bei den Straßen auf Open Data (OpenStreetMap, GIP, ...) zurückzugreifen.
- Ohne der Höhenbereinigung mit Hilfe von Ground Control Points erweisen sich die Höheninformationen als überaus ungenau, weswegen das Setzen von Ground

Control Points dringend empfohlen wird. Die von der UAV mitgelieferten Höheninformationen unterliegen zu großen Schwankungen, um als Grundlage für topographische Karten dienen zu können.

- Mit Rotary Wing UAVs lassen sich nur sehr kleine Flächen aufnehmen, sodass sich diese Aufnahmegeräte nur für großmaßstäbige topographische Karten eignen. Sofern verfügbar, sollten also Fixed Wing UAVs verwendet werden, da hier mit einer Akkulaufzeit deutlich größere Flächen beflogen werden können.
- Da Drone2Map und andere UAV-Photogrammetrie-Softwares das Orthophoto aufgrund fehlender Überlappungen nicht als Rechteck ausgeben, sind auch die darauf basierenden topographischen Karten keine Rechtecke.

8 Vorschlag eines Workflows zur Erstellung topographischer Karten auf Basis von UAV-Aufnahmen

Die Datenaufnahme mit Hilfe von UAVs besteht aus drei Phasen, welche hier näher beleuchtet werden sollen. Besondere Bedeutung kommt der dritten Phase, Datenverarbeitung, zu:

- Planungsphase: Hier werden folgende Punkte geklärt:
 - Wo wird in welcher Höhe geflogen?
 - Mit welcher UAV wird geflogen?
 - Wird manuell oder mit Hilfe einer vorher definierten Route geflogen?
 - Werden Ground Control Points gesetzt? Wenn ja, wo?
 - Werden alle gesetzlichen Rahmenbedingungen eingehalten?
- Flugphase: In dieser Phase werden die einzelnen Luftbilder aufgenommen, die in der nächsten Phase bearbeitet werden. In dieser Phase werden auch Ground Control Points gesetzt.
- Datenverarbeitung: In dieser Phase werden die einzelnen Bilder zu einem Orthophoto, Geländemodell, Oberflächenmodell oder 3D-Modell prozessiert und zur weiteren Nutzung klassifiziert.

Im folgenden Kapitel werden nun diese Phasen gezielt auf die Erstellung topographischer Karten angepasst.

8.1 Planungsphase

In dieser Phase wird das Ziel der Befliegung definiert. Das Ziel ist dabei die Erstellung einer topographischen Karte eines bestimmten Gebiets und somit die Aufnahme von Vegetation, Gewässer, versiegelter Fläche, Bebauung sowie der Geländedarstellung. Bei der Definition des Aufnahmegebiets sind gesetzliche Regulationen zu beachten. Nach der Definition des Aufnahmegebiets ist die Flughöhe festzulegen. Auch hier ist der gesetzliche Rahmen einzuhalten. Eine Mission Planning Software bietet Hilfe bei der Flugplanung. Hier wird nach Auswahl des Gebiets und der Flughöhe automatisch die Flugroute berechnet und abgeflogen. Der Auswahl der Flughöhe kommt eine wichtige Rolle zu, denn je höher geflogen wird, desto schneller kann die ausgewählte Fläche beflogen werden, da weniger Flugstreifen benötigt werden. Allerdings sinkt mit steigender Flughöhe die Ground Sampling Distance.

Um eine möglichst hohe Genauigkeit des Geländemodells zu erhalten, ist es ratsam Ground Control Points zu setzen. Es ist empfehlenswert, bereits in der Planungsphase die ungefähre Anzahl und Lage der Ground Control Points zu definieren.

In der Planungsphase ist auch die jeweilige UAV zu wählen. Wie bereits in Kapitel 4.1 erwähnt, kann zwischen Rotary Wing und Fixed Wing UAVs unterschieden werden. Für großflächige Aufnahmen sind Fixed Wing UAVs aufgrund ihrer längeren Akkulaufzeit vorzuziehen. Allerdings sind diese in der Anschaffung teurer als Rotary Wing UAVs.

Auch der Zeitpunkt der Befliegung ist in der Planungsphase zu beachten, da UAV-Befliegungen stark wetterabhängig sind. Optimal ist eine Befliegung um die Mittagszeit an windstillen, leicht bewölkten Tagen, um den Schattenwurf so gering wie möglich zu halten. Die ideale Jahreszeit ist die Vegetationsperiode, da Laubbäume besser erfasst werden können.

8.2 Flugphase und Datenverarbeitung

Vor der eigentlichen Flugphase sind Ground Control Points zu setzen und einzumessen. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass diese gleichmäßig über das Befliegungsgebiet verteilt sein sollten. Danach kann die Befliegung entweder manuell oder mit Hilfe einer Mission Planning Software durchgeführt werden.

Nach der Befliegung folgt die Phase der Datenverarbeitung: Diese Phase ist die umfangreichste der drei Phasen. Das Ziel ist es, aus den einzelnen Fotos eine topographische Karte zu erstellen. Die einzelnen Schritte zur Erstellung einer topographischen Karte werden im Folgenden beschrieben:

Erstellung von Orthophotos, Geländemodellen sowie 3D-Modellen

In diesem Schritt werden die Bilder in die UAV-Photogrammetrie-Software geladen und mit den Ground Control Points verknüpft. Danach wird ausgewählt, was von der UAV-Photogrammetrie-Software erstellt werden soll. Hier empfiehlt es sich ein Orthophoto, ein Geländemodell und ein 3D-Modell (Punktwolke) zu generieren. Bei der Erstellung des Geländemodells ist darauf zu achten, dass die Auflösung nicht gleich der Ground Sampling Distance ist, sondern etwa fünfmal so groß ist.

Erstellen der Klassifikation in ArcMap oder ArcGIS Pro

Bei der überwachten Klassifikation werden Testgebiete definiert und das Orthophoto klassifiziert. Bei der Definition der Testgebiete ist darauf zu achten, dass nur jene Klassen erstellt werden, die auch im Gebiet vorhanden sind. Befindet sich beispielsweise kein Gewässer im Aufnahmegebiet, wäre es auch nicht sinnvoll eine Klasse „Gewässer“ zu erstellen. Es empfiehlt sich, entweder das Maximum Likelihood-Verfahren oder das Support Vector Machine-Verfahren zu wählen. Da die Klassifikation aufgrund der geringen spektralen Auflösung des Orthophotos teilweise ungenau ist, muss bei der Vektorisierung der Karteninhalte nachjustiert werden, zum Beispiel durch Ausblenden kleiner Flächen und Pixel, Eliminieren von Polygonteilen oder durch andere Prozessen, welche in den folgenden Punkten erwähnt werden.

Erstellen einer Maske der Bodenwerte

Um die Klassifikation der Vegetationsdaten zu verbessern und Bodenwerte aus den Waldflächen zu eliminieren, wird aus der Punktwolke eine Maske der Bodenwerte erstellt. Hierfür werden in ArcGIS Pro nur die Bodenpunkte der Punktwolke ausgewählt und als Raster exportiert.

Gewässer & versiegelte Flächen

Hierzu wird das klassifizierte Orthophoto als Grundlage verwendet. Dazu werden zunächst alle Pixel, die der Klasse „Gewässer“ oder „versiegelte Fläche“ zugeordnet wurden, exportiert und mit Hilfe des Tools „Raster to Polygon“ polygonisiert. Kleinere Flächen werden im Anschluss entweder mit Hilfe einer Definition Query ausgeblendet oder gelöscht. Um Inselflächen zu eliminieren, kann das Tool „Eliminate Polygon Part“ verwendet werden. Dieser Schritt ist bei den Gewässern und bei den Verkehrswegen ident.

Sofern vorhanden, empfiehlt es sich, bei den Verkehrswegen auf Open Data wie Open Street Map oder GIP zurückzugreifen, da diese im Gegensatz zu den hier klassifizierten Verkehrswegen nach ihrer Ordnung klassifiziert werden können.

Vegetation

Als Grundlage für die Vegetation (insbesondere Nadelwald / Laubwald) dient ebenfalls das klassifizierte Orthophoto. Da jedoch Wiesen, Ackerflächen und Brachflächen fälschlicherweise auch als Wald klassifiziert werden, ist es ratsam, Bodenwerte mit Hilfe der vorher erstellten Maske zu extrahieren. Die Vegetation kann danach aus dem Raster exportiert werden, um den Prozess der Polygonisierung je nach Größe der Aufnahmefläche zu beschleunigen. Nach der Polygonisierung sind kleinere Flächen unter 5-10m² zu generalisieren. Mit Hilfe des Tools „Eliminate Polygon Part“ können Inselflächen – wie schon im vorigen Schritt – eliminiert werden. Es kann allerdings auch definiert werden, dass nur Flächen unter einer gewissen Größe eliminiert werden. Dies bietet sich bei der Vegetation an, um größere Lichtungen weiterhin darstellen zu können.

Darstellung der Kartenelemente

Um die einzelnen Kartenelemente gemeinsam als topographische Karte darstellen zu können, wurden diese in ArcMap visualisiert. Außerdem wurden die in Drone2Map erstellten Höhenlinien sowie das Geländemodell hinzugefügt. Dabei wurde auf assoziative Farbgebung geachtet und folgende Reihenfolge beachtet:

- Gewässer (blau)
- Höhenlinien (braun)
- Geländemodell (Transparenz: ca. 66%)
- Vegetation/Wald (dunkelgrün)
- Verkehr (grau)
- Hintergrund (hellgelb)
- Optional: Um die Kartenelemente besser glätten oder generalisieren zu können, empfiehlt es sich auch, die Karte als .AI zu exportieren und in Adobe Illustrator nachzubearbeiten.

9 Beantwortung der Forschungsfragen

In diesem Kapitel werden die im Kapitel 2.2 definierten Ziele und Fragestellungen dieser Masterarbeit beantwortet.

Können handelsübliche UAV als Aufnahmegerät für die topographische Kartographie genutzt werden?

Ja, auch handelsübliche Consumer-UAVs, wie eine DJI Phantom 4 Pro, können grundsätzlich als Aufnahmegeräte für die topographische Kartographie verwendet werden. Aufgrund der geringen spektralen Auflösung ist die Qualität der Klassifikation jedoch nicht mit jener von multispektralen Aufnahmen vergleichbar. So mussten etwa Waldflächen mit Hilfe der 3D-Daten nachjustiert werden und versiegelte Flächen wurden in der Vegetationsperiode nicht zur Gänze erfasst. Zur Verbesserung der Aufnahmequalität kann jedoch beispielsweise ein Multispektralsensor oder ein Laserscanner auf einer UAV montiert werden.

Außerdem werden anhand des in Kapitel 8 vorgestellten Workflows keine Einzelobjekte erfasst. Diese müssten zusätzlich manuell digitalisiert werden. Auch die Beschriftung wird in diesem Workflow nicht erfasst, sondern muss manuell hinzugefügt werden. Um die Genauigkeit der Geländeinformationen zu optimieren, sind Ground Control Points zu setzen. Aufgrund technischer Limitierungen und gesetzlicher Regulationen sind UAV-Aufnahmen lediglich für sehr großmaßstäbige Karten geeignet.

UAVs werden andere Aufnahmegeräte nicht ersetzen können, allerdings sind sie durchaus geeignet, um punktuell detaillierte Aufnahmen zu generieren. Dies kann beispielsweise notwendig sein, wenn von einem Gebiet keine aktuellen oder hochauflösenden Aufnahmen verfügbar sind oder kein akzeptables Kartenmaterial vorhanden ist.

Für welche Elemente eignen sich UAV-Aufnahmen besonders gut und für welche Elemente sind andere Aufnahmeverfahren zu bevorzugen?

Für die Aufnahme unterschiedlicher Kartenelemente sind unterschiedliche Aufnahmeverfahren zu bevorzugen. Nachfolgend wird die Eignungen der UAV-Aufnahmen für die einzelnen Kartenelemente erläutert:

- Gewässer: Gewässer lassen sich aufgrund ihrer Farbe gut mit Hilfe von UAV-Photogrammetrie erfassen. Dabei werden die mit Hilfe der UAV-Photogrammetrie-Software erstellten Orthophotos als Grundlage für die überwachte Klassifikation herangezogen.
- Vegetation / Wald: Zu beachten ist, dass die Erfassung von Vegetation/Wald in der Vegetationsperiode besser durchgeführt werden kann als außerhalb der Vegetationsperiode. Wesentlich bessere Ergebnisse liefern UAV-Laserscanner, welche allerdings auch mit höheren Kosten verbunden sind.
- Versiegelte Flächen: Versiegelte Flächen lassen sich zwar gut mit Hilfe einer überwachten Klassifikation (wie beispielsweise dem Maximum Likelihood-Verfahren) erfassen, es stellt sich jedoch bei der Erfassung der Verkehrsflächen und Verkehrswege die Frage nach der Sinnhaftigkeit. Bei Verkehrsflächen und

Verkehrswegen wäre es sinnvoller auf andere Quellen zurückzugreifen, da von Open Street Map oder GIP zur Verfügung gestellten Daten bereits in Straßenordnungen unterteilt sind und auch Straßennamen enthalten.

- Einzelobjekte: Einzelobjekte wie Zäune, Türme oder Ähnliches lassen sich mit Hilfe von Klassifikationen nicht erfassen und müssen deshalb manuell erfasst werden. Das Orthophoto stellt hierfür jedoch eine gute Digitalisierungsgrundlage dar.
- Bebauung: Die Bebauung lässt sich mit Hilfe von Bildsegmentierung und der Boden-Klassifikation der Punktwolken erfassen. Allerdings dürfen in Österreich nur UAVs mit redundantem System – also mit doppelter Ausführung bestimmter Systemkomponenten – über bebauten Gebiet fliegen.
- Gelände: Die Geländedarstellung wird bei dichter Vegetation ungenau und kann aufgrund der technischen Möglichkeiten von Laserscannern nicht mit diesen mithalten. Während Oberflächenmodelle sehr hochauflösend erstellt werden können, ist die Berechnung von Geländemodellen besonders bei dichter Vegetation schwierig. Bei dünner Vegetation funktioniert die Erstellung von Geländemodellen besser. Um die vertikale Genauigkeit des Geländemodells zu erhöhen, empfiehlt sich das Setzen von Ground Control Points.

Obwohl die Qualität, die bei den geringen Kosten und der kurzen Bearbeitungsdauer möglich ist, akzeptabel bis gut ist, kann die UAV-Photogrammetrie was die Genauigkeit betrifft nicht mit anderen Aufnahmegeräten wie Laserscannern oder Multispektralkameras mithalten. Allerdings können diese Aufnahmegeräte ebenfalls auf einer UAV montiert werden. Dadurch steigen zwar die Anschaffungskosten, jedoch auch die Genauigkeit der Erfassung deutlich.

Wirken sich die Einschränkungen in Österreich und den ausgewählten Nachbarländern (CZ, D) auf die Möglichkeiten von UAV als Aufnahmegerät für die topographische Kartographie aus?

Die gesetzlichen Regulierungen schreiben vor, dass mit UAVs nicht jederzeit und überall geflogen werden darf. So darf in Österreich nur mit bestimmten UAVs über bebautem Gebiet oder Straßen geflogen werden. Somit kann die Bebauung nur mit speziellen UAVs und zusätzlicher Genehmigung erfasst werden. Aus diesem Grund können nicht alle Elemente einer topographischen Karte mit UAVs erfasst werden. Somit könnten zwar theoretisch große Flächen mit einer Fixed Wing UAV befliegen werden, allerdings darf in Österreich nur auf Sicht geflogen werden und der Pilot muss sich in 500m zur Drohne befinden, sodass in der Praxis keine großen Flächen befliegen werden können [AUS-17].

Sind UAV-Aufnahmen im Vergleich zu anderen Aufnahmeverfahren günstiger, schneller und effizienter?

Die geringen Anschaffungskosten sowie das schnelle und flexible Aufnahmeverfahren werden vielfach als ein großer Vorteil von UAV-Aufnahmen gewertet. Während Rotary Wing UAVs, wie eine DJI Phantom 4 Pro, bereits ab 1.500 Euro verfügbar sind, kosten Fixed Wing UAV deutlich mehr: So kostet eine Sensefly eBee SQ rund 12.000 €. Diese ist allerdings bereits mit einer NDVI-Kamera ausgestattet, so dass die Klassifikationsgenauigkeit erhöht werden kann [Stand: 2018; AMA-18, PAR-18]. Die Befliegung kann je nach Anzahl der

verwendeten Akkus inklusive des Setzens von Ground Control Points in rund einer Stunde durchgeführt werden.

Die Berechnung des Orthophotos, des Geländemodells sowie des 3D-Modells dauert je nach Anzahl der verwendeten Fotos und der Rechenleistung des Computers zwischen zwei und sechs Stunden (Befliegung Retz beziehungsweise Podhradí nad Dyjí). Die weitere kartographische Aufbereitung kann in etwa innerhalb eines Arbeitstages durchgeführt werden (Sichten der Daten, Durchführen der Klassifikation, Extrahieren und Aufbereiten der einzelnen Kartenelemente, Zusammenstellung der Layer zu einem Kartenbild). Somit kann innerhalb von zwei Arbeitstagen eine Befliegung mit anschließender kartographischer Aufbereitung durchgeführt werden.

Ist die hohe Genauigkeit von UAV-Aufnahmen ein Vor- oder Nachteil? Bis zu welcher Maßstabsebene lassen sich diese Aufnahmen ansprechend verwenden?

In den durchgeführten Befliegungen beträgt die Auflösung (Ground Sampling Distance) zwischen 1,41 und 3,07 cm (Befliegung Retz beziehungsweise Podhradí nad Dyjí). Die abgeflogene Fläche beträgt zwischen 1,72 und 16,15 Hektar. Die im Rahmen dieser Masterarbeiten dargestellten Befliegungen sind jedoch nur in sehr großem Maßstab dargestellt (1:2.500 bis 1:5.500).

Wie bereits erwähnt, eignen sich Fixed Wing UAVs besser für großflächige Aufnahmen. So kann beispielsweise die Sensefly eBee Classic 12,6 km² mit einer einzelnen Akkuladung befliegen, was in etwa einer DIN A4-Seite mit dem Maßstab 1:25.000 entspricht. Auch die etwas höhere Ground Sampling Distance ist dabei noch ausreichend für die topographische Kartographie [SEN-18c]. Problematisch ist jedoch, dass Fixed Wing UAVs in Österreich nur für unbebautes und unbesiedeltes Gebiet zugelassen sind und das Potential aus diesem Grund nicht gänzlich genutzt werden kann [AUS-18a].

10 Zusammenfassung

UAV-Aufnahmen als Grundlage für die topographische Kartographie haben ein großes Potential: Durch die hohe räumliche, jedoch geringe spektrale Auflösung lassen sich in Kombination mit den 3D-Daten akzeptable Klassifikationen durchführen. Für versiegelte Flächen und Gewässer eignen sich die Orthophotos problemlos. Die geringe spektrale Auflösung, welche besonders bei der Unterscheidung von Wald und Wiese problematisch ist, kann durch die 3D-Daten wie Punktwolken ausgeglichen werden, um die Klassifikationsergebnisse insbesondere jener der Vegetation oder Bebauung zu verbessern. Dabei wird die von der UAV-Photogrammetrie-Software erstellte Punktwolke in Boden beziehungsweise Nicht-Boden klassifiziert. Nicht-Bodenflächen werden von den Waldfächen ausgeschlossen, sodass die Ergebnisse deutlich verbessert werden können. Während UAV-Aufnahmen für versiegelte Fläche, Gewässer und Vegetation geeignet sind, gibt es bei der Geländedarstellung Schwachpunkte.

Bei der Geländedarstellung ist zu berücksichtigen, dass die Höheninformation stark abweichen kann und das Setzen von Ground Control Points für eine zuverlässige Höhendarstellung notwendig ist. Mit Hilfe der Ground Control Points können auch die Geländemodelle und somit auch die Höhenlinien genauer georeferenziert werden. Bei dichter Vegetation sind diese jedoch ungenau, da zur Berechnung die Bodenpunkte herangezogen werden. Alternativ können auch Laserscanner als Nutzlast auf der UAV eingesetzt werden. Der Vorteil liegt hier bei der Extraktion der Vegetation und anderer Objekte, die sich auf der Erdoberfläche befinden, so dass einerseits ein Geländemodell erstellt werden kann und andererseits eine genauere Klassifikation der Vegetation möglich ist. Den Nachteil stellen jedoch die deutlich höheren Kosten dar.

Außerdem sind der Zeitpunkt und die Jahreszeit ein wichtiger Aspekt für die Befliegung: Es ist zu empfehlen, unabhängig von der Jahreszeit, zur Mittagszeit zu fliegen, da hier der Schattenwurf am geringsten ist. Die Jahreszeit spielt vor allem für die Ergebnisse der (Vegetations-)Klassifikation eine wichtige Rolle. So lassen sich Bäume während der Vegetationsperiode besser klassifizieren, da diese im belaubten Zustand besser von der UAV-Photogrammetrie-Software erkannt werden können. Allerdings ist die Klassifikation bei versiegelter Fläche bei belaubter Vegetation schwieriger, da belaubte Äste über die Straßen ragen und somit keine vollständige Klassifikation erlauben.

Zu beachten ist auch die kleine Aufnahmefläche, die mit Rotary Wing UAVs aufgenommen werden kann: Während mit einer Akkulaufzeit problemlos etwa 16 Hektar beflogen werden konnten (etwa wie bei der Befliegung „Podhradi nad Dyjí II“), ist es bei Fixed Wing UAVs möglich eine größere Fläche aufzunehmen. Die geringere Auflösung fällt bei der topographischen Kartographie kaum ins Gewicht. Fixed Winged UAVs sind allerdings teurer und laut Austro Control ebenfalls nur für Klasse A zugelassen, so dass nicht über bebautem Gebiet geflogen werden darf [AUS-18c].

UAVs sind für Maßstäbe bis 1:10.000 Aufnahmegerät einsetzbar. Es ist jedoch zu beachten, dass dabei mit einem größeren Zeitaufwand bei der Befliegung und der Berechnung zu rechnen ist, welcher aber im Vergleich zu anderen Aufnahmemethoden immer noch gering ist. UAVs sind aufgrund der ungenauen Geländemodelle eher unterstützend zu anderen

Aufnahmeverfahren einzusetzen und können diese nicht ersetzen. Dies ist nicht zuletzt der technischen Möglichkeiten von etablierten Aufnahmegeräten wie (Airborne-)Laserscannern, Satelliten- und flugzeuggestützten Multispektralscannern et cetera und deren technischen Möglichkeiten nachvollziehbar.

11 Literatur

[AGI-17] AGIT: <https://www.agit.at/uas2017>, Dezember, 2017.

[AGI-18] AGISOFT: [http://www.agisoft.com/pdf/PS_1.3%20-Tutorial%20\(BL\)%20-%20Orthophoto,%20DEM%20\(GCPs\).pdf](http://www.agisoft.com/pdf/PS_1.3%20-Tutorial%20(BL)%20-%20Orthophoto,%20DEM%20(GCPs).pdf), Februar, 2018.

[AHN-96] AHNERT, F.: Einführung in die Geomorphologie. UTB Uni-Taschenbücher, Stuttgart, 1996.

[AJA-17] AJAYI, O.G. et al.: Generation of accurate digital elevation models from UAV acquired low percentage overlapping images, International Journal of Remote Sensing, 38:8-10, 3113-3134, 2017.

[ALB-01] ALBERTZ, J.: Einführung in die Fernerkundung – Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern, 2. Überarbeitete Auflage, Darmstadt, 2001.

[AMA-18] AMAZON:
https://www.amazon.de/DJI-Phantom-Pro-Video%C3%BCbertragungsreichweite-Schwarz/dp/B075FVB86M/ref=sr_1_7?ie=UTF8&qid=1540123248&sr=8-7&keywords=dji+phantom+4, Oktober, 2018.

[ARN-75] ARNBERGER, E. und I. KRETSCHMER: Wesen und Aufgaben der Kartographie – Topographische Karten. Teil 1/Textband, Franz Deuticke, Wien, 1975.

[AUS-17] AUSTRO CONTROL:
https://www.austrocontrol.at/luftfahrtbehoerde/lizenzen_bewilligungen/flugbewilligung_n/unbemannte_lfz, Dezember, 2017.

[AUS-18a] AUSTRO CONTROL:
https://www.austrocontrol.at/jart/prj3/austro_control/releases/de/upload/6_LBTH_67.pdf, März, 2018.

[AUS-18b] AUSTRO CONTROL:
https://www.austrocontrol.at/jart/prj3/austro_control/data/dokumente/LTH_LFA_ACE_067_AL_F_2017-02-07_1202103.pdf, März, 2018.

[AUS-18c] AUSTRO CONTROL:
https://www.austrocontrol.at/jart/prj3/austro_control/data/uploads/Auflistung_Bewilligungen_Homepage_0818.pdf

[AZM-14] AZMI, S.M. et al.: Accuracy assessment of topographic mapping using UAV image integrated with satellite images. In: IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science 18 01, 2015.

[BEV-18] BUNDESAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGSWESEN:
http://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,1569828&_dad=portal&_schema=PORTAL, Jänner, 2018.

[BLA-10] BLASCHKE, T.: Object based image analysis for remote sensing. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65, S.2-16, 2010.

- [BMV-18] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR: <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/LR/151108-drohnen.html>, März, 2018.
- [BOL-02] BOLLMANN, J., KOCH G., et al.: Lexikon der Kartographie und Geomatik. Heidelberg, Berlin, Spektrum Akademischer Verlag, 2002.
- [CAA-18a] CIVIL AVIATION AUTHORITY CZECH REPUBLIC: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/czech_uas_regulatory_framework_en.pdf, November, 2018.
- [CAA-18b] CIVIL AVIATION AUTHORITY CZECH REPUBLIC: <http://www.caa.cz/letadla-bez-pilota-na-palube/unmanned-aircraft?lang=2>, November, 2019.
- [CHI-16] CHI, Y.-Y, Study on High Accuracy Topographic Mapping via UAV-based Images. In: IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 44 032006, 2016.
- [COL-14] COLOMINA, I. und P. MOLINA: Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 92, S. 79–97, 2014.
- [CRE-15] CRESS, J., et al.: U.S. Geological Survey Unmanned Aircraft Systems (UAS) Roadmap 2014: U.S. Geological Survey Open-File Report, 2015.
- [DER-18] DER STANDARD: derstandard.at/2000069938553/Polizeieinsatz-Drohne-in-der-Naehe-des-Flughafens-Wien-beobachtet, Mai, 2018.
- [DER-18b] DER STANDARD: derstandard.at/2000072609600/Berater-Oesterreich-verliert-Anschluss-bei-Drohnen, Mai, 2018.
- [DJI-18] DJI: <https://www.dji.com/phantom-4-pro>, Februar, 2018.
- [EIS-09] EISENBEISS, H., 2009. *UAV Photogrammetry*. Dissertation. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der ETH Zürich, Mitteilungen Nr. 10re 5.
- [ELA-14] EL-ASHMAWY, N. und A. SHAKER: Raster vs. Point Cloud Lidar Data Classification, In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-7, 2014.
- [ESA-18] ESA: <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>, Februar, 2018.
- [ESR-18] ESRI: <https://pro.arcgis.com/de/pro-app/tool-reference/3d-analyst/classify-las-ground.htm>, Mai, 2018.
- [FAH-12] FAHLSTROM, P.G. und T.J. GLEASON: Introduction to UAV Systems: Fourth Edition 2012.
- [FAR-07] FARR, T. G., et al. (2007), The Shuttle Radar Topography Mission, Rev. Geophys., 45, RG2004.
- [FIS-15] FISCHER, L.: „Structure from Motion“ in der Praxis - 3D - Visualisierung mittels Digitalfotos. In: Netzpublikationen zur Grabungstechnik, Nr. 6, 2015.

[GAO-17] GAO, Z., et al., Research on the Application of Rapid Surveying and Mapping for Large Scale Topographic Map by UAV Aerial Photography System. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W6, 2017.

[GEO-18] GEOINFORMATION.NET:
http://www.geoinformation.net/lernmodule/lm06/Kapitel1Einfuehrung/kap1_s01.htm,
Februar, 2018.

[GLE-16] GLEASON, T.J. und P.G. FAHLSTROM: Classes and Missions of UAVs. In: ATKINS, E. et al., Unmanned Aircraft Systems, 2016.

[GRE-18] GREENVALLEY INTERNATIONAL:
<http://greenvalleyintl.com/software/limapper/>, Februar, 2018.

[HAK-02] HAKE, G., GRÜNREICH, D., MENG, L.: Kartographie. Berlin - New York, Walter de Gruyter, 2002.

[HEX-18] HEXAGON GEOSPATIAL:
<https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/erdas-imagine>, Februar, 2018.

[INS-99] Institut für Angewandte Geodäsie, Benennungen und Definitionen im deutschen Vermessungswesen, Frankfurt/Main, 1999.

[JAM-17] JAMES, M.R. et al.: Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. In: Geomorphology 280, S. 51–66, 2017.

[JAU-16] JAUKOVIC, C. und A.J. HUNTER: Unmanned Aerial Vehicles: A new tool for landslide risk assessment. In: Proceedings of the 11th ANZ Young Geotechnical Professionals Conference, 2016.

[KAE-18] KAERNTEN ORF: <http://kaernten.orf.at/news/stories/2909035/>, Mai, 2018.

[KAH-06] KAHMEN, H.: Vermessungskunde – Angewandte Geodäsie. 20. Auflage. Berlin – New York, Walter de Gruyter, 2006.

[KRI-11] KRIZ, K.: Topographische und Hochgebirgskartographie. In: 50 Jahre Österreichische Kartographische Kommission. Institut für Geographie der Universität Wien, Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, 20, 2011.

[KOH-10] KOHLSTOCK, P.: Kartographie – eine Einführung, 2. Auflage, Paderborn, 2010.

[KOH-11] KOHLSTOCK, P.: Topographie: Methoden und Modelle der Landesaufnahme, 2011.

[LAL-10] LALIBERTE, A.S. et al.: Acquisition, Orthorectification, and Object-based Classification of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery for Rangeland Monitoring. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 76, No. 6, S. 661–672, 2010.

[LAN-06] LANG S., F. ALBRECHT und T. BLASCHKE: OBIA-Tutorial – Introduction to Objectbased Image Analysis, V 1.0 – Salzburg, 2006.

- [MIC-18] UNIVERSITY OF MICHIGAN:
<http://ns.umich.edu/new/multimedia/videos/24406-u-m-researchers-map-new-zealand-landslides-with-satellites-drones-helicopters-hiking-boots>, März, 2018.
- [NEI-11] NEITZEL, F. und J. KLONOWSKI: Mobile 3D Mapping with a Low-Cost UAV System. In: 2011 International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-1/C22, 2011.
- [ORF-18] ORF.AT: <http://wien.orf.at/news/stories/2909989/>, Mai, 2018.
- [PAR-18] PARROT: <https://www.parrot.com/be/business-solutions/ebec-sq#parrot-ebec-sq>, Oktober, 2018.
- [PIX-18a] PIX4D: <https://pix4d.com>, Februar, 2018.
- [PIX-18b] PIX4DCAPTURE: Screenshot der Pix4Dcapture Android Applikation, Februar, 2018.
- [POU-13] POURGHASEMI, H.R., et al.: Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS at the Golestan Province, Iran. – J. Earth Syst. Sci. 122, No. 2, April 2013.
- [PRE-18] DIE PRESSE:
https://diepresse.com/home/panorama/oesterreich/5273646/Drohnen_Vom-Hobby-zum-Aergernis, Februar, 2018.
- [RIE-18a] RIEGL:
<http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/58/>, Jänner, 2018.
- [RIE-18b] RIEGL:
http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegldownloads/RIEGL_VZ-2000i_Datasheet_2017-12-18_Preliminary.pdf, Jänner, 2018.
- [RIE-18c] RIEGL:
http://www.riegl.com/fileadmin/gallery/UAS_UAV/uls_ricoper_in_the_air.JPG, März, 2018.
- [SEN-18a] SENSEFLY:
<https://www.sensefly.com/drone/ebec-plus-survey-drone/>, Februar, 2018.
- [SEN-18b] SENSEFLY:
<https://waypoint.sensefly.com/wp-content/uploads/2015/10/Fixed-Wing-Drone-or-Rotary-Comparison-Table4.jpg>, Februar, 2018.
- [SEN-18c] SENSEFLY:
<https://www.sensefly.com/drone/ebec-mapping-drone>, November, 2018.
- [SEO-18] SEOS:
<http://www.seos-project.eu/modules/classification/classification-c01-p05.html>, Februar, 2018.
- [STA-16] STARK, B. und Y.Q. CHEN: Remote Sensing Methodology for Unmanned Aerial Systems. In: ATKINS, E., A. OLLERA und A. TSOURDOS, Unmanned aircraft systems, 2016.

- [STA-18] DER STANDARD: <https://derstandard.at/2000071774993/Eine-Drohne-im-Dienste-der-Forellenbeobachtung>, Januar, 2018.
- [SIM-17] SIMIC MILAS, A. et al.: Different colours of shadows: classification of UAV. In: 2017 International Journal of Remote Sensing, Vol. 38, NOS. 8-10, 3084-3100, 2017.
- [STE-07] STEINNOCHER, K. et al.: Objekt-orientierte Klassifikation von Orthophotos zur Aktualisierung der digitalen Katastralmappe. In: Vermessung & Geoinformation 1/2007, S. 3-9, 2007.
- [TAM-14] TAMPUBOLON, W. und W. REINHARDT: UAV Data Processing for Large Scale Topographical Mapping. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5, 2014.
- [USG-18] USGS: <https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>, Februar, 2018.
- [UYS-15] UYSAL, M., A.S. TOPRAK und N. POLAT: DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. In: Measurement, Vol. 73, S. 539–543, 2015.
- [WAT-16] WATANABE, Y. und Y. KAWAHARA: UAV photogrammetry for monitoring changes in river topography and vegetation, 2016.
- [WES-12] WESTOBY et al.: ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. In: Geomorphology 179, S. 300–314, 2012.
- [WIE-18a] STADT WIEN: <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/stadtvermessung/geodaten/als/technologie.html>, Februar, 2018.
- [WIE-18b] STADT WIEN: <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/stadtvermessung/geodaten/dgm/>, Februar, 2018.
- [WIE-18c] STADT WIEN: <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/stadtvermessung/geodaten/viewer/geodatendownload.html>, Februar, 2018.
- [YUN-16] YUN-YAO et al.: Study on High Accuracy Topographic Mapping via UAV-based Images. In: 2016 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 44 032006, 2016.

Ich versichere:

- dass ich die Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- dass alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Publikationen entnommen sind, als solche kenntlich gemacht sind.
- dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.
- dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Datum

Unterschrift