



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Datenerfassungsaspekte & Qualitätsanforderungen an
ein Digitales Oberflächenmodell als Basis einer
Schattensimulation für Radfahrwege im GIS“

verfasst von / submitted by

Birgit Ortner, BSc

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

Master of Science (MSc)

Wien, 2023 / Vienna, 2023

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

A 066 856

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

Kartographie und Geoinformation

Betreut von / Supervisor:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	vii
Abkürzungsverzeichnis	viii
Kurzfassung	x
Abstract	xi
Danksagung.....	xii
1 Einleitung.....	1
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Digitale Oberflächenmodelle	5
2.1.1 Geometrische Dimensionen.....	5
2.1.2 Begriffe und Definitionen.....	6
2.1.3 Datenformate und Interpolationsverfahren	7
2.1.4 Qualitätsaspekte.....	10
2.2 Astronomische und atmosphärische Grundlagen	12
2.3 GIS-Tools zur Modellierung von Sonnenstrahlung und Schatten.....	15
3 3D Datenerfassung	19
3.1 Überblick über Methoden und Definitionen	19
3.2 Airborne Laserscanning (ALS)	22
3.3 Direkte und indirekte Geopositionierung	25
3.4 Luftbildphotogrammetrie	27
3.4.1 Grundlagen der Stereophotogrammetrie.....	28
3.4.2 Luftbildflüge.....	30
3.4.3 Bündelblockausgleich und Image Matching.....	31
3.5 UAS-SFM.....	32
3.5.1 UAV-Plattformen und Aufnahmesensoren.....	32
3.5.2 UAS-Befliegung	34

3.5.3	Structure from Motion (SfM)	35
3.6	Radar- und Satellitenfernerkundung	38
3.7	Vergleich der Systeme und Relevanz für die Schattenmodellierung	39
4	Vorgehensweise und praktische Umsetzung	43
4.1	Das Untersuchungsgebiet	43
4.2	Der Workflow im Überblick	44
4.3	Verfügbare DOMs	46
4.4	Datenerfassung im Feld	47
4.4.1	Auswahl der Gebiete	47
4.4.2	Befliegung	50
4.4.3	Aufnahme der Verifizierungspunkte	53
4.5	Data-Processing und Erstellung der DOMs	54
4.6	Analyse im GIS und Verifizierung der Ergebnisse	59
4.6.1	Solar Radiation Toolset	59
4.6.2	Resampling der Datensätze	60
4.6.3	Verifizierung der Ergebnisse	61
5	Ergebnisse	64
5.1	SfM-Modelle	64
5.2	Vergleich der DOMs	67
5.3	Ergebnisse der Schattensimulation	71
5.3.1	Verifizierung mit Orthomosaik	71
5.3.2	Verifizierung mit Verifizierungspunkte	81
5.3.3	Gegenüberstellung & Zusammenfassung der Ergebnisse	85
6	Diskussion	87
7	Fazit	92
8	Literaturverzeichnis	94

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Unterschied zwischen DOM und DGM (Quelle: Yokozawa et al. 2018, S. 49, bearbeitet)	7
Abbildung 2: DHM auf Gitterbasis, wobei die Höhenwerte in einem regelmäßigen Raster angeordnet sind (Quelle: Zhou 2016, S. 3).....	8
Abbildung 3: Zwei Digitale Geländemodelle auf Basis eines TINs (Quelle: Zhou 2016, S. 5).....	10
Abbildung 4: Vergleich unterschiedlicher räumlicher Auflösungen (Quelle: (ESRI o. J.c).....	11
Abbildung 5: Die Komponenten der Globalstrahlung. (Quelle: ESRI o. J.a).....	13
Abbildung 6: Länge des Tages abhängig von der geographischen Breite. Die obere Kurve zeigt die Tagesdauer zur nördlichen Sommersonnenwende, die untere Kurve die Tagesdauer zur nördlichen Wintersonnenwende (Quelle: Roedel und Wagner 2017, S. 4)	14
Abbildung 7: a) Beispiel für ein hemisphärisches Foto (Fischaugeneffekt) b) Abbildung der Horizontalwinkel für eine bestimmte Anzahl an Richtungen c) Rasterbild des Sichtfeldes (Quelle: ESRI o. J.).....	17
Abbildung 8: Beispiel für eine Sonnenkarte (links) und deren Überlagerung mit einem Sichtfeld (rechts) (Quelle: ESRI o. J.)	17
Abbildung 9: Schwadweite (engl. swath width) und Footprint (stark überzeichnet) (Quelle: Beraldin et al. 2011, S. 25)	24
Abbildung 10: a) direkte Geopositionierung mit GNSS und IMU; b) indirekte Geopositionierung mit Passpunkten (Quelle: Toth und Jutzi 2017, S. 58).....	27
Abbildung 11: Ein dreidimensionaler Eindruck des Bildmotivs entsteht, wo sich die Sichtlinien von den Augen zu den Bildern im dahinter liegenden Raum kreuzen. (Quelle: nach Albertz 2007, zitiert aus Aber et al. 2019, S. 24).....	28
Abbildung 12: Stereoskopische Auswertung von Luftbildern (Quelle: Koukal, T.; aus Ackermann et al. 2020, S. 17)	29
Abbildung 13: Übersicht über verschiedene UAV-Plattform-Typen (Quelle: Chamola et al. 2021, S. 3).....	33
Abbildung 14: Typischer SfM-MVS Workflow zur Erstellung einer dichten Punktwolke aus überlappenden Bildern (eigene Darstellung nach Carrivick et al. 2016, S. 38).....	36

Abbildung 15: Schematische Darstellung des gesamten SfM-MVS Workflows (Quelle: Iglhaut et al. 2019, S. 158).....	37
Abbildung 16: Überblick über das Untersuchungsgebiet	43
Abbildung 18: Abschnitt 1, eigene Aufnahme vom Flugtag am 25.09.2021	48
Abbildung 18: Abschnitt 1, eigene Aufnahme vom Flugtag am 25.09.2021	48
Abbildung 19: Abschnitt 2, eigene Aufnahme vom Flugtag am 25.09.2021	49
Abbildung 20: Abschnitt 2, eigene Aufnahme vom ersten Besichtigungstag am 15.09.2021	49
Abbildung 21: Abschnitt 3, eigene Aufnahme vom zweiten Flugtag am 04.10.2021	50
Abbildung 22: Beispiel für einen am Weg befestigten Passpunkt (eigene Aufnahme).....	51
Abbildung 23: Warnhinweis auf der beflogenen Teilstecke (Aufnahme: Pöchersdorfer, P.).....	52
Abbildung 24: Geschätzte Kamerapositionen und dünne Punktwolke als Ergebnis des SfM Arbeitsschrittes (eigene Abbildung).....	55
Abbildung 25: Georeferenzierte dünne Punktwolke. Die blauen Fähnchen zeigen die Positionen der eingemessenen GCPs an. (eigene Abbildung)	56
Abbildung 26: Verdichtete Punktwolke (eigene Abbildung)	57
Abbildung 27: Texturiertes Mesh-Modell. Es sind keine Datenlücken mehr vorhanden. (eigene Abbildung)	57
Abbildung 28: DOM visualisiert im GIS (eigene Darstellung)	58
Abbildung 29: Orthomosaik auf Grundlage der Nadir-Aufnahmen, visualisiert im GIS (eigene Abbildung)	59
Abbildung 30: Unterschiedliche Resampling-Methoden im Vergleich (eigene Abbildung).....	61
Abbildung 31: Ausschnitte der digitalisierten Schattenflächen (eigene Abbildung).....	62
Abbildung 32: Workflow im GIS zur Verifizierung der Ergebnisse auf Grundlage der digitalisierten Schattenflächen (eigene Abbildung).....	63
Abbildung 33: Verteilung der GCPs im Abschnitt 1 (eigene Abbildung).....	65
Abbildung 34: Verteilung der GCPs im Abschnitt 2 (eigene Abbildung).....	66
Abbildung 35: Verteilung der GCPs im Abschnitt 3 (eigene Abbildung).....	66
Abbildung 36: Überblick über alle DOMs. Abschnitt 1 (eigene Abbildung).....	67

Abbildung 37: Vergleich verschiedener räumlicher Auflösungen und Erfassungsmethoden (eigene Abbildung)	68
Abbildung 38: a) Differenz zwischen dem IMG-DOM (resampled auf 0,1 m mit der nearest neighbor Methode) und dem SfM-DOM, berechnet durch die Subtraktion des SfM-DOMs vom IMG-DOM; b) Ausschnitt aus dem IMG-DOMs; c) Ausschnitt aus SfM-DOM (eigene Abbildung)	69
Abbildung 39: a) Differenz zwischen dem ALS-1-DOM und dem eigenen SfM-DOM; b) Ausschnitt aus dem ALS-1-DOM des Landes NÖ; c) Ausschnitt aus dem auf Grundlage der UAV-Befliegung erstellten Orthophoto (eigene Abbildung).....	70
Abbildung 40: Anteil der berechneten (grau) bzw. tatsächlichen (orange) Schattenfläche in Prozent der gesamten Wegfläche (eigene Abbildung)	73
Abbildung 41: Exemplarische Darstellung zur Vorgehensweise, um die gesamte korrekt ausgewiesene Wegfläche zu ermitteln (eigene Abbildung).....	74
Abbildung 42: Anteil der berechneten (grau) bzw. tatsächlichen (orange) Schattenfläche in Prozent der gesamten Wegfläche (eigene Abbildung)	76
Abbildung 43: Berechnete Schattenfläche für Abschnitt 2 auf Grundlage des SfM-DOMs, visualisiert am dreidimensionalen Modell (eigene Abbildung)	76
Abbildung 44: Vergleich der berechneten Schattenfläche auf Grundlage des SfM-DOMs und des IMG-DOMs für Abschnitt 2 (eigene Abbildung).....	77
Abbildung 45: Anteil der berechneten (grau) bzw. tatsächlichen (orange) Schattenfläche in Prozent der gesamten Wegfläche (eigene Abbildung)	79
Abbildung 46: Unterschiede im Ergebnis der Schattenanalyse zwischen dem originalen ALS-5-DOM und dem mit der nearest neighbor Methode auf 1 m interpolierten DOM im Vergleich zum berechneten Schatten des SfM-DOMs (eigene Abbildung).....	80
Abbildung 47: Sichtbarkeitsgrafiken anhand unterschiedlicher DOMs für einen Punkt entlang des Weges. In Rot eingekreist ist die Bewegung der Sonne innerhalb von 20 min. Graue Bereiche zeigen die Abschattung durch Topographie bzw. Objekte auf der Erdoberfläche (eigene Abbildung).....	81
Abbildung 48: Verteilung der Verifizierungspunkte in Abschnitt 1 (eigene Abbildung).....	82
Abbildung 49: Verteilung der Verifizierungspunkte in Abschnitt 2 (eigene Abbildung).....	84
Abbildung 50: Minimal- und Maximalwerte der korrekt ausgewiesenen Fläche gesamt in Prozent der gesamten Wegfläche (eigene Abbildung).....	86

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Zusammenfassung wesentlicher Unterschiede zwischen ALS und Image Matching und dem UAV-SfM Verfahren	40
Tab. 2: Übersicht über die verfügbaren DOMs (Stand November 2021)	46
Tab. 3: Kameraeinstellungen.....	53
Tab. 4: Anzahl der GCPs und Unsicherheitswerte (RMSE)	65
Tab. 5: Zusammenfassung der Parameter für Abschnitt 1	71
Tab. 6: Ergebnisse der Schattensimulation auf Grundlage der unterschiedlichen DOMs für Abschnitt 1	72
Tab. 7: Zusammenfassung der Parameter für Abschnitt 2	74
Tab. 8: Ergebnisse der Schattensimulation auf Grundlage der unterschiedlichen DOMs für Abschnitt 2	75
Tab. 9: Zusammenfassung der Parameter für Abschnitt 3	78
Tab. 10: Ergebnisse der Schattensimulation auf Grundlage der unterschiedlichen DOMs für Abschnitt 3	78
Tab. 11: Rechendauer für 0,09 km ² mit dem Solar Radiation Toolset, abhängig von der räumlichen Auflösung.....	80
Tab. 12: Vergleich der Sichtbarkeitsgrafiken auf Grundlage der verschiedenen DOMs mit den Beobachtungen im Feld für die Verifizierungspunkte in Abschnitt 1	83
Tab. 13: Vergleich der Sichtbarkeitsgrafiken auf Grundlage der verschiedenen DOMs mit den Beobachtungen im Feld für die Verifizierungspunkte in Abschnitt 2	84
Tab. 14: Zusammenfassung der Ergebnisse aus allen drei untersuchten Abschnitten	85
Tab. 15: Zusammenfassung und Gegenüberstellung der Ergebnisse und Verfügbarkeiten (Stand Sept. 2023) der verschiedenen DOMs.....	86

Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
ALS.....	(engl.) <i>Airborne Laser Scanning</i>
APOS.....	(engl.) <i>Austrian Positioning Service</i>
BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen
bDOM.....	bildbasiertes Digitales Oberflächenmodell
DEM	(engl.) <i>digital elevation model</i>
DGM.....	Digitales Geländemodell
DHM.....	Digitales Höhenmodell
DOM.....	Digitales Oberflächenmodell
DSM	(engl.) <i>digital surface model</i>
DTM	(engl.) <i>digital terrain model</i>
dGPS.....	(engl.) <i>Differential Global Positioning System</i>
GCP	(engl.) <i>Ground control point</i>
GIS.....	Geographisches Informationssystem
GNSS.....	(engl.) <i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS.....	(engl.) <i>Global Positioning System</i>
GSD	(engl.) <i>ground sampling distance</i>
INS.....	(engl.) <i>Inertial Navigation System</i>
IMU	(engl.) <i>Inertial Measurement Unit</i>
ISO.....	(engl.) <i>International Organization for Standardization</i>
LiDAR	(engl.) <i>Light Detection and Ranging</i>
MVS	(engl.) <i>Multi-View Stereo</i>
MMT.....	(engl.) <i>Mobile Mapping Technology</i>
NÖ	Niederösterreich
OGC.....	(engl.) <i>Open Geospatial Consortium</i>

POI.....	(engl.) <i>point of interest</i>
RADAR	(engl.) <i>Radio Detection and Ranging</i>
RPAS	(engl.) <i>Remotely Piloted Aircraft System</i>
RSME	(engl.) <i>Root Mean Squared Error</i>
RTK	(engl.) <i>Real Time Kinematic</i>
SAR	(engl.) <i>Synthetic Aperture Radar</i>
SFAP.....	(engl.) <i>small-format aerial photography</i>
SFM	(engl.) <i>Structure from Motion</i>
SIFT.....	(engl.) <i>scale-invariant feature transform</i>
SVF.....	(engl.) <i>sky view factor</i>
TIN	(engl.) <i>triangulated irregular network</i>
UAV	(engl.) <i>Unmanned Aerial Vehicles</i>
UAS	(engl.) <i>Unmanned Aerial System</i>
VLOS.....	(engl.) <i>visual line of sight</i>
VRS	Virtuelle Referenzstationen
VTOL	(engl.) <i>vertical take-off and landing</i>
WGS84	(engl.) <i>World Geodetic System 1984</i>

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die Anforderungen an Digitale Oberflächenmodelle (DOM) sowie deren Erfassungsmethoden für eine GIS-basierte Schattensimulation entlang eines Radweges im ländlichen Raum des nördlichen Waldviertels in Niederösterreich untersucht. Dabei wurden einerseits bereits verfügbare Digitale Oberflächenmodelle aus öffentlicher Hand herangezogen und andererseits ein eigenes DOM mittels UAV-Befliegung (Unmanned Aerial Vehicle) und SfM (Structure from Motion) Verfahren für drei Abschnitte der Radroute erstellt. Für Ersteres wurden ein DOM aus einem Image Matching Verfahren auf Grundlage der Luftbildbefliegung und insgesamt drei DOMs aus einer Airborne Laserscanning Befliegung mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen untersucht. Ziel war es zu herauszufinden, ob mit den bereits bestehenden Modellen aus flugzeuggestützter Datenerfassung eine akkurate Modellierung des Schattens möglich ist und inwiefern mit einem DOM aus UAV-Datenerfassung bessere Ergebnisse erzielt werden können. Die Schattenmodellierung wurde mit dem Solar Radiation Tool in ArcGIS Pro durchgeführt.

Hinsichtlich der Anforderungen an die Digitalen Oberflächenmodelle für eine akkurate Schattensimulation konnte festgestellt werden, dass unabhängig der Erfassungsmethode eine räumliche Auflösung von zumindest 5 m erforderlich ist, um eine Schattenmodellierung entlang des Radweges sinnvoll durchführen zu können. Die besten Ergebnisse konnten aufgrund der hohen Auflösung und der Aktualität der Daten mit dem eigenen DOM aus SfM-UAV erzielt werden. Verglichen mit den unterschiedlichen bereits verfügbaren DOMs ist der Mehrwert einer eigenen Befliegung aber abzuwägen, da die Ergebnisse des SfM-UAV-DOMs nur geringfügig besser sind. Von den DOMs aus öffentlicher Hand konnten mit dem aus Airborne Laserscanning generierten Modell mit einer Auflösung von 1 m die besten Ergebnisse erzielt werden.

Abstract

In this work, the requirements for Digital Surface Models (DSM) as well as their acquisition methods for a GIS-based shadow simulation along a bicycle route in the rural area of the northern Waldviertel in Lower Austria were investigated. On the one hand, already available Digital Surface Models from public sources were used. On the other hand, an own DSM was created from UAV (unmanned aerial vehicle) surveys and SfM (Structure from Motion) methods for three sections of the bike route. For the former, a DSM from an image matching procedure based on aerial photography and a total of three DSMs from an airborne laser scanning survey with different spatial resolutions were examined. The objective was to determine if accurate shadow modeling could be accomplished using available models from airborne data collection and to what degree superior outcomes might be obtained with a DSM from UAV data acquisition. Shadow modeling was performed using the Solar Radiation tool in ArcGIS Pro.

Regarding the requirements of the digital surface models for precise shadow simulation, it was found that a spatial resolution of at least 5 m is necessary regardless of the acquisition method to perform useful shadow modeling along the bike route. The best results were obtained using the SfM-UAV DSM due to the high resolution and timeliness of the data. However, when compared to the various DSMs already available, the added value of an UAV survey must be weighed, as the results of the SfM DSM are only slightly better. Comparing the DSMs from public sources, the model generated from airborne laser scanning with a resolution of 1 m provided the best results.

Danksagung

Mein Dank gilt allen voran meinem Betreuer Prof. Andreas Riedl, der immer ein offenes Ohr für meine Anliegen hatte und mich stets in meiner Arbeit bestärkt hat. Ich möchte mich außerdem für das mir entgegengebrachte Vertrauen über all die Jahre bedanken, dass ich zunächst als Tutorin und später als Lektorin in der Arbeitsgruppe arbeiten durfte und dadurch viele wertvolle Erfahrungen sammeln konnte.

Bedanken möchte ich mich auch bei Martin Schrammel vom Verein Zukunftsraum Thayaland für die Idee, dieses Thema zu bearbeiten sowie die Erlaubnis, Streckenabschnitte des Radwegs für die Dauer der Datenaufnahme abzusperren.

Ein ganz herzliches Danke gilt auch meine Kollegen und guten Freunden Ulrich Zangerl und Stefan Haselberger für die zahlreichen fachlichen Tipps. Bei Uli möchte ich mich außerdem besonders für die Unterstützung am ersten Feldtag bedanken.

Ganz besonders möchte ich mich an dieser Stelle auch bei meinem Freund Peter bedanken, nicht nur für seine Hilfe an einem der Feldtage, sondern vor allem auch für die emotionale Unterstützung in all den Höhen und Tiefen, durch die ich im Laufe der Erstellung der Masterarbeit ging.

Zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern für ihre Geduld und die Unterstützung während meines Studiums bedanken. Ohne diese Unterstützung wäre das so nicht möglich gewesen.

1 Einleitung

In den Sommermonaten sind Fahrradtouren eine beliebte Freizeitaktivität und durch das Aufkommen von E-Bikes ist es nun auch einem größeren Personenkreis möglich, längere Strecken auf dem Fahrrad zurückzulegen (van Cauwenberg et al. 2019). Bewegung und sportliche Aktivitäten bei hohen Temperaturen können aber eine große Belastung für den menschlichen Organismus sein (Förster 2017). So belasten Freizeitsportler:innen, die auch bei Hitze im Freien Sport treiben, insbesondere ihr Herz-Kreislauf-System und „setzen sich gesundheitsgefährdendem Hitzestress aus“ (Schneider et al. 2022, S. 276). Mit dem Klimawandel steigt das hitzebedingte Risiko für die Gesundheit, was neben einem kontinuierlichen Temperaturanstieg im Sommer auch auf die Zunahme von Hitzetagen zurückzuführen ist. Bis 2050 wird eine Verdoppelung von Hitzetagen, also Tagen mit einem Temperaturmaximum von über 30 °C, erwartet (APCC 2018). Ältere Menschen gelten als besonderes vulnerable Gruppe (APCC 2018). Neben der Hitze stellt auch die steigende UV-Exposition an sonnigen Tagen ein gesundheitliches Risiko dar (ebd.).

Durch die Auswirkungen des Klimawandels wird der kühlende Effekt von Schatten umso wichtiger, insbesondere auch bei sportlichen Aktivitäten. Die Beschattung durch Vegetation und künstliche Objekte wie etwa Gebäude hat Einfluss auf die thermische Umgebung (Lin et al. 2010). Durch das Blockieren der einfallenden Sonnenstrahlung kommt es zu einer verringerten Erwärmung der Landoberfläche und der Luft. Schatten beeinflusst dabei nicht nur das thermische Wohlempfinden, sondern reduziert auch die UV-Belastung.

In dieser Arbeit soll daher am Beispiel einer Radroute im nördlichen Waldviertel in Niederösterreich eine Schattensimulation in einem Geographischen Informationssystem (GIS) durchgeführt werden, um die Beschattung entlang eines Radweges zu modellieren. Der Fokus liegt dabei auf dem Schattenwurf, der durch die Vegetation am Wegesrand entsteht. In weiterer Folge kann so analysiert werden, welche Streckenabschnitte zu welcher Tageszeit je nach Jahreszeit im Schatten liegen. Mit dieser Information könnten bestimmte Routen bewusst gewählt werden, um beispielsweise an heißen Sommertagen direkte Sonneneinstrahlung zu vermeiden und in Abhängigkeit der Tageszeit den Grad der Beschattung für Teilstrecken zu berücksichtigen. Die Ergebnisse sind dabei nicht nur für Radfahrwege von Relevanz, sondern könnten beispielsweise auch auf Laufwegen, Wanderwegen, Sportplätzen und Parkanlagen umgelegt werden.

Die eintreffende Sonnenstrahlung und damit die Beschattung ist grundsätzlich tageszeitlichen und saisonalen Veränderungen aufgrund des variierenden Sonnenstandes unterworfen. Um die Sonneneinstrahlung für einen bestimmten geographischen Bereich sowie einen bestimmten Zeitraum zu analysieren, müssen neben diesen Änderungen des Sonnenstandes auch atmosphärische Effekte, Breiten- und Höhengrade von Standorten, Neigung und Ausrichtung berücksichtigt werden. Für die Simulation des Schattens sind das Relief sowie die Objekte der Erdoberfläche die entscheidenden Faktoren. (ESRI o. J.a)

Hauptkomponente für die Analyse im GIS ist demnach ein Digitales Oberflächenmodell (DOM), welches die Erdoberfläche samt allen darauf befindlichen natürlichen und künstlichen Objekten, wie etwa Vegetation und Gebäude, beschreibt (Ackermann et al. 2020). In Österreich werden DOMs für das Staatsgebiet von Seiten der öffentlichen Hand erstellt und in einem bestimmten, meist mehrjährigen Zyklus aktualisiert. Für das Untersuchungsgebiet können dabei verschiedene DOMs vom Bund und vom Land Niederösterreich herangezogen werden, die sich hinsichtlich der Art und des Zeitpunkts der Datenerfassung, der Auflösung sowie ihrer Verfügbarkeit unterscheiden. Die Erstellung eines solchen Oberflächenmodells erfolgt in der Landesvermessung meistens auf Grundlage von Daten aus flugzeuggetragenen Laserscanning, also Airborne Laserscanning (ALS), oder über die stereophotogrammetrische Auswertung digitaler Luftbilder (Image Matching). Für kleinräumigere Untersuchungen wurde mit der zunehmenden Verbreitung von UAVs (engl. *unmanned aerial vehicle*), welche im allgemeinen Sprachgebrauch als Drohnen bezeichnet werden, und dem Aufkommen des Structure from Motion Verfahrens für geowissenschaftliche Zwecke eine kostengünstige Alternative für die Erstellung hochaufgelöster Oberflächenmodelle geschaffen (Aber et al. 2019, Westoby et al. 2012).

Eine Schattensimulation stellt nun bestimmte Qualitätsanforderungen an ein Digitales Oberflächenmodell, um möglichst akkurate Ergebnisse zu liefern. Hierbei ist insbesondere die räumliche Auflösung bzw. der Detailgrad entscheidend, aber auch die Erfassungsmethode und damit einhergehend die Aktualität und der Zeitpunkt der Datenaufnahme spielen eine Rolle, da beispielsweise die Vegetation im Sommer aufgrund der Belaubung dichter ist als im Winter.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist nun, Digitale Oberflächenmodelle in Bezug auf ihre Eignung für eine GIS-basierte Schattenmodellierung entlang von Radfahrwegen zu evaluieren. Es soll untersucht werden, welche Erfassungsmethode am besten geeignet ist und welche Anforderungen hinsichtlich der genannten Aspekte an das fertige DOM gestellt werden müssen, um einfallende Sonnenstrahlung und Schattenwurf mit einem bestehenden Algorithmus für den gegebenen Anwendungszweck hinreichend genau modellieren zu können. Im Zuge dessen soll geklärt werden, ob die für das Untersuchungsgebiet verfügbaren DOMs diese Anforderungen erfüllen. Des Weiteren soll untersucht werden, ob ein durch UAV-Befliegung und Structure from Motion erzeugtes DOM bessere Ergebnisse liefern kann als ein DOM, welches mit einer für die Landesvermessung üblichen flugzeuggestützten Erfassungsmethode erstellt wurde.

Bisherige Publikationen zur Analyse von Sonnenstrahlung und Schattenwürfe konzentrieren sich vor allem auf den urbanen Raum, insbesondere im Kontext von Standorten für Photovoltaik Anlagen (siehe u.a. Freitas et al. 2015, Martín et al. 2015, Fogl und Moudrý 2016, Yokozawa et al. 2018) aber auch im Zusammenhang von urbanen Hitzeinseln (Cheung et al. 2016, Li und Ratti 2018, Yu et al. 2020). Polo und García (2023) untersuchten in ihrer Arbeit den Einfluss zweier Erfassungsmethoden zur Erstellung von DOMs auf das Solarpotenzial.

Einige Publikationen beschäftigen sich mit der Modellierung von Schatten entlang von fließenden Gewässern, um den Einfluss auf die Wassertemperatur zu analysieren, wobei hier meist mittels ALS erzeugte DOMs als Grundlage für eine GIS Analyse verwendet werden (Loicq et al. 2018, Bachiller-Jareno et al. 2019, Kałuża et al. 2020). Im Gegensatz dazu verglichen Dugdale et al. (2019) in ihrer Arbeit ein mit ALS erzeugtes DOM mit einem mittels Structure from Motion Verfahren erstellten DOM aus einer UAV-Befliegung.

Vergleichbare Untersuchungen für Straßen und Wege im nicht-urbanen Raum gibt es bisher kaum. In einer Studie von Faka et al. (2019) wurde die Exposition eines Straßennetzes gegenüber direkter Sonneneinstrahlung unter Verwendung von GIS untersucht. In einer Publikation aus dem Jahr 2021 untersuchten Žižlavská et al. den Einfluss von Vegetation entlang von Radfahrwegen auf die Oberflächentemperaturen. Hier wurde mittels Structure from Motion ein Oberflächenmodell generiert und dann mit GIS-Tools die einfallende Sonnenstrahlung und Beschattung analysiert. Der Fokus dieser Studie liegt allerdings vorrangig auf unterschiedlichen Straßenoberflächen und nicht auf dem Digitalen Oberflächenmodell als Eingangsdatensatz für die Modellierung.

Mit der vorliegenden Arbeit soll daher die Forschungslücke geschlossen werden und auf Grundlage der oben genannten Ziele folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- **Welche Anforderungen muss ein Digitales Oberflächenmodell erfüllen, um für die Durchführung einer GIS-basierten Schattenmodellierung für Radwege geeignet zu sein?**
- **Können diese Anforderungen von bereits zur Verfügung stehenden Digitalen Oberflächenmodellen erfüllt werden? Lassen sich die Ergebnisse der Schattensimulation im Feld verifizieren?**
- **Inwiefern kann die Genauigkeit der Schattensimulation durch eine eigene Datenaufnahme und Erstellung eines DOMs mit UAV-Befliegung und Structure from Motion im Vergleich zu den bereits vorhandenen Digitalen Oberflächenmodellen verbessert werden?**

Für die Beantwortung der Forschungsfragen wurden insgesamt vier Digitale Oberflächenmodelle untersucht. Drei davon stammen vom Land Niederösterreich. Die DOMs wurden mit ALS erstellt und werden in räumlichen Auflösungen von 1 m, 5 m und 10 m kostenlos bereitgestellt. Vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen wurde ein DOM mit 0,5 m Auflösung bezogen, welches mit dem Verfahren des Image Matching aus der Luftbildbefliegung erstellt wurde.

In einem weiteren Schritt wurde für ausgewählte Abschnitte der untersuchten Radstrecke eine UAV-Befliegung durchgeführt und mit Structure from Motion ein hochaufgelöstes Digitales Oberflächenmodell erstellt. Die Datenerfassung wurde im Frühherbst durchgeführt, da zu diesem Zeitpunkt die Vegetation noch am Höchststand war. Um den

durch die Vegetation verursachten Schattenwurf zu analysieren, ist dies von zentraler Bedeutung. Bei der Auswahl der Streckenabschnitte wurde dabei auf unterschiedliche hohe und dichte Vegetation entlang der Route geachtet.

Anschließend wurden die Ergebnisse der Analyse von den verschiedenen Modellen verglichen und evaluiert sowie mit den Aufnahmen aus dem Feld verifiziert. Die Modellierung der Sonnenstrahlung bzw. der Schattenbildung erfolgte mit dem ArcGIS Pro Solar Radiation Toolset, welches auf einem von Rich et al. (1994) und von Fu und Rich (2000, 2002) weiterentwickelten hemisphärischen Sichtfeldalgorithmus beruht.

Die Arbeit ist wie folgt strukturiert:

Zunächst folgt nun ein Kapitel zu den theoretischen Grundlagen. Der erste Teil ist Digitalen Oberflächenmodellen im Allgemeinen gewidmet. Nach einer begrifflichen Abgrenzung werden die verschiedenen Datenformate für die Bereitstellung von DOMs sowie Qualitätsaspekte beleuchtet. Im zweiten Teil werden die astronomischen und atmosphärischen Grundlagen für die Modellierung von Sonne und Schatten dargelegt. Im dritten und letzten Teil des ersten Kapitels wird auf GIS-Module für die Schattenmodellierung eingegangen und schließlich die Funktionsweise des für diese Arbeit verwendeten Pakets in ArcGIS Pro erläutert.

Im Anschluss folgt ein Kapitel zu den 3D Erfassungsmethoden. Es werden die verschiedenen Verfahren zur Gewinnung von dreidimensionalen (Punkt)Daten näher vorgestellt, welche die Grundlage für die Erstellung von DOMs bilden.

Es folgt ein Kapitel zur methodischen Vorgehensweise und praktischen Umsetzung des Forschungsvorhabens. Es werden die einzelnen Arbeitsschritte von der Auswahl der Untersuchungsgebiete gefolgt von der Feldarbeit bis zur anschließenden Datenprozessierung detailliert erläutert.

Danach folgt das Kapitel zu den Ergebnissen aus dem Vergleich der DOMs und der Schattenmodellierung.

Den Abschluss bilden die Diskussion der Ergebnisse und sowie das Resümee.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel folgt eine Einführung in die theoretischen Grundlagen. Zunächst soll ein Überblick über Digitale Oberflächenmodelle gegeben werden, welche den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit darstellen und die Hauptkomponente für die Schattenanalyse sind. Neben einer begrifflichen Abgrenzung soll auch auf Datenformate und Qualitätskriterien eingegangen werden. Schatten entsteht durch Sonnenstrahlung, weshalb im darauffolgenden Unterkapitel die astronomischen Grundlagen erläutert werden und auf die Sonnenstrahlung als komplexes Zusammenspiel von Atmosphäre und Erdoberfläche eingegangen wird. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels wird dann ein Überblick über GIS-Tools zur Schattenmodellierung gegeben sowie die Funktionsweise des für diese Arbeit verwendeten *Solar Radiation Tools* von ArcGIS Pro erklärt.

2.1 Digitale Oberflächenmodelle

Ein Digitales Oberflächenmodell (DOM) bezeichnet ein digitales Modell, das die Erdoberfläche samt allen darauf befindlichen natürlichen und künstlichen Objekten beschreibt (Ackermann et al. 2020). Das DOM gehört zu den Digitalen Höhenmodellen, wobei auf die unterschiedlichen Arten und Begriffe im Unterkapitel 2.1.2 näher eingegangen wird. Da sich Digitale Höhenmodelle an der „Schnittstelle zwischen 2D und 3D“ (Bill 2016, S. 376) befinden, sollen im folgenden Unterkapitel zunächst die verschiedenen geometrischen Dimensionen in einem GIS erläutert werden.

2.1.1 Geometrische Dimensionen

Man unterscheidet in einem GIS hinsichtlich der Geometriedaten zwischen verschiedenen Dimensionen. Als **zweidimensional** gilt ein GIS dann, wenn die Geometriedaten nur X- und Y-Koordinaten aufweisen, jedoch keine Höhenangaben vorhanden sind. Man bezeichnet das als Planimetrie (Bill 2016). Bei **dreidimensionalen** (3D) Geometriedaten haben alle Punkte X-, Y- und Z-Koordinate, wobei die Z-Koordinate den Höhenwert angibt. Verbindungslinien zwischen den Punkten liegen dabei nicht in einer Ebene.

Neben 2D und 3D unterscheidet man in einem GIS aber noch weitere Dimensionen. Ein GIS bezeichnet man als **zweieinhalbdimensional** (2,5D), wenn zur Lagegeometrie die Höheninformation als Attribut gespeichert ist. Das heißt, dass für jeden Lagepunkt zusätzlich zur X- und Y-Koordinate nur genau einen Höhenwert abrufbar ist. „Die räumliche Beschreibung ist somit abhängig von der Dichte der Lagegeometrie“ (ebd., S. 23). Digitale Oberflächenmodelle liegen meist in dieser Form vor. Im Gegensatz zu einem tatsächlich dreidimensionalen Datensatz, können bei 2,5D beispielsweise keine Überhänge gespeichert werden.

Des Weiteren spricht man von **zwei-plus-eindimensional** (2D + 1D), wenn die Planimetrie durch eine Höhen- bzw. Geländebeschreibung wie beispielsweise Höhenlinien ergänzt wird, welche jedoch nicht mit der Lagegeometrie verknüpft ist (ebd.).

Ein einzelner Punkt wird durch Koordinaten beschrieben, weist aber keine Ausdehnung auf, weshalb diese auch als nulldimensional bezeichnet werden. Linien hingegen gelten als eindimensional, da sie zwar eine Ausdehnung haben, jedoch nur in eine Richtung (Müller 2014).

2.1.2 Begriffe und Definitionen

Ein Digitales Höhenmodell (DHM; engl. *digital elevation model*, DEM) bezeichnet eine geordnete oder ungeordnete Menge an digitalen Höhenwerten, die eine Funktion der Lage – also der X- und Y-Koordinaten der Punkte – darstellen und die Geländeoberfläche hinreichend beschreiben (Zhou 2016, Bill 2016). Man unterscheidet verschiedene Arten von Höhenmodellen, je nach Ableitung bzw. Weiterverarbeitung der Höheninformationen (Ackermann et al. 2020).

Meist wird zwischen zwei Arten von Höhenmodellen unterschieden, dem Digitalen Geländemodell (DGM, engl. *digital terrain model*, DTM) und dem Digitalen Oberflächenmodell (engl. *digital surface model*, DSM). Ein DGM beschreibt die Geländeoberfläche ohne Gebäude und Vegetation. Im Gegensatz dazu beschreibt ein DOM, wie bereits erwähnt, die Erdoberfläche mit allen natürlichen und künstlichen Objekten. Ein DOM enthält also beispielsweise die Höhen der Häuser oder Bäume, während ein DGM das darunter liegende Relief darstellt (Ackermann et al. 2020, Jäger et al. 2020).

Das DHM wird dabei in der Literatur meist als Überbegriff verstanden (Jäger et al. 2020). Teilweise werden DHM und DGM allerdings auch synonym gebraucht (Bill 2016). In Li et al. (2005) versteht man unter DGM einen allgemeineren Begriff. Ein DGM kann demnach neben der Höhe auch weitere Geländeinformationen wie beispielsweise hydrographische Merkmale so wie komplexe geomorphologische Elemente enthalten. Ein DHM beschreibt dabei nur eine Art der Geländeinformation, nämlich die Höhe, weshalb das DHM als Teilmenge des DGM verstanden wird. In weiterer Folge wird für diese Arbeit jedoch von den zuvor eingeführten Definitionen für DHM, DGM und DOM ausgegangen, wobei das DHM als Überbegriff verstanden wird.

Durch Subtraktion des DGM vom DOM kann ein normalisiertes Oberflächenmodell (nDOM) abgeleitet werden. Das nDOM stellt also alle natürlichen und künstlichen Objekte dar, „die sich über dem Boden erheben“ (Ackermann et al. 2020, S. 9). Wichtig ist dabei, dass DGM und DOM im gleichen Lage- und Höhenbezugssystem vorliegen. Aus dem nDOM kann dann in weiterer Folge zudem ein Vegetationshöhenmodell (VHM) erstellt werden, indem aus dem nDOM alle künstlichen Objekte entfernt werden (ebd.).

In Abb. 1 ist der Unterschied zwischen DOM und DGM sowie der Schattenwurf aufgrund von Objekten auf der Oberfläche schematisch dargestellt. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf den Digitalen Oberflächenmodellen. Zwar ist der Schattenwurf generell auch abhängig vom Gelände an sich, jedoch zeigt Abb. 1 deutlich, dass für die in dieser Arbeit behandelte Problemstellung ein DOM benötigt wird, insbesondere da das Untersuchungsgebiet nur geringe Reliefunterschiede aufweist.

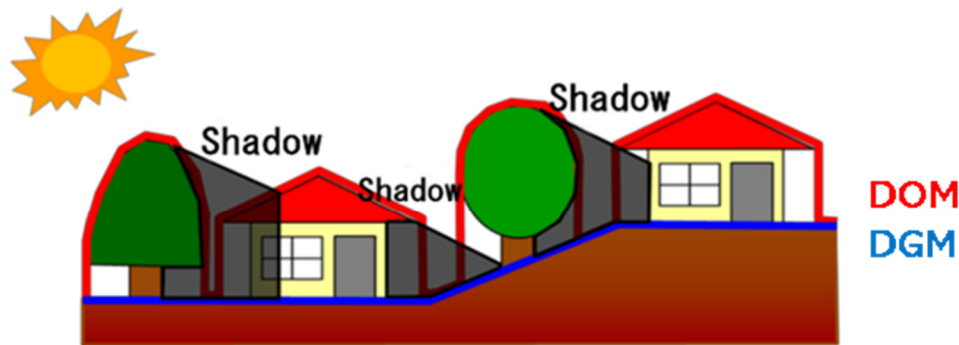


Abbildung 1: Unterschied zwischen DOM und DGM (Quelle: Yokozawa et al. 2018, S. 49, bearbeitet)

Gelegentlich findet man in der Literatur und insbesondere auch auf Webseiten verschiedener Vermessungsämter auch den Begriff des bildbasierten Digitalen Oberflächenmodells (bDOM). Als bDOM wird ein DOM bezeichnet, welches aus Luftbildern gewonnen und in Form eines regelmäßigen Gitters in 2,5D zur Verfügung gestellt wird. Auf die verschiedenen Arten der Modellbildung wird nun im folgenden Unterkapitel näher eingegangen.

2.1.3 Datenformate und Interpolationsverfahren

Digitale Höhenmodelle werden in der Regel aus Luftbildern, durch Laserscanning oder durch Radar gewonnen (Jäger et al. 2020). Generell können aber auch andere 3D-Datenerfassungsmethoden wie beispielsweise die Tachymetrie herangezogen werden, um DGMs und DOMs zu generieren. In Kapitel 3 wird ausführlich auf die verschiedenen Datenerfassungsmethoden sowie ihre Vor- und Nachteile eingegangen. Als Ergebnis der Datenerfassung erhält man je nach Erfassungsmethode entweder direkt oder nach der Datenprozessierung eine dreidimensionale Punktwolke, die die Grundlage für Digitale Höhen- bzw. Oberflächenmodelle bildet. Es gibt nun verschiedene Möglichkeiten diese in weiterer Folge bereitzustellen.

Die erste Möglichkeit ist die Bildung eines DHMs auf Basis eines quadratischen Gitters, also als Rasterdaten (engl. *grid*). Dabei wird aus den in der Regel unregelmäßig verteilten (Mess)Punkten ein regelmäßiges Gitter abgeleitet, wobei die Höhen des Gitters mittels Interpolationsverfahren (siehe unten) erzeugt werden (Bill 2016, Zhou 2016). Das Grundelement eines Rasterdatensatzes ist das *Pixel* und jedem Pixel ist genau ein Höhenwert zugeordnet (Bill 2016). Die Geländeoberfläche wird also durch eine Matrix von Punkthöhen dargestellt und die Position eines jeden Punktes wird durch Zeilen- und Spaltennummern definiert (Abb. 2). Das Modell liegt also in 2,5D vor. Diese Form der

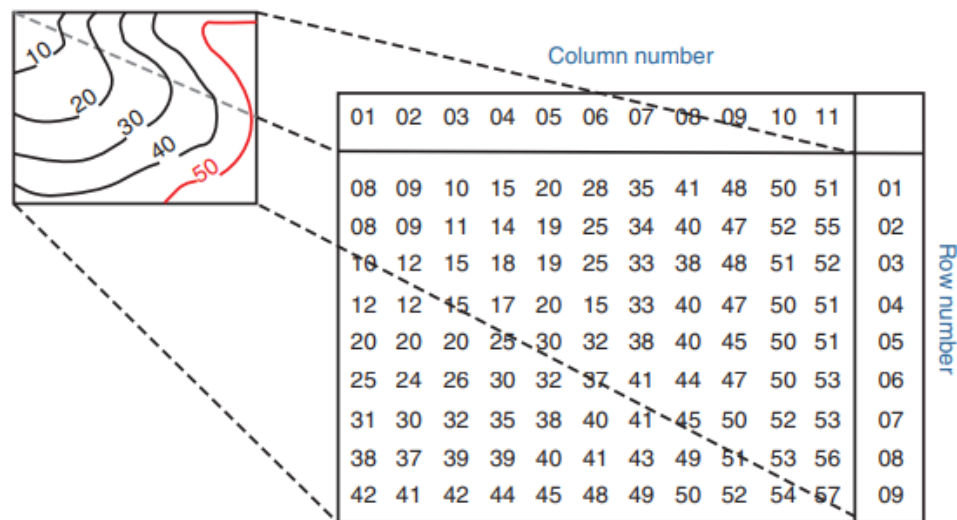


Abbildung 2: DHM auf Gitterbasis, wobei die Höhenwerte in einem regelmäßigen Raster angeordnet sind (Quelle: Zhou 2016, S. 3)

Bildung von Höhenmodellen ist weit verbreitet. Zwar nimmt die Datenanalyse direkt an der Punktwolke immer mehr zu, jedoch kann durch eine Umwandlung in ein regelmäßiges Raster der Speicheraufwand deutlich verringert werden und ermöglicht außerdem die Verwendung von Standard-Raster-GIS-Tools. Außerdem bietet ein Raster den Vorteil, dass es einfach zu konstruieren und zu berechnen ist. Ein regelmäßiges Gitter hat allerdings den Nachteil, dass aufgrund der fix definierten Auflösung über das gesamte Modell und die regelmäßige Anordnung der Datenpunkte die Genauigkeit der Darstellung des Geländes begrenzt ist. Durch Interpolation kann einerseits ein gewisser Glättungseffekt entstehen, der dazu führt, dass bestimmte Geländeformen bzw. bestimmte Objekte auf der Erdoberfläche im Modell nicht repräsentiert werden. Andererseits können dadurch auch Artefakte konstruiert werden (Zhou 2016).

Für die Interpolation der dreidimensionalen Punktwolke in ein regelmäßiges Raster gibt es verschiedene Verfahren („*gridding*“). Diese Verfahren können unterschiedlich klassifiziert werden. Die erste Möglichkeit ist die Unterscheidung von globalen oder lokalen Verfahren. Während bei ersterem jeder interpolierte Zellenwert von allen Datenpunkten in der Punktwolke beeinflusst wird, spielen bei zweiterem nur die Punkte in der „nahen“ Umgebung des jeweiligen interpolierten Wertes eine Rolle (Gonçalves 2006). Des Weiteren unterscheidet man zwischen exakten und approximativen Verfahren. Bei exakten

Interpolationsverfahren wird die erzeugte Fläche durch alle Datenpunkte gelegt, während diese bei approximativen Methoden nur einem Trend in den Datenpunkten folgt (ebd.). Zuletzt wird zwischen deterministischen und stochastischen Methoden unterschieden. Im Gegensatz zu deterministischen Interpolationsverfahren wird die Oberfläche bei stochastischen Verfahren (geo)statistisch aus den Datenpunkten erzeugt (ebd.).

Eine der einfachsten Interpolationsmethoden ist die Methode des nächsten Nachbarn (engl. *nearest neighbour*, siehe dazu auch Kapitel 4.2.5). Dabei wird dem zu interpolierenden Zellenwert der Höhenwert (z-Wert) jenes Punktes in der Punktwolke zugeordnet, der dem Gitterknoten am nächsten ist (Gonçalves 2006). Sehr häufig verwendet wird auch das Verfahren „Inverse Distance Weighting“ angewandt. Dabei werden die (Mess)Punkte so gewichtet, dass die näher gelegenen Punkte stärker gewichtet werden und der Einfluss eines Punktes mit zunehmender Entfernung abnimmt.

Eine einfache Möglichkeit zum Ableiten von DOMs ist, dem jeweiligen Zellenwert den Höhenwert des höchsten Punktes oder das arithmetische Mittel der Höhen innerhalb der definierten Rasterzelle zuzuweisen (Hollaus et al. 2010). Bei glatteren Oberflächen kann dies jedoch zu einer künstlichen Rauigkeit führen. Im Gegensatz dazu kommt es bei der ebenfalls für die Generierung von DSM angewandten „gleitender Kleinste-Quadrat-Interpolation“ zu einer Glättung von beispielsweise Baumkronen oder Gebäudekanten (ebd.).

Es gibt neben den genannten Methoden eine Reihe anderer Interpolationsverfahren, auf die an dieser Stelle nicht eingegangen werden kann. Je nach Anwendungsfall sind die Methoden unterschiedlich gut geeignet und führen zu teils sehr unterschiedlichen Ergebnissen bzw. Rastern (Bill 2016). Während ein glättender Effekt beispielsweise bei der Visualisierung von DGMs erwünscht sein kann, ist eine die Oberfläche glättende Methode für DOMs oft nicht geeignet, weshalb hier jeweils andere Methoden bevorzugt werden.

Neben der Bildung eines regelmäßigen Rasters ist die zweite Möglichkeit der Konstruktion eines DHMs die Bildung eines sogenannten *Triangulated irregular network* (TIN, auch „Dreiecksvermaschung“ genannt, siehe Lange 2020, S. 424), also einem Netz aus unregelmäßigen, sich nicht überlappenden Dreiecken (siehe Abb. 3). Dabei bilden die Punkte der Punktwolke direkt die Stützpunkte für die Dreiecke. Die Position und Dichte dieser Punkte definieren dabei die Größe und Form der Dreiecke (ebd.). TINs ermöglichen auch die Berücksichtigung von topographischen Merkmalen im DGM wie beispielsweise Gipfelpunkte und Bruchkanten. Der Nachteil des TINs ist, ähnlich wie bei der Verarbeitung der Punktwolke selbst, die komplexere und aufwendigere Datenspeicherung und -verarbeitung im Vergleich zum regelmäßigen Raster (Zhou 2016). Da bei dieser Methode die Messpunkte erhalten bleiben wird das Erstellen eines TINs in der Literatur auch als exaktes Interpolationsverfahren bezeichnet (Gonçalves 2006).

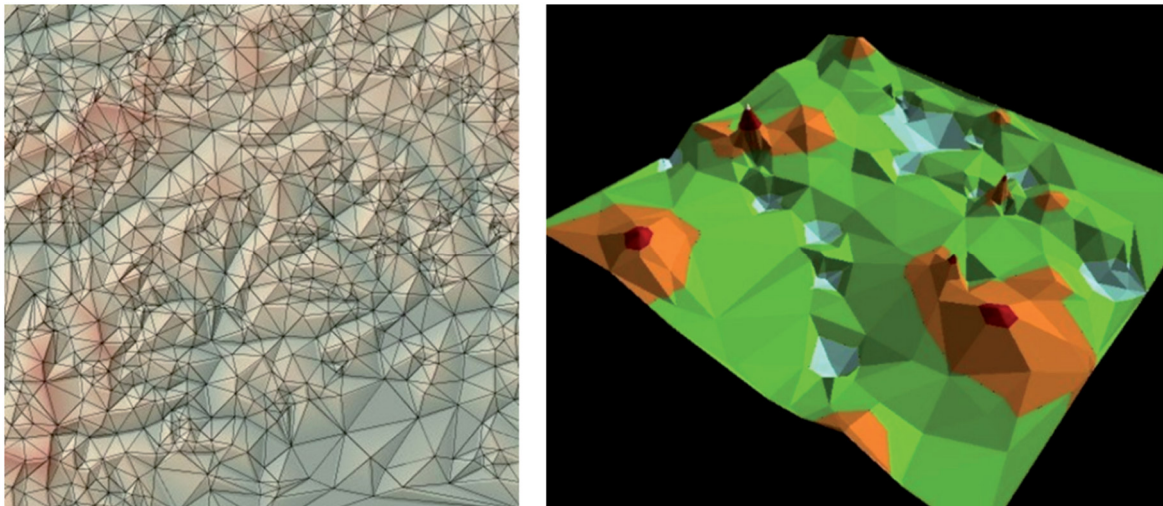


Abbildung 3: Zwei Digitale Geländemodelle auf Basis eines TINs (Quelle: Zhou 2016, S. 5)

Bill (2016) unterscheidet für DGMs auch noch eine hybride Anordnung. Dabei werden bei dem Modell auf Gitterbasis auch bestimmte Geländeinformationen in Form einer Dreiecksvermaschung berücksichtigt.

2.1.4 Qualitätsaspekte

Grundsätzlich versteht man unter Qualität die Summe aller charakteristischen Merkmale eines Produkts (Lange 2020). In weiterer Folge beschreibt die „Datenqualität“ die Menge von Datenmerkmalen, „die den Einsatz der Daten für eine konkrete Aufgabe ermöglichen (*quality = fitness for use*)“ (ebd., S. 267). Qualitätsangaben können dabei quantitativ oder qualitativ sein. Quantitative Qualitätsangaben erfolgen durch (statistische) Maßzahlen oder Parameter wie beispielsweise der Standardabweichung, Konfidenzintervalle oder RMSE-Fehler (siehe dazu Kap. 5.1), während qualitative Qualitätsangaben textlicher Natur sind (ebd.).

Allgemeine Qualitätsmerkmale und Prinzipien zur Bewertung der Qualität von Geodaten sind in internationalen Standards definiert. Mehrere Organisationen befassen sich mit solchen Normierungsarbeiten. Die internationale Vereinigung von Normierungsorganisationen ist die International Organization for Standardization (ISO). Innerhalb der ISO ist das Technical Committee TC 211 für das Feld der Geoinformation zuständig. In Kooperation mit der gemeinnützigen Organisation *Open Geospatial Consortium* (OGC) werden dabei Standards für die Verbesserung der Nutzung von Geodaten geschaffen. Die ISO-Reihe 19xxx beinhaltet die Normung von Geoinformationen und Geodaten. In der ISO 19157:2013 Norm (ersetzt ISO 19113:2002) ist die Beschreibung sowie die Bewertung der Qualität von Geodaten festgelegt. Der Standard definiert sechs Elemente, welche die Datenqualität umfasst: Vollständigkeit, thematische Genauigkeit, logische Konsistenz, zeitliche Qualität, räumliche Genauigkeit und Nutzbarkeit.

Für Geodaten ist die räumliche Genauigkeit von besonderer Bedeutung, genauer die räumliche Auflösung und die Lagegenauigkeit (Lange 2020). Bei Rasterdaten beschreibt die räumliche Auflösung die Größe des Pixels, also die reale Erdoberfläche, die von einem einzelnen Pixel dargestellt wird (ESRI o. J.c). Demnach ist bei einer räumlichen Auflösung von 1 m die von einem Pixel dargestellte Bodenfläche 1x1 m groß. Je höher die räumliche Auflösung, umso kleiner die Pixel und umso größer die Pixelzahl pro Flächeneinheit (ebd., siehe Abb. 4). Die räumliche Auflösung kann dabei auch ein

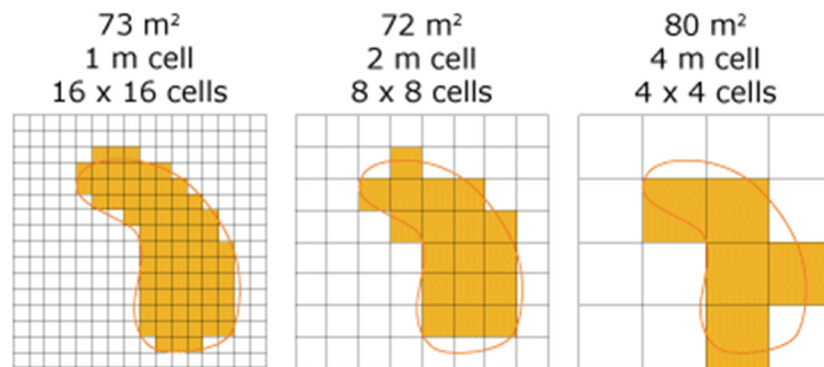


Abbildung 4: Vergleich unterschiedlicher räumlicher Auflösungen
(Quelle: ESRI o. J.c)

entscheidender Faktor für der geometrischen Datengeneralisierung sein, „wobei die Übergänge zur Lagegenauigkeit fließend sind“ (Lange 2020, S. 268). Die Lagegenauigkeit gibt Auskunft über die Genauigkeit der Lage von Geoobjekten, also deren Koordinatenangaben. Diese wird zu einem großen Teil von der Art der Datenerfassung beeinflusst.

Generell ist die Qualität eines Digitalen Oberflächenmodells maßgeblich von der Aktualität und der Qualität der Eingangsdaten abhängig (Ackermann et al. 2020). Die Erfassungsmethode sowie die Umsetzung der Datenerfassung hat demnach auch Einfluss darauf, wie genau eine Geländeoberfläche repräsentiert wird. Die Genauigkeit eines DOMs bzw. DGMs ist außerdem von der Strukturierung und der mathematischen Verarbeitung, also dem Interpolationsverfahren (siehe oben), abhängig (Bill 2016). Kennt man den Prozess der Datenerfassung nicht im Detail, erfolgt die Beurteilung der Qualität der DHMs bei bestehenden Modellen vorwiegend auf der räumlichen Genauigkeit (Luethy 2007).

Genauigkeitsangaben von DOMs beziehen sich auf die Höhengengenauigkeit. Diese wiederum ist insbesondere abhängig von der Rasterweite, also der räumlichen Auflösung des Rasters, sowie u.a. der Topographie, dem Erfassungszeitpunkt und dem Bewuchs (AdV - Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland 2021). Wie genau der Bewuchs bzw. dessen Höhe im DOM repräsentiert wird, ist je nach Erfassungszeitpunkt der Eingangsdaten und generell je nach Art des Bewuchses unterschiedlich.

In Hinblick auf die Anforderungen für die Schattenmodellierung werden für diese Arbeit bei der Beurteilung der DOMs neben den unterschiedlichen Verfügbarkeiten folgende Aspekte berücksichtigt: die räumliche Auflösung, die Erfassungsmethode und damit einhergehenden unterschiedlichen Genauigkeiten sowie der Zeitpunkt der Datenaufnahme und die Aktualität des Datensatzes. Hinsichtlich der oben erwähnten sechs Elemente, welche die Datenqualität im ISO-Standard umfasst, wird der Fokus damit insbesondere auf die räumliche Genauigkeit, die zeitliche Qualität und die Nutzbarkeit gelegt. Auch der Aspekt der thematischen Genauigkeit, welche in der Norm als Korrektheit der Attribute verstanden wird, wird in Bezug auf die Höhenwerte berücksichtigt. Da die verfügbaren DOMs aus öffentlichen Vermessungsverwaltungen stammen und flächendeckend vorhanden sind, kann die Vollständigkeit der Datensätze grundsätzlich angenommen werden. Von der logischen Konsistenz, also die Widerspruchsfreiheit in der Datenstruktur, kann auch aufgrund der Art des Datensatzes ausgegangen werden.

2.2 Astronomische und atmosphärische Grundlagen

Als Sonnenstrahlung bezeichnet man die von der Sonne emittierte kurzwellige Strahlung. Eine wichtige Größe hierbei ist sogenannte Solarkonstante, also „*die Strahlungsflussdichte [...] der Sonne, die auf die äußere Atmosphäre der Erde trifft*“ (Matyssek und Herppich 2019, S. 36). Aktuell beträgt die Solarkonstante ca. $1360 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ (ebd.). Abhängig vom Wellenlängenbereich wird ein wesentlicher Teil der Sonnenstrahlung beim Durchdringen der Atmosphäre absorbiert oder gestreut. So wird zum Beispiel aufgrund der Ozonschicht die energiereiche UV-Strahlung mit einer Wellenlänge von weniger als 300 nm absorbiert, was eine Voraussetzung für das menschliche Leben auf der Erde darstellt (ebd.).

Die Gesamtheit der auf der Erde auftreffenden kurzwelligen Sonnenstrahlung wird Globalstrahlung genannt (Matyssek und Herppich 2019). Sie setzt sich zusammen aus der direkten Sonnenstrahlung, also dem direkten Sonnenlicht, und der diffusen Strahlung, die in der Luft und an den Wolken gestreut wird und dann auf die Erdoberfläche trifft (siehe Abb. 5) (Roedel und Wagner 2017). Die diffuse Strahlung kann weiter in Himmels- und Wolkenlicht unterschieden werden (Matyssek und Herppich 2019). Wenn die Sonne im Zenit steht, macht das Himmelslicht an klaren Tagen etwa 10 % der direkten Sonnenstrahlung aus (ebd.). In den Morgen- und Abendstunden, wenn die Sonne nahe dem Horizont steht, ist der Anteil des Himmelslichts an der Globalstrahlung größer als die direkte Sonnenstrahlung. Ist der Himmel bedeckt, trifft keine direkte Sonnenstrahlung mehr auf die Erdoberfläche. Man spricht dann vom sogenannten Wolkenlicht. Die Strahlung wird bei einer 100 m hohen Wochendecke etwa um die Hälfte gemindert. (Matyssek und Herppich 2019)

Die Globalstrahlung ändert sich aber nicht nur aufgrund atmosphärischer Bedingungen, sondern unterliegt, abhängig vom Sonnenstand, auch tages- und jahreszeitlichen Schwankungen (Matyssek und Herppich 2019). Nach Roedel und Wagner (2017, S. 24) liegt der „zeitlich und räumlich gemittelte Wert [...] bei etwa 180 bis 190 W/m²“. Die Erde kreist in einer elliptischen Umlaufbahn um die Sonne. Der Abstand von der Sonne

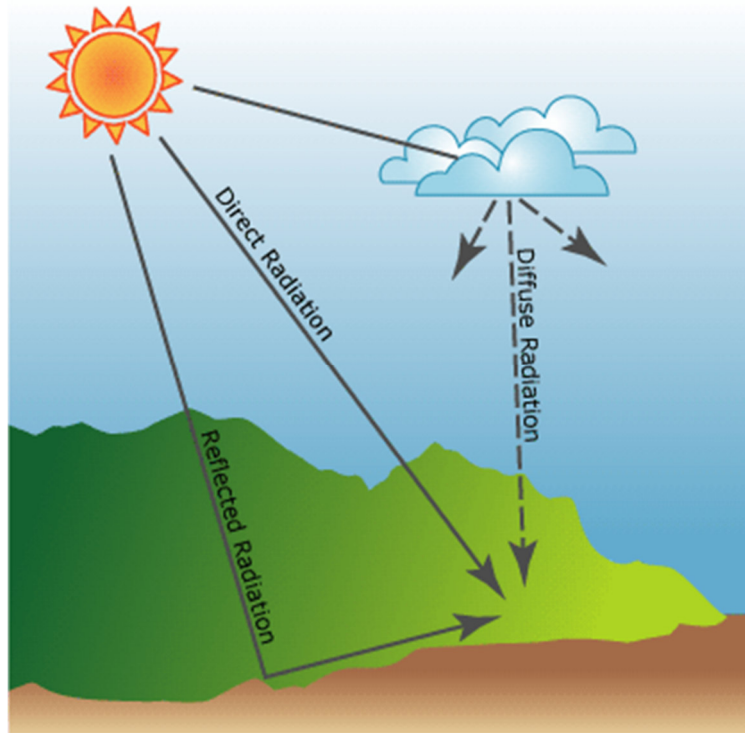


Abbildung 5: Die Komponenten der Globalstrahlung. (Quelle: ESRI o. J.a)

zur Erde beträgt dabei zwischen $147 \cdot 10^6$ km (minimale Entfernung) und $152 \cdot 10^6$ km (maximale Entfernung) (Roedel und Wagner 2017). Die Jahreszeiten werden durch die sogenannte Schiefe der Ekliptik verursacht, d. h. die Neigung der Erdachse gegenüber der Bahnebene. Die Neigung beträgt $23,5^\circ$, wodurch im Nordsommer die nördliche Hemisphäre der Sonne zugewandt ist und stärker bestrahlt wird, während im Nordwinter die südliche Hemisphäre stärker bestrahlt wird. Die unterschiedlich starke Einstrahlung wird durch die verschiedenen Einfallswinkel der Sonnenstrahlen verursacht (ebd.). Die Sonne steht also in den verschiedenen Jahreszeiten unterschiedlich hoch über dem Horizont, was sich auch auf den Schattenwurf auswirkt.

Neben den jahreszeitlichen bzw. saisonalen Schwankungen, ist die Sonnenstrahlung auch tageszeitlichen Änderungen unterworfen. Die Tageslänge variiert dabei je nach geographischer Breite und Jahreszeit (siehe Abb. 6). Wie in Abbildung 6 dargestellt, unterscheidet sich Dauer des Tages in höheren Breiten je nach Jahreszeit deutlich, während die Jahreszeit in den Tropen und Subtropen die Tageslänge kaum beeinflusst. Am deutlichsten ist der Kontrast zwischen Sommer und Winter in der Nähe der Pole, also in der Arktis und der Antarktis (Roedel und Wagner 2017).

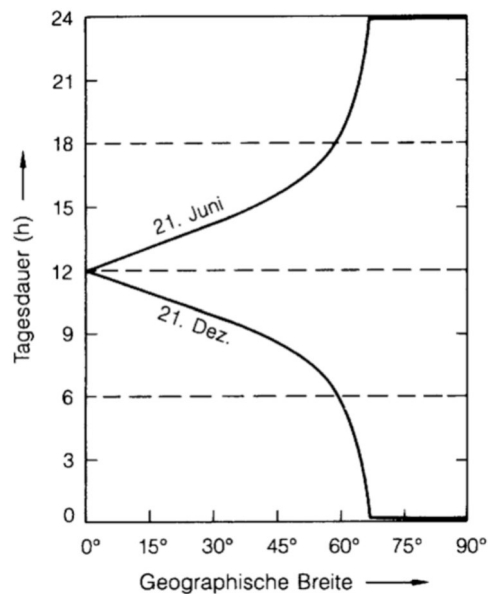


Abbildung 6: Länge des Tages abhängig von der geographischen Breite. Die obere Kurve zeigt die Tagesdauer zur nördlichen Sommersonnenwende, die untere Kurve die Tagesdauer zur nördlichen Wintersonnenwende (Quelle: Roedel und Wagner 2017, S. 4)

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass die Sonneneinstrahlung auf globaler Ebene abhängig ist vom Breitengrad und durch die Geometrie bzw. die Rotation der Erde um die Sonne beeinflusst wird. Sie ist dabei auch das Ergebnis des komplexen Zusammenspiels zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche. Auf regionaler bzw. lokaler Ebene ist der ausschlaggebende Einflussfaktor das Relief des Geländes. Dabei spielen insbesondere die variierende Höhe, die Neigung und Ausrichtung der Oberfläche und die darauf befindlichen Objekte sowie der damit einhergehende Schattenwurf eine entscheidende Rolle (Hofierka und Suri 2002).

Mit der Bewegung der Sonne ändern sich auch die Schattenmuster, die durch das Gelände und die natürlichen und künstlichen Objekte verursacht werden. Aber nicht nur der Sonnenstand bzw. die Sonnenspur ändert sich mit dem Lauf der Jahreszeiten, sondern auch die Vegetation verändert sich. Für den Schattenwurf ist es entscheidend, ob die Vegetation belaubt ist oder nicht. Die Vegetationsperiode dauert aktuell in Österreich im Durchschnitt 212 Tage, wobei die Länge aufgrund des Klimawandels immer mehr zunimmt (Umweltbundesamt 2023).

2.3 GIS-Tools zur Modellierung von Sonnenstrahlung und Schatten

In der Literatur findet man Sonneneinstrahlungs- und Schattenmodelle vorwiegend im Kontext von Solarenergie, wo sie zur Analyse des Solarpotenzials in städtischen Gebieten eingesetzt werden. Freitas et al. (2015) bieten einen umfassenden Überblick über verschiedene Methoden und Modelle unterschiedlicher Komplexität. Für eine akkurate Evaluierung des Solarpotenzials ist die Quantifizierung von Beschattung essenziell (ebd.).

Die Beschattung spielt jedoch nicht nur für die korrekte Erfassung des Solarpotenzials eine wichtige Rolle, sondern ist aufgrund des kühlenden Effekts auch eine wichtige Gegenmaßnahme für urbane Hitzeinseln. Yu et al. (2020) stellten in diesem Zusammenhang fest, dass Studien zu den Schatteneffekten von Bäumen vor allem für kleine Bereiche auf lokaler Ebene durchgeführt wurden und kaum Untersuchungen auf gesamtstädtischer Ebene existieren. In einigen Studien wurde die Beschattung durch Gebäude und Bäume mit dem *Sky View Faktor* (SVF) evaluiert (siehe u.a. Li und Ratti 2018, Cheung et al. 2016, Miao et al. 2020). In Miao et al. (2020, S. 1) wird dieser wie folgt definiert:

„The sky view factor (SVF) is the ratio of the visible sky area of a point in space to the total sky area. It provides the relationship between the visible sky area and covered surroundings, such as by buildings or street trees.“

Mit Hilfe des SVF (siehe dazu auch Abb. 7) wird also die Menge an Sonnenstrahlung ermittelt, die von Objekten auf der Erdoberfläche blockiert wird und damit den Boden nicht erreicht (Yu et al. 2020). Es gibt dabei verschiedene Möglichkeiten, den SVF zu bestimmen. Eine Möglichkeit sind sogenannte hemisphärische Fotos, wo mittels Fischaugenobjektiv in den Himmel gerichtete, zweidimensionale Bilder aufgenommen werden (Cheung et al. 2016). Zwar wurden mit dieser Methode auch großflächige Untersuchungen durchgeführt, jedoch ist die Schwachstelle dieser Methode, dass die Sonnenbewegung nicht berücksichtigt wird und daher die zeitlichen Veränderungen des Schattens nicht erfasst werden können (Yu et al. 2020). Der Schatten, den natürliche und vom Menschen geschaffene Objekte auf die Erdoberfläche werfen, variiert je nach Größe bzw. Höhe und Struktur der Objekte sowie aufgrund des wechselnden Sonnenstandes, so dass die Erfassung oder Quantifizierung des Schattens sowohl räumliche als auch zeitliche Schwankungen berücksichtigen muss.

Um diese dynamischen Sonneneinstrahlungs- und Beschattungseffekte zu modellieren, können nun numerische Strahlungsalgorithmen zusammen mit Geoinformationssystemen (GIS) eingesetzt werden (Freitas et al. 2015). GIS bezeichnet ein *„rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software und Daten besteht und mit dem sich raumbezogene Problemstellungen in unterschiedlichsten Anwendungsgebieten modellieren und bearbeiten lassen“* (Bill 2016, S. 8). Im Gegensatz zu anderen Modellen und Methoden, wie der Ermittlung des SVF, ermöglichen in einem GIS integrierte Sonneneinstrahlungsmodelle die Erfassung der zeitlichen und räumlichen Variabilität und können die Sonneneinstrahlung über große Gebiete vergleichsweise schnell, kostengünstig

und genau schätzen. Neben der Bewegung der Sonne werden unter anderem auch die Oberflächenneigung, die Ausrichtung und die Abschattung durch umliegende Objekte auf der Erdoberfläche berücksichtigt. Basis hierfür sind Digitale Gelände- oder Oberflächenmodelle. (Hofierka und Suri 2002, Liang et al. 2014)

Zusammengefasst sollte ein Sonneneinstrahlungsmodell also die Wechselwirkungen zwischen Sonne, Atmosphäre und Erdoberfläche berücksichtigen, wie in Kapitel 2.2 bereits dargelegt: die Position von Sonne und Erde, die Topographie, die atmosphärischen Eigenschaften sowie die Wolkenbedeckung (Hofierka und Suri 2002). Die ersten beiden Faktoren können geometrisch mit hoher Genauigkeit modelliert werden, während die Wolkenbedeckung am schwersten zu erfassen ist (Liu et al. 2012). Da der Fokus dieser Arbeit auf der Modellierung des Schattens liegt, kann letzteres jedoch als gegenstandslos betrachtet werden, da nur direkte Sonnenstrahlung berücksichtigt wird und von klaren bzw. wolkenlosen Bedingungen ausgegangen wird. Des Weiteren ist die diffuse Strahlung für die Bestimmung des Solarpotenzials zwar essenziell, spielt bei der Modellierung von Schatten aber eine untergeordnete Rolle, da sie keinen Schatten wirft.

Zu den zwei am weitesten verbreiteten GIS-Sonneneinstrahlungsmodelle gehören das *Solar Radiation* Modul in ArcGIS von ESRI nach Fu und Rich (2000, 2002) und das Modul *r.sun* in GRASS GIS nach Hofierka und Suri (2002). Die beiden Modelle basieren auf zwei unterschiedlichen Ansätzen. Das Modul *r.sun* arbeitet nach der sonnenbasierten Methode, die die Beschattung ausgehend vom gegebenen Sonnenstand zu jedem in der Berechnung berücksichtigten Zeitpunkt für alle Punkte überprüft (Liu et al. 2012). Dabei wird für die Höhe eines jeden Bodenpunktes auf der projizierten Sonnenpunktlinie überprüft, ob dieser die Sonnenstrahlung blockiert oder nicht (ebd.). Im Gegensatz dazu beruht das *Solar Radiation* Paket von ArcGIS auf dem bodengestützten Ansatz. Das Prinzip ist vergleichbar mit dem oben erläuterten SVF. Für jeden Punkt wird ein nach oben gerichtetes, hemisphärisches Sichtfeld berechnet (*Viewshed*). Die Methode ist hinsichtlich der Rechenzeit effizienter, da die Sichtfelder nur einmal berechnet werden müssen und im Anschluss für jeden Zeitpunkt lediglich überprüft wird, ob sich die Sonne innerhalb des sichtbaren Bereichs befindet (Liu et al. 2012).

Eine Evaluierung der beiden GIS-Strahlungsmodelle *Solar Radiation* und *r.sun* ist nicht Ziel der Arbeit und wird daher nicht durchgeführt. Aufgrund des großen Gebietes und damit einhergehender langen Rechenzeiten wird die Schattenanalyse mit dem rechnerisch effizienteren *Solar Radiation* Paket von ArcGIS Pro (ESRI o. J.a) durchgeführt. Im Folgenden soll daher kurz auf die grundlegende Funktionsweise des Pakets eingegangen werden.

Die Basis für das *Solar Radiation* Tool ist im Anwendungsfall dieser Arbeit ein Digitales Oberflächenmodell, da neben der Topografie auch die Objekte auf der Erdoberfläche wesentlich für die Modellierung von Sonneneinstrahlung und Schatten sind. In Abb. 7 ist das Prinzip des Berechnungsvorgangs für ein hemisphärisches Sichtfeld veranschaulicht, welches für jede Position bzw. für jede Rasterzelle des DOMs ermittelt wird. Ein solches Sichtfeld ähnelt einem hemisphärischen Foto, das die Sicht vom Boden nach oben in alle Richtungen blickend abbildet (siehe Abb. 7a). Zur Berechnung des hemisphärischen

Sichtfeldes werden die Horizontalwinkel von einer bestimmten Position aus für eine definierte Anzahl an Richtungen ermittelt (Abb. 7b). Es wird also für jede Richtung der maximale Winkel bis zur Begrenzung des Himmels bestimmt, an der die Topografie oder Oberflächen-Features den Blick auf den Himmel verdecken. Im nächsten Schritt folgt die Konvertierung der Horizontalwinkel in ein hemisphärisches Koordinatensystem und die Darstellung als zweidimensionales Raster-Bild, welches den „gesamten sichtbaren oder verdeckten Himmelsausschnitt von einer bestimmten Position aus“ zeigt (ESRI o. J.a). Abbildung 7c zeigt ein Beispiel für ein hemisphärisches Sichtfeld als Raster, wobei die nicht sichtbaren Bereiche des Himmels grau dargestellt sind.

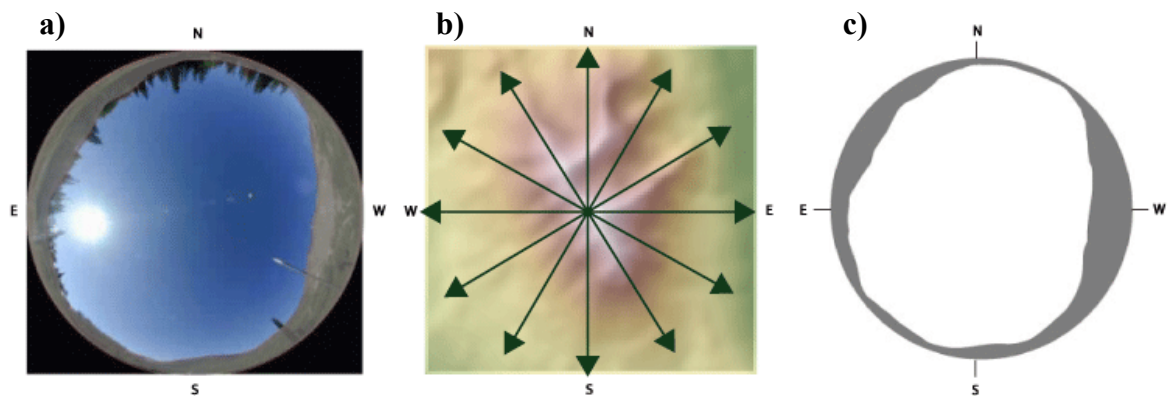


Abbildung 7: a) Beispiel für ein hemisphärisches Foto (Fischaugeneffekt) b) Abbildung der Horizontalwinkel für eine bestimmte Anzahl an Richtungen c) Rasterbild des Sichtfeldes (Quelle: ESRI o. J.)

Im nächsten Schritt wird eine Sonnenkarte erstellt und die direkte Sonneneinstrahlung berechnet. Auch die Sonnenkarte ist eine Raster-Darstellung und liegt in derselben hemisphärischen Projektion vor wie das Sichtfeld. Dabei wird die Bewegung bzw. die Position der Sonne im Lauf des Tages bzw. im Lauf des Jahres je nach Breitengrad des Untersuchungsgebietes und nach eingestellter Zeitkonfiguration ermittelt (ESRI o. J.a). Zuletzt wird die Sonnenkarte mit dem Sichtfeld überlagert, wie in Abb. 8 dargestellt. Befindet sich die Sonnenspur zu einer bestimmten Tages- und Jahreszeit im grauen Bereich, so ist die Sicht zum Himmel bzw. zur Sonne vom ursprünglichen Punkt aus verdeckt, dementsprechend liegt der Punkt bzw. die Rasterzelle des DOM im Schatten.

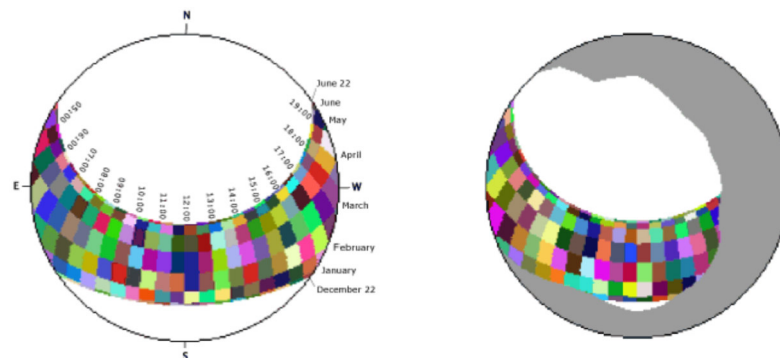


Abbildung 8: Beispiel für eine Sonnenkarte (links) und deren Überlagerung mit einem Sichtfeld (rechts) (Quelle: ESRI o. J.)

Um die gesamte Sonneneinstrahlung für einen bestimmten Punkt zu erfassen, wird auch die diffuse Sonnenstrahlung benötigt, welche in einer Himmelskarte ähnlich der Sonnenkarte ermittelt wird und ebenfalls mit dem Sichtfeld überlagert wird. Das Ergebnis der Analyse ist dann eine Solar Map als Raster, welche „die globale Strahlung oder die Gesamtmenge der Sonneneinstrahlung (direkt + diffus) darstellt, die für jede Position der Eingabe-Oberfläche berechnet wird“ (ESRI o. J.a). Die Einheit dabei sind Wattstunden pro Quadratmeter (WH/m^2).

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass das *Solar Radiation Tool* zur Ermittlung der Strahlungsenergie und nicht primär für eine Schattenanalyse konzipiert ist. Beschattete Gebiete können daraus aber abgeleitet werden, indem alle Rasterzellen extrahiert werden, deren direkte Sonneneinstrahlung gleich 0 WH/m^2 beträgt. Wichtig ist dabei, dass die direkte Strahlung getrennt betrachtet wird und die diffuse Strahlung, die keinen Schatten wirft, nicht mit einbezogen wird. Es gibt zwar Tools und Module, die den Schattenwurf direkt modellieren, so wie beispielsweise das Tool Sonnenschattenvolumen in ArcGIS Pro, das jedoch keine Raster DOMs, sondern Multipatch Features als Eingangsdaten verlangt und geschlossene Schattenvolumen von einzelnen Features erstellt, weshalb für diese Arbeit das *Solar Radiation Tool* verwendet wird. Klarer Vorteil des *Solar Radiation Tools* ist, dass es für weiträumige Gebiete eingesetzt werden kann. Ein Nachteil ist die Generalisierung der realen Gegebenheiten durch die Darstellung als 2,5D Oberflächenmodell, wodurch im Vergleich zu einem 3D Modell beispielsweise keine Überhänge berücksichtigt werden. Des Weiteren können im Ergebnis nur vollständig schattige und sonnige Bereiche des Untersuchungsgebietes ausgemacht werden, während teilschattige Bereiche, etwa durch Vegetation, nicht erkannt werden.

Für eine akkurate Modellierung des Schattens ist die Qualität der Eingabedaten entscheidend. Durch eine möglichst genaue Repräsentation des Geländes und der Vegetation, können Schattenflächen besser abgeschätzt werden (Freitas et al. 2015). Erreicht wird dies insbesondere durch eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung der Digitalen Oberflächenmodelle. Aufgrund der Komplexität der Berechnung muss aber stets ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeit gefunden werden (ebd.).

3 3D Datenerfassung

Dieses Kapitel ist den 3D Datenerfassungsmethoden gewidmet, welche die Grundlage für die Generierung von DOMs bilden. Zunächst soll ein genereller Überblick über die Erfassungsmethoden von Geodaten gegeben werden. Zudem wird beleuchtet, wie diese Erfassungsmethoden unterschiedlich klassifiziert bzw. systematisiert werden können. Nach diesem kurzen Überblick über alle Erfassungsmethoden sollen jene Methoden genauer unter die Lupe genommen werden, die vorrangig für die Generierung von digitalen Oberflächenmodellen herangezogen werden.

3.1 Überblick über Methoden und Definitionen

Bei Geodaten unterscheidet man grundsätzlich zwischen Primär- und Sekundärdaten, wobei die Unterscheidung nach der Art der Datenerfassung getroffen wird. *„Originäre bzw. primäre Erfassungsmethoden sind solche Methoden, die Daten direkt am Objekt oder dessen unverarbeitetem Abbild gewinnen“* (Bill 2016, S. 271). Für die Gewinnung digitaler Geodaten stellen dabei die Vermessung sowie die Fernerkundung und Photogrammetrie die bedeutendsten topographisch-geographischen Erfassungsmethoden dar. Ziel dieser geotopographischen Methoden ist dabei vor allem die bildhafte Dokumentation der Landschaft, um dreidimensionale Informationen über ihren Zustand bzw. ihrer Veränderung zu gewinnen (Jäger et al. 2020). Andere primäre Erfassungsmethoden sind beispielsweise Felderhebungen wie Biotopkartierungen oder permanente Messungen in Messnetzen wie etwa die Messung von Wasserständen (Bill 2016). Sekundärdaten werden im Gegensatz dazu durch die Erfassung und durch das Ableiten von Daten aus vorhandenen Quellen gewonnen, also beispielsweise durch Scannen oder Digitalisieren (Lange 2020). In Lange (2020) werden Metadaten neben Primär- und Sekundärdaten als weitere Kategorie angeführt. Unter Metadaten versteht man Daten, *„die beschreibende Informationen u.a. zur Mess- oder Erhebungsmethode, zum Erfassungsanlass oder zur Datenqualität enthalten können“* (ebd.).

In weiterer Folge wird lediglich auf die geotopographischen primären Erfassungsmethoden eingegangen, aus welchen sich dreidimensionale Geodaten gewinnen bzw. ableiten lassen. Direkt am Objekt werden 3D Geodaten beispielsweise mit GNSS bzw. Tachymeter erfasst. GNSS ist die Abkürzung für *Global Navigation Satellite System* und bezeichnet ein System zur satellitengestützten Positionsbestimmung und Navigation (Lange 2020). Über lange Zeit wurde dies gleichgesetzt mit dem US-amerikanischen Satellitensystem *Global Positioning System* (NAVSTAR-GPS bzw. kurz nur GPS). Heute wird GNSS als Überbegriff für verschiedene globale Satellitensysteme verstanden, wie dem russischen System GLONASS, dem chinesischen System BeiDou und das System GALILEO der Europäischen Union (ebd.) (siehe auch Kapitel 3.3).

Der Tachymeter ist ein Gerät zum Einmessen von Punkten. Dabei werden Horizontal- und Vertikalwinkel sowie die schräg gemessene Entfernung zu einem bestimmten Punkt

erfasst. Heute werden üblicherweise elektronische Tachymeter (Totalstationen) verwendet (Bill 2016).

Im Gegensatz zu GNSS und Tachymeter handelt es sich bei Methoden der Fernerkundung und Photogrammetrie um indirekte Erfassungsmethoden, da die Messung hier nicht direkt am Objekt, sondern am Abbild des Objekts erfolgt. Aufgrund der Möglichkeit der großflächigen Aufnahme stellen diese Erfassungsmethoden die Grundlage für die Erstellung von digitalen Oberflächenmodellen dar. Generell versteht man unter Fernerkundung (engl. *remote sensing*) Verfahren zur „Ermittlung von Informationen über entfernte Objekte, ohne mit ihnen in direkten Kontakt zu kommen“ (Konecny und Lehmann 2019, S. 11). Dabei werden die Informationen über die Erdoberfläche durch die Messung bzw. Auswertung der von ihr ausgehenden Energiefelder gewonnen (Bill 2016). Die Verfahren der Fernerkundung nutzen also die natürlich vorhandene oder eine künstlich erzeugte Strahlung, welche von den Objekten unterschiedlich reflektiert und von einem Sensor eingefangen wird.

Während Fernerkundung und Photogrammetrie früher oft als getrennte Gebiete betrachtet wurden, ist der Übergang heute fließend (Bill 2016). Die Photogrammetrie wird in der Literatur heute meist als Teilgebiet der Fernerkundung beschrieben. So definieren Konecny und Lehmann (2019, S. 11) Photogrammetrie als „*ein Verfahren zur Vermessung von Objekten nach Lage und Form. Dabei werden die Messungen nicht direkt am Objekt, sondern indirekt auf Bildern des Objektes vorgenommen. Die Photogrammetrie ist deshalb ein Verfahren der Fernerkundung*“. Auch nach den Definitionen der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (ISPRS) kann die Photogrammetrie als Teil der Fernerkundung verstanden werden. Sie lauten wie folgt (siehe Chen et al. 2016):

“Remote sensing is the science and technology of capturing, processing and analysing imagery, in conjunction with other physical data of the Earth and the planets, from sensors in space, in the air and on the ground.”

“Photogrammetry is the science and technology of extracting reliable three-dimensional geometric and thematic information, often over time, of objects and scenes from image and range data.”

Sowohl die Fernerkundung als auch die Photogrammetrie beschäftigt sich mit Erfassung und Auswertung von Bildern aller Art, wobei bei ersterem der Fokus auf den Prozessen auf der Erdoberfläche liegt während bei zweiterem das Augenmerk vor allem auf der geometrischen und thematischen Auswertung liegt (Heipke 2017).

Grundsätzlich wird in der Fernerkundung bzw. Photogrammetrie zwischen passiven und aktiven Sensoren unterschieden. Bei passiven Verfahren wird die natürlich vorhandene Strahlung von einem Sensor registriert, wobei hier vor allem die reflektierte Sonnenstrahlung genutzt wird (Heipke 2017). So handelt es sich bei Kameras, welche Bilder im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums aufnehmen, um passive Sensoren. Sie gelten als die älteste Fernerkundungstechnologie (Toth und Jutzi 2017). Neben der Sonnenstrahlung, welche von der Erdoberfläche reflektiert und anschließend

vom Sensor aufgenommen wird, wird auch die Thermalstrahlung von passiven Sensoren genutzt. Diese wird von den Objekten auf der Erdoberfläche direkt ausgesendet (Heipke 2017). Bei aktiven Systemen besitzt der Sensor eine eigene Strahlungsquelle. Beispiele für solche Systeme sind vor allem LiDAR (*Light Detection and Ranging*), also Laserscanning, und Radar (*Radio Detection and Ranging*), auf die in den folgenden Unterkapiteln noch näher eingegangen wird. Der Vorteil von aktiven Systemen ist, dass die Sensoren auf die zu beobachtende Zielgröße ausgerichtet werden können und so auch die Beeinflussung durch unterschiedliche Umweltbedingungen vermindert werden kann (Toth und Jutzi 2017).

Neben der Einteilung in passive und aktive Systeme kann eine Untergliederung der Fernerkundungssysteme auch nach den Trägerplattformen der Sensoren getroffen werden. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Sensoren am Boden, in der Luft und im Weltraum. Folgende Plattformen lassen sich unterscheiden (vgl. Toth und Jutzi 2017):

- Weltraum
 - Satelliten
- Luft
 - Flugzeuge
 - UAV
- Am Boden/terrestrisch
 - mobil
 - statisch

Satellitengestützte Sensoren zur Erdbeobachtung gibt es seit den 1970er Jahren, wobei hier vor allem optische Systeme und Radarsysteme genutzt werden. 1972 wurde mit dem Start von Landsat als ersten zivilen Erdbeobachtungssatelliten ein erster Meilenstein gesetzt (Heipke 2017). Laut Konecny und Lehmann (2019) ist das Flugzeug die am häufigsten verwendete Plattform für Fernerkundungssysteme, wobei die Luftbildkamera der am häufigsten angewandte Sensor ist. Generell galten Flugzeugplattformen für Industrieländer als die wichtigste Quelle für Geodaten. Seit dem Beginn der kommerziellen Fernerkundungssatelliten etwa Mitte der 2000er Jahre wird der Unterschied zwischen Satellitenbildern und Luftbildern aber immer geringer, weshalb sich hier ein Paradigmenwechsel abzeichnet (Toth und Jutzi 2017, Jäger et al. 2020). Neben Luftbildkameras wird vor allem auch LiDAR auf Flugzeugen verwendet, was auch als Airborne Laserscanning (ALS) bezeichnet wird. Das Haupteinsatzgebiet dabei ist die Erstellung von Digitalen Geländemodellen (Bill 2016).

Neben Flugzeugen haben in den letzten Jahren unbemannte Luftfahrzeuge bzw. Flugsysteme in der Fernerkundung an Bedeutung gewonnen (Toth und Jutzi 2017). In der Fachsprache spricht man von UAV (engl. *Unmanned Aerial Vehicles*) bzw. UAS (engl. *Unmanned Aerial System*) oder auch von ferngesteuerten Luftfahrzeugen, also RPAS (engl. *Remotely Piloted Aircraft System*), während umgangssprachlich der Begriff Drohne verbreitet ist. In dieser Arbeit wird in weiterer Folge die Abkürzung UAS verwendet, wenn das Gesamtsystem gemeint ist. Wird explizit auf die verschiedenen Trägerplattformen eingegangen, soll dies durch die Verwendung der Abkürzung UAV

verdeutlicht werden. Für die Anwendung in der Fernerkundung sind vor allem UAS mit bis zu 25 kg (small UAS oder sUAS) von Bedeutung. Meist werden optische Sensoren auf UAV-Plattformen verwendet (ebd.).

Auf dem Boden wird analog zum Airborne Laserscanning ein terrestrischer Laserscanner eingesetzt (TLS). Im Gegensatz zum Tachymeter, mit dem Einzelpunkte vermessen werden, werden mit dem Laserscanner Objekte flächenhaft dreidimensional abgetastet. Wird LiDAR auf einem Fahrzeug verwendet, spricht man von Mobilem Laserscanning (MLS) (Bill 2016). Generell versteht man unter *Mobile Mapping Technology* (MMT) die Erfassung von Geodaten mit der Nutzung von Fahrzeugen als Plattformen für unterschiedliche Sensoren (Toth und Jutzi 2017). Möglich wurde die Technologie mit dem Aufkommen der GNSS. Der Begriff *Mobile Mapping Technology* wird in der klassischen Terminologie vor allem für Fahrzeuge an Land und am Wasser verwendet. Inzwischen werden damit alle Plattformen einbezogen, die mit einem GNSS ausgestattet sind und digitale Sensoren nutzen, also auch flugzeuggestützte Systeme (Toth und Jutzi 2017, Bill 2016).

Zuletzt seien hier noch statische Plattformen erwähnt. Es handelt sich dabei um dauerhafte Sensorinstallationen, wie sie beispielsweise bei der Beobachtung von Gletscherrückgängen eingesetzt werden (Toth und Jutzi 2017).

Digitale Höhen- bzw. Oberflächenmodelle können mit Hilfe von verschiedenen Datenerfassungsmethoden generiert werden. Dabei werden sowohl unterschiedliche Plattformen als auch Sensoren eingesetzt. Grundsätzlich werden DOMs stereophotogrammetrisch, mittels Laserscanning oder Radarverfahren und seit dem Aufkommen von UAS auch mit der Structure from Motion Technologie gewonnen. In weiterer Folge werden nun die für diese Arbeit wesentlichen Fernerkundungssysteme zur Erstellung von DOMs näher beleuchtet.

3.2 Airborne Laserscanning (ALS)

Mit der Technologie der flugzeuggetragenen Laserscannermessung, also Airborne Laserscanning (ALS), können Höhendaten über die Erdoberfläche sehr präzise ermittelt werden. In der Fernerkundung wird die Erfassungsmethode des Laserscannings – wie bereits im vorangegangenen Kapitel erwähnt – meist als LiDAR (*Light Detection and Ranging*) bezeichnet. Es handelt sich dabei um ein aktives Fernerkundungsverfahren, welches sich die besonderen Eigenschaften von Laser (Akronym, engl. *light amplification by stimulated emission of radiation*) zu Nutze macht. Im Gegensatz zum Licht einer Glühbirne ist Laserlicht stark gebündelt und kohärent, die Wellenzüge untereinander sind also phasengleich (Kraus 2004). Die Laser Technologie ermöglicht einen stark gerichteten optischen Lichtstrahl sowie kurze und intensive Strahlpulse (Wehr und Lohr 1999).

Beim ALS erfolgt die Datenerfassung mit einem in einen Flugkörper eingebauten Scanner. Dabei werden von einem Sensor Laserimpulse ausgesandt, welche durch die Atmosphäre laufen und von den Objekten auf der Erdoberfläche reflektiert werden und schließlich als zurückkommende Impulse vom Sensor registriert werden. Gemessen wird die Zeitspanne zwischen Aussenden und Empfang des Laserstrahls, woraus dann die Entfernung vom Sensor zum Objektpunkt ermittelt wird (Pfeifer et al. 2017). Das Ergebnis der Messung sind dreidimensionale polare Koordinaten der Reflexionspunkte, die flächenhaft auf der Erdoberfläche verteilt sind (Bill 2016). Mit dem Laserscanner werden also Objektoberflächen abgetastet, wodurch eine sogenannte Punktwolke erzeugt wird (Kraus 2004, Pfeifer et al. 2017). Im Gegensatz zu einer qualifizierten Geländeaufnahme, bei der markante Geländeformen wie beispielsweise Bruchkanten gezielt aufgenommen werden, handelt es sich bei ALS um eine unqualifizierte bzw. zufällige Geländeaufnahme. Das Gelände kann dabei aufgrund der hohen Punktdichte genau erfasst werden (Bill 2016).

Da die Vermessung mit Laserscanner eine dreidimensionale Punktwolke zum Ergebnis hat und meist die geometrische Auswertung im Vordergrund steht, kann Laserscanning der Photogrammetrie zugeordnet werden (Kraus 2004). In Pfeifer et al. (2017) wird Laserscanning auch als „*polare Photogrammetrie*“ bezeichnet.

LiDAR nutzt den kurzwelligen Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Je nach Scanner wird UV-Strahlung, sichtbares Licht sowie nahes Infrarot verwendet, wobei kommerzielle ALS Systeme für Anwendungen über Land normalerweise mit einem Wellenlängenbereich von 800 bis 1550 nm arbeiten (Bill 2016, Beraldin et al. 2011). Generell sind bei der Wahl des Wellenlängenbereichs einerseits die Sicherheit für das menschliche Auge sowie andererseits die unterschiedlichen Reflexionseigenschaften von Oberflächen zu beachten (Beraldin et al. 2011). So ist beispielsweise die Absorption von Wellenlängen nahe dem sichtbaren Bereich in Wasserkörpern sehr hoch, weshalb diese von einem Laserscanner in diesem Wellenlängenbereich kaum erfasst werden können.

Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei LiDAR um ein aktives Verfahren handelt, ist die Nutzung unabhängig von der Tageszeit. Da mit LiDAR aber im kurzwelligen Bereich gearbeitet wird, ist dieses Verfahren sehr witterungsabhängig. Zwar kann im Vergleich zu Radar mit LiDAR eine deutlich höhere Auflösung erreicht werden, jedoch ist der Einsatz auf Schönwetterlagen beschränkt (Bill 2016).

Als Flugkörper kommen sowohl Flugzeuge als auch Hubschrauber zum Einsatz. Flugzeuge haben bei einer Flughöhe ab 500 bis 1000 m eine größere Flächenleistung als Hubschrauber, die das zu scannende Gebiet auf einer Flughöhe von etwa 200 m befliegen. Bei geringerer Flughöhe kann allerdings eine höhere Auflösung erreicht werden, es können also mehr Bodenpunkte pro m² aufgenommen werden (Bill 2016). Generell wird die Messpunktdichte nicht nur durch die Flughöhe, sondern auch durch Fluggeschwindigkeit und Messsystem beeinflusst. So kann die Messpunktdichte zwischen 1 und mehr als 50 Messpunkten pro m² liegen (Ackermann et al. 2020). Grundsätzlich unterscheidet man zwischen optisch-mechanischen Abtastern und opto-elektrischen Abtastern. Bei ersterem wird nur ein Laserstrahl verwendet, der über einen rotierenden bzw. oszillierenden Spiegel senkrecht zur Flugrichtung fächerförmig abgelenkt wird. Bei

zweiterem werden mehrere Laser eingesetzt, deren Anordnung zeilenförmig und jeweils in einem bestimmten Winkel erfolgt (Bill 2016).

Entlang des Flugweges werden so Geländestreifen gescannt. Die Breite dieser Geländestreifen quer zur Flugrichtung wird als Schwadweite (engl. swath) bezeichnet und liegt bei ALS zwischen 5° und 75° (Beraldin et al. 2011) (siehe Abb. 9). Eine weitere wichtige Kenngröße ist der sogenannte Footprint, welcher in Abb. 9 stark überzeichnet dargestellt wird. Obwohl das Laserlicht stark gebündelt ist, nimmt die Breite des Laserstrahls mit der Entfernung vom Scanner zu. Die von einem Laserstrahl beleuchtete Fläche bezeichnet man als Footprint. Der Durchmesser dieser Fläche liegt „je nach Entfernung zwischen Sensor und Fläche sowie zufolge des Design des jeweiligen Laserscanners“ im Bereich von weniger als 1 cm bis über 1 m (Pfeifer et al. 2017, S. 3).

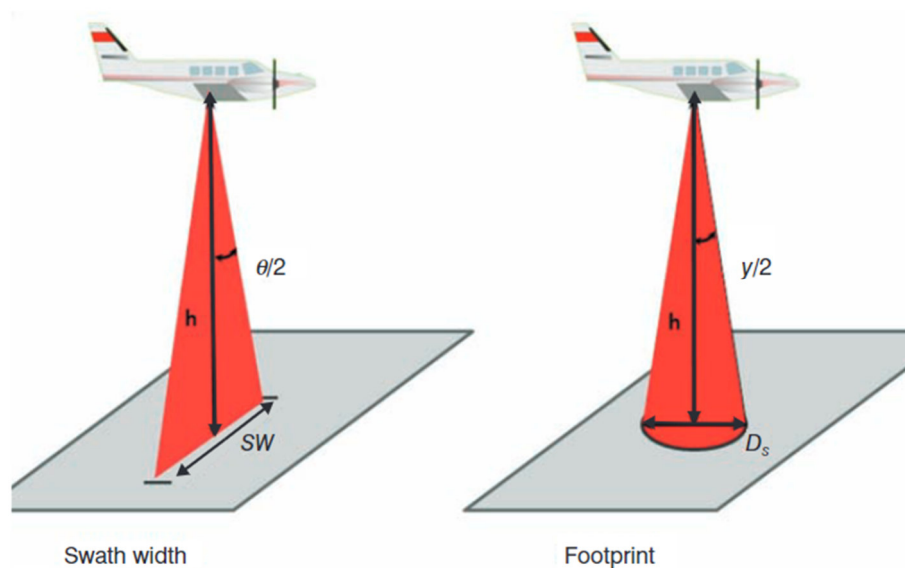


Abbildung 9: Schwadweite (engl. swath width) und Footprint (stark überzeichnet)
(Quelle: Beraldin et al. 2011, S. 25)

Mittels ALS können sowohl Digitale Oberflächen- als auch digitale Geländemodelle erzeugt werden, was einen entscheidenden Vorteil gegenüber bildbasierten Methoden darstellt (Ackermann et al. 2020). So kann der Laserstrahl beispielsweise in Waldgebiete nicht nur am Kronendach, sondern auch direkt am Boden oder in einem der Zwischenschichten auftreffen und reflektiert werden. Aufgrund des Footprints ist es auch möglich, dass ausgehend von nur einem Laserimpuls zwei oder mehrere Echos zurückgesandt werden, wenn der Laserstrahl mehr als eine Fläche gleichzeitig beleuchtet. Das kann beispielsweise an Dachkanten der Fall sein. Man spricht dabei von der sogenannten „Mehr-Ziel-Fähigkeit“ (Pfeifer et al. 2017). In diesem Zusammenhang unterscheidet man auch zwischen dem sog. *First Pulse*, dem ersten Echo, und dem *Last Pulse*, dem letzten Echo (Lange 2020). Für die Erstellung von Digitalen Geländemodellen werden die jeweils letzten Echos herangezogen. Voraussetzung dafür ist in bewachsenen bzw. bewaldeten Gebieten allerdings, dass die Baumkrone zumindest teilweise durchlässig

ist (ebd.). ALS Missionen zur Generierung von Geländemodellen werden daher im Winter durchgeführt, damit die Erfassung des *Last Pulse* am Boden nicht von Vegetation gestört wird. Laserscanning Daten, die im Winter aufgenommen wurden, werden daher als *leaf-off LiDAR* bezeichnet (Bachiller-Jareno et al. 2019). In den Sommermonaten spricht man im Gegensatz dazu von der *leaf-on* Saison (Nanda et al. 2020).

In den vergangenen Jahren wurden Sensoren entwickelt, die nicht nur diskrete Echos aufnehmen, sondern die vollständige Wellenform des zurückgesendeten Signals. So können von diesem zurückgestreuten Signal nicht nur die Laufzeit, sondern auch weitere Parameter, wie etwa die Rückstreustärke, bestimmt werden. Wird vom Sensor „die vollständige zeitabhängige Variation der erhaltenen Signalstärke“ (Lange 2020, S. 214) erfasst, spricht man vom „Full-Waveform Laserscanning“ (Pfeifer et al. 2017, S. 3). Dies ermöglicht eine noch bessere Abbildung der aufgenommenen Fläche.

Mit aktuell genutzten Systemen kann bei einer Flughöhe von ca. 1000 m eine Genauigkeit von 0,05 m horizontal und 0,1 m vertikal erreicht werden, wobei diese vor allem durch die Genauigkeit der Sensorpositionierung und -orientierung limitiert sind (Bill 2016). Da es sich bei ALS um ein dynamisches System handelt, muss die genaue Flugzeugposition und -orientierung bekannt sein, um die Entfernung zwischen Sensor und Erdoberfläche bestimmen zu können. Die sogenannte äußere Orientierung des Sensors, also Position und Winkelstellung, ändert sich dabei bei jedem ausgesandten Signal (Pfeifer et al. 2017). Diese sich laufend ändernden Werte der äußeren Orientierung werden dabei mittels GNSS und *Inertial Navigation System* (INS) bestimmt, den Methoden der direkten Geopositionierung. Auf die direkte und indirekte Geopositionierung wird im folgenden Kapitel genauer eingegangen.

Als Ergebnis einer Messung mit Laserscanner erhält man, wie bereits erwähnt, eine dreidimensionale Punktwolke, wobei in der Regel pro Quadratmeter eine Vielzahl an Punkten vorliegt. Hieraus kann in weiterer Folge dann ein repräsentativer Punkt für jede Rasterzelle berechnet werden (Bill 2016) (siehe auch Interpolationsverfahren im Kap. 2.1.3).

3.3 Direkte und indirekte Geopositionierung

Vor allem bei dynamischen Systemen ist es wichtig, den genauen Standort des Sensors zu kennen. Beinahe alle Plattformen bzw. Sensoren sind heute mit einem GNSS-Empfänger ausgestattet (Toth und Jutzi 2017). Für die Positionsbestimmung mittels GNSS wird das Signal von zumindest vier Satelliten benötigt. Diese Abdeckung von mindestens vier Satelliten kann im Wesentlichen alleine mit dem US-amerikanischen System GPS weltweit und zu jeder Zeit erreicht werden (Bill 2016). Die gleichzeitige Ermittlung der Entfernungen vom GNSS-Empfänger zu drei Navigationssatelliten ermöglicht die Bestimmung der Positionskoordinaten mittels räumlichen Bogenschnitts. Die Entfernungsmessung zu einem vierten Satelliten benötigt man, da die Synchronisierung

der Uhren des Empfängers und der Satelliten nicht genau genug ist. Es muss also noch die Zeitdifferenz des Empfängers als weitere unbekannte Größe berücksichtigt werden (Kraus 2004). Die Positionskoordinaten liegen dabei im geozentrischen Koordinatensystem WGS84 (*World Geodetic System 1984*) vor.

Um eine bessere Genauigkeit der Positionierung zu erreichen und Störeffekte durch die Atmosphäre zu verringern, kann ein differentielles GPS (dGPS) eingesetzt werden. Beim dGPS werden zwei Empfänger benötigt. Neben dem Empfänger, dessen Position ermittelt werden soll, also beispielsweise der Empfänger am Flugzeug, gibt es einen Empfänger an einer sogenannten (festen) Referenzstation, dessen Koordinaten bekannt sind. Durch die gleichzeitige Messung an beiden Empfängern können die Korrekturwerte an der Referenzstation ermittelt und so die Position des Empfängers am Flugzeug korrigiert werden (Kraus 2004). Durch die Technik des dGPS kann eine Genauigkeit im Millimeterbereich erreicht werden. Die Korrektur der Position erfolgt dabei entweder in Echtzeit (*real time*) oder durch eine nachträgliche Auswertung (im *Postprocessing*) (Bill 2016).

In vielen Staaten wird mittlerweile ein Netzwerk an permanenten Referenzstationen betrieben (Beraldin et al. 2011). In Österreich betreibt das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) den Positionierungsdienst APOS (engl. *Austrian Positioning Service*), der derzeit sowohl GPS-, GLONASS-, als auch GALILEO-Signale nutzt. Die Signale werden zentral verarbeitet und daraus Parameter zur Verbesserung der Genauigkeit von GNSS-Messungen bereitgestellt (siehe BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen o. J.a). Neben Rohdaten der fixen Stationen, welche für Korrekturen im Postprocessing verwendet werden, können auch individuelle Korrekturdaten in Echtzeit in Form von „Virtuellen Referenzstationen“ (VRS) berechnet werden. Es werden zwei Genauigkeitsklassen angeboten: APOS-RTK (*Real Time Kinematic*) mit einer Genauigkeit im Zentimeterbereich und APOS-DGPS mit Submeter-Genauigkeit.

Bei Flugkörpern als Plattformen für Fernerkundungssensoren müssen neben der exakten Position auch Abweichungen durch Bewegung und Fluglage berücksichtigt werden (Lange 2020). Der Flugkörper bewegt sich während der Datenerfassung kontinuierlich weiter und kann außerdem nicht genau senkrecht über der Geländeoberfläche gehalten werden, weshalb die GNSS-Messung allein für eine exakte Datenerfassung nicht ausreicht. Hierfür wird zusätzlich zum GNSS-Empfänger ein sogenanntes *Inertial Navigation System* (INS) verwendet (ebd.). Die Messeinheit des INS, die im Flugkörper gemeinsam mit dem GNSS-Empfänger verbaut ist, wird als *Inertial Measurement Unit* (IMU) bezeichnet. Die IMU zeichnet während des Fluges Beschleunigungsdaten und Rotationsgeschwindigkeit auf. Ersteres wird für die Interpolation der Position des Flugkörpers zwischen den GNSS-Positionsmessungen entlang der Flugbahn verwendet. Zweiteres wird genutzt, um die Orientierung der Plattform zu bestimmen (Beraldin et al. 2011). Dabei werden drei Parameter zur Orientierung ermittelt: „Drehung um die in Bewegungsrichtung verlaufende x-Achse (engl. roll, rollen), Drehung um die senkrecht zur x-Achse verlaufende y-Achse (engl. pitch, nicken) und Drehung um die senkrecht zu x-y-Ebene stehende z-Achse (engl. yaw, gieren)“ (Lange 2020, S. 213). Die Kombination aus GNSS und IMU ermöglicht somit eine exakte Rekonstruktion der Flugbahn des Sensors.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen direkter und indirekter Geopositionierung. Bei der direkten Geopositionierung wird mittels GNSS und IMU wie eben beschrieben die

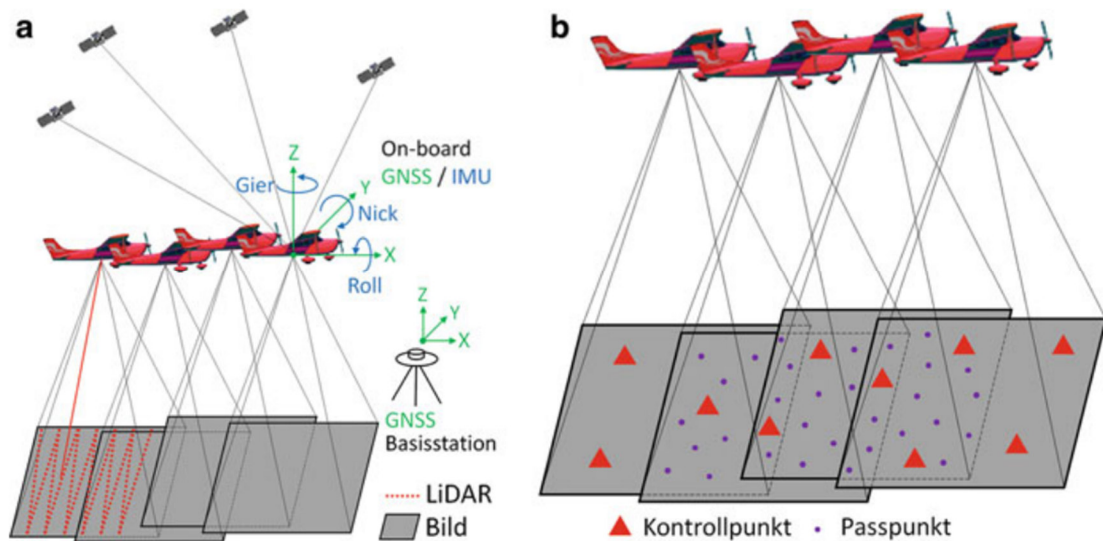


Abbildung 10: a) direkte Geopositionierung mit GNSS und IMU; b) indirekte Geopositionierung mit Passpunkten (Quelle: Toth und Jutzi 2017, S. 58)

exakte Position sowie die Rotation des Sensors, also die äußere Orientierung, bestimmt (siehe Abb. 10a). Insbesondere bei flugzeuggetragenen Systemen ist dieses Verfahren sehr genau, während bei UAV-Plattformen aufgrund der Qualität der eingesetzten Sensoren in der Regel nur eine gröbere Positionierung erreicht wird (Toth und Jutzi 2017). Hier kann die äußere Orientierung indirekt mit Hilfe von Passpunkten (engl. *ground control points*, GCPs) nachträglich, also im Postprocessing, ermittelt werden (Abb. 10b). Dafür müssen die 3D-Koordinaten von zumindest drei solcher GCPs sowie die jeweils korrespondierenden 2D Bildkoordinaten bekannt sein (Aber et al. 2019).

3.4 Luftbildphotogrammetrie

Die Luftbildphotogrammetrie beschäftigt sich mit der Aufnahme und der (dreidimensionalen) Auswertung von Luftbildern, wobei Luftbilder „*photographische Bilder eines Teils der Erdoberfläche*“ sind, „*die von Luftfahrzeugen, i. d. R. Flugzeugen mit passiven Aufnahmesystemen aufgenommen werden*“ (Bill 2016, S. 282). Der Fokus dieses Kapitels soll dabei vor allem auf der „klassischen“ Stereophotogrammetrie liegen, bei der der Luftbilder aus bemannten Flugzeugen aufgenommen werden und in weiterer Folge stereophotogrammetrisch ausgewertet werden, während sich das nächste Kapitel mit der Aufnahme von Bildern mittels UAVs und dem Structure from Motion (SfM) Verfahren befasst.

Lange Zeit erfolgten sowohl Aufnahme als auch Auswertung analog, was als analoge Photogrammetrie bezeichnet wird (Kraus 2004). Seit den 2000er Jahren erfolgte die Umstellung auf digitale Geräte und Systeme, weshalb man heute von digitaler Photogrammetrie spricht (Heipke 2017, Kraus 2004). Generell konnten in den vergangenen Jahren bedeutende technische Fortschritte erzielt werden, sowohl hinsichtlich der Qualität der digitalen Luftbilder als auch hinsichtlich der Auswertungsalgorithmen (Ackermann et al. 2020). Diese Fortschritte ermöglichen die Erstellung von hochauflösenden DOMs aus Luftbildern durch eine stereoskopische Auswertung. Die Luftbildphotogrammetrie stellt damit mittlerweile eine bedeutende Alternative zum Airborne Laserscanning dar (ebd.).

3.4.1 Grundlagen der Stereophotogrammetrie

Ziel der stereoskopischen Auswertung ist die Gewinnung von dreidimensionalen Informationen aus zweidimensionalen Luftbildpaaren. Das Prinzip ist vergleichbar mit dem menschlichen Sehen (Aber et al. 2019). Dabei nehmen Menschen mit normaler Sehkraft zwei Bilder gleichzeitig aus leicht unterschiedlichen Positionen wahr, wodurch der dreidimensionale Eindruck entsteht. Werden nicht Objekte direkt betrachtet, sondern Bilder dieser Objekte, kann stereoskopisches Sehen auch künstlich realisiert werden, vorausgesetzt die Objekte sind in den Aufnahmen aus unterschiedlichen Winkeln abgebildet. Werden die Bilder den Augen des Betrachters nun getrennt zugeführt, entsteht ein virtuelles stereoskopisches Modell des Bildmotivs, wie in Abb. 11 schematisch dargestellt ist (Aber et al. 2019). Das kann zwar theoretisch auch ohne Hilfsmittel erreicht werden, aber normalerweise werden Gegenstände bzw. Vorrichtungen wie zum Beispiel ein Spiegelstereoskop oder eine Anaglyphenbrille verwendet. Generell müssen die Bilder bei jeder stereoskopischen Analyse so orientiert sein, dass ihre relative Position zum Aufnahmezeitpunkt widerspiegelt wird (ebd.).

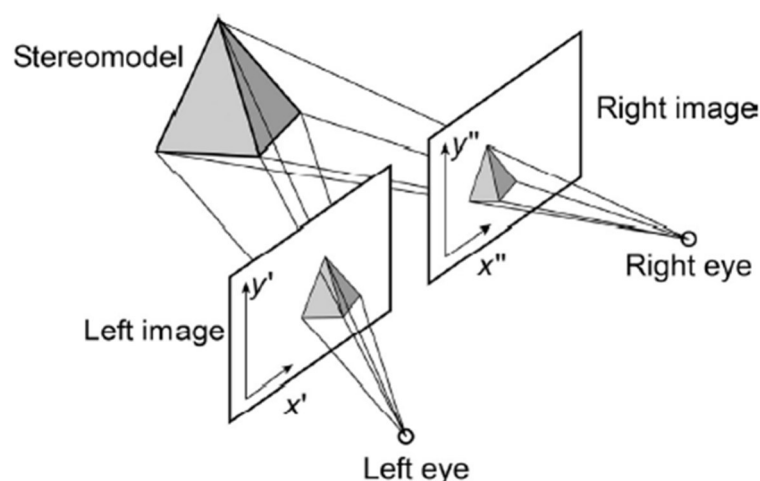


Abbildung 11: Ein dreidimensionaler Eindruck des Bildmotivs entsteht, wo sich die Sichtlinien von den Augen zu den Bildern im dahinter liegenden Raum kreuzen. (Quelle: nach Albertz 2007, zitiert aus Aber et al. 2019, S. 24)

Um die Koordinaten eines Geländepunktes ermitteln zu können, muss der Punkt in beiden Bildern des Stereo-Bildpaars sichtbar sein. Man spricht dabei von den sogenannten korrespondierenden Bildpunkten, welche heute mit dem Verfahren des Image Matching automatisiert ermittelt werden können (siehe Kapitel 3.4.3). Wie in Abbildung 12 dargestellt, werden die Koordinaten des Geländepunktes „durch die geometrische Verschneidung der Abbildungsstrahlen“ bestimmt (Ackermann et al. 2020, S. 17). „Die Summe aller auf diese Weise bestimmten Punkte bildet eine 3D-Punktwolke“ (ebd.).

Voraussetzung für die stereoskopische Auswertung der Luftbilder ist dabei die exakte Berechnung der Abbildungsstrahlen. Um die Geometrie der optischen Strahlen ermitteln zu können, müssen also sowohl die innere als auch die äußere Orientierung bekannt sein. Die innere Orientierung bezeichnet die Geometrie der Luftbildkamera und umfasst die Brennweite, die Parameter der Linsenverzerrung, die Koordinaten des Bildhauptpunktes sowie die Bildgröße (Ackermann et al. 2020). Der Bildhauptpunkt ist dabei jener Punkt, an dem die optische Achse die Bildebene schneidet und ist idealerweise ident mit dem Bildmittelpunkt (Aber et al. 2019). Der Begriff der äußeren Orientierung wurde im vorangegangenen Kapitel bereits eingeführt und beschreibt die Lage der Bildebene zum Aufnahmezeitpunkt und umfasst die 3D Positionskoordinaten X, Y und Z des Sensors sowie die Rotationsparameter (ebd.).

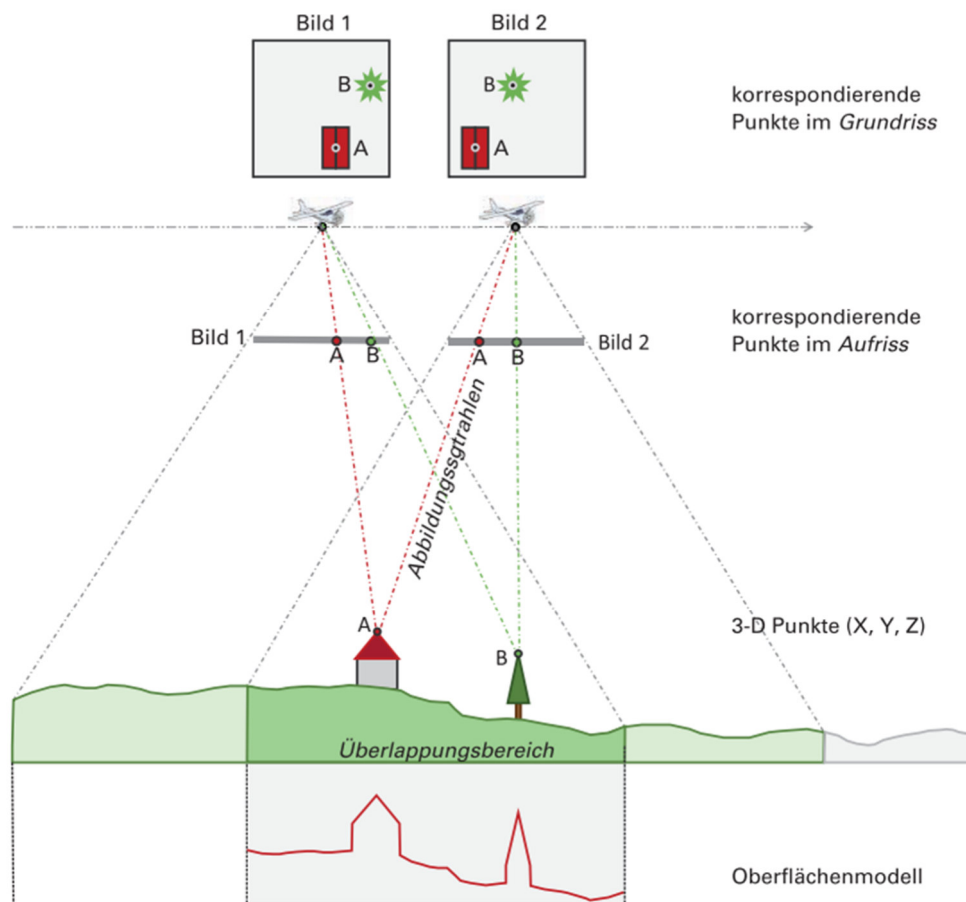


Abbildung 12: Stereoskopische Auswertung von Luftbildern (Quelle: Koukal, T.; aus Ackermann et al. 2020, S. 17)

3.4.2 Luftbildflüge

Bei einem Luftbildflug werden die Luftbilder meist durch Senkrechtaufnahmen gewonnen. Seltener werden Schrägaufnahmen für bestimmte Zwecke wie der Texturierung von dreidimensionalen Stadtmodellen genutzt (Jäger et al. 2020). Erfolgt die Aufnahme der Bilder senkrecht, wird von Nadir-Aufnahmen gesprochen, während Schrägaufnahmen als Oblique-Aufnahmen bezeichnet werden (Aber et al. 2019).

Ein Luftbildflug erfolgt systematisch in Blöcken, welche jeweils aus mehreren Fluglinien bestehen. Die Flüge werden dabei so geplant, dass eine vollständige Abdeckung des Gebietes erreicht wird. Da für die stereoskopische Auswertung vorausgesetzt wird, dass jeder Geländepunkt auf mindestens zwei Bildern sichtbar ist, müssen sich die Aufnahmen innerhalb eines Streifens dabei um mindestens 50 % überlappen (Kraus 2004). Dies ist die sogenannte Längsüberdeckung, die in der Regel aber zumindest 60 % beträgt um Lücken zu vermeiden (Konecny und Lehmann 2019). Bei zwei aneinandergrenzenden Fluglinien reicht nach Konecny und Lehmann (2019) eine Überlappung der Aufnahmen von 20 % (die Querüberdeckung). Nach Ackermann et al. (2020) sind jedoch mindestens 40 % Querüberlappung für eine erfolgreiche Auswertung mit zufriedenstellenden Ergebnissen erforderlich. Generell kann insbesondere in gebirgigen Regionen eine höhere Längs- und Querüberlappung notwendig sein (Aber et al. 2019).

Neben einer ausreichenden Überlappung müssen bei einem Luftbildflug auch noch einige andere Faktoren berücksichtigt werden. So spielen insbesondere der Aufnahmezeitpunkt sowie die atmosphärischen Bedingungen am Flugtag eine entscheidende Rolle. Während ALS Befliegungen meist in den Wintermonaten stattfinden, damit der Geländeboden mit dem Laser aufgenommen werden kann, ohne durch Vegetation gestört zu werden, werden die Luftbildflüge je nach Aufgabenstellung häufig in der belaubten Phase im Sommer durchgeführt. Dies ist vor allem auch für die Erstellung von DOMs entscheidend, da fehlende Belaubung *„zur Generierung von Höhenpunkten auf der Geländeoberfläche und im Innenbereich der Baumkronen führen kann“* (Ackermann et al. 2020, S. 12). Generell soll auf einen möglichst hohen Sonnenstand geachtet werden, um den Einfluss von Schattenwurf zu verringern (ebd.). Der Sonnenstand über dem Horizont sollte dabei bei mindestens 30° liegen (Jäger et al. 2020). Die Flüge sollten idealerweise bei Sonnenschein bzw. bei klarer Sicht erfolgen, da sich ändernde Beleuchtungsverhältnisse wie beispielsweise durch Wolken oder Nebel die Qualität der Aufnahmen verringern. Des Weiteren gilt darauf zu achten, dass zum Zeitpunkt der Befliegung auf dem zu befliegenden Gebiet kein Schnee liegt und kein Hochwasser vorherrscht. Auch kann bodennaher Wind die Aufnahmequalität beeinflussen. Der Wind verursacht eine Bewegung der Vegetation, was sich einerseits in einer Bewegungsunschärfe der Objekte äußert und andererseits dazu führt, dass die Oberflächen der Vegetation in den Luftbildpaaren unterschiedlich abgebildet werden. Beides wirkt sich in weiterer Folge negativ auf die Qualität der abgeleiteten Oberflächenmodelle aus. (Jäger et al. 2020, Ackermann et al. 2020)

3.4.3 Bündelblockausgleich und Image Matching

In der Praxis wird normalerweise nicht nur ein Stereo-Bildpaar ausgewertet, sondern die Auswertung einer Vielzahl solcher Bildpaare ist notwendig, um größere Gebiete abzudecken. Zunächst muss jedes Stereo-Bildpaar orientiert werden. Dabei bilden die geometrische Beziehung der Bilder zueinander (relative Orientierung) und die Orientierung im Koordinatensystem des Objektraumes (absolute Orientierung) die Grundlage für die Auswertung. Damit nicht jedes Bildpaar für sich orientiert werden muss, kann dies mit Hilfe der Aerotriangulation für viele Bilder gleichzeitig erfolgen. Bei dieser Methode bilden viele sich überlappende Bilder einen sogenannten Block, der dann simultan orientiert wird. Die äußere Orientierung wird also in einem Schritt für den gesamten Block ermittelt. Das am häufigsten eingesetzte Verfahren der Aerotriangulation ist das Verfahren des Bündelblockausgleichs (Aber et al. 2019). Dabei werden die Bilder zunächst mittels sogenannter Verknüpfungspunkte (engl. *tie points*) miteinander verknüpft bzw. relativ orientiert. Es handelt sich dabei um Punkte, deren Bodenkoordinaten nicht bekannt sind, welche aber auf mindestens zwei Bildern zu sehen sind. Die Verknüpfungspunkte werden heute in der digitalen Photogrammetrie automatisch mittels Image-Matching-Verfahren, also der digitalen Bildzuordnung, ermittelt. Dabei wird die Übereinstimmung zwei oder mehrerer Bilder statistisch bestimmt, um solche homologen Punkte, also Verknüpfungspunkte, zu identifizieren und deren Bildkoordinaten zu bestimmen (ebd.). Sind die Bilder zueinander orientiert und bilden einen Bildblock, reichen theoretisch drei Passpunkte aus, um eben diesen Block auch absolut zu orientieren (Aber et al. 2019). Die Koordinaten der Passpunkte können dabei unter anderem von den Vermessungsämtern bezogen werden.

Theoretisch kann die Aerotriangulation für die Bildorientierung in manchen Anwendungsgebieten auch wegfallen, wenn die Parameter der äußeren Orientierung aller Bilder durch die direkte Geopositionierung aus GNSS und INS eine ausreichende Genauigkeit aufweisen. Für Image-Matching-Verfahren ist diese aber im Normalfall nicht ausreichend (Jäger et al. 2020). Die Sensordaten werden aber dennoch als Stützung des Verfahrens bzw. zur Kontrolle herangezogen. Als Eingangsparameter für den Bündelblockausgleich dienen also die Werte der inneren Orientierung, die Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte, die Bild- und Objektkoordinaten der Passpunkte sowie ggf. die Daten der direkten Geopositionierung (ebd.).

In diesem Prozess werden dann die 3D-Koordinaten der Verknüpfungspunkte ermittelt. Das Ergebnis ist eine 3D-Punktwolke, woraus ein DOM abgeleitet werden kann. Die Auflösung des DOMs, die dadurch erreicht werden konnte, war allerdings bis vor einigen Jahren vergleichsweise gering. Mit dem Aufkommen hochaufgelöster Satellitenbilder und UAVs verbesserten sich auch die Algorithmen. So können heute die zuvor „dünnen“ Punktwolken (engl. *sparse point cloud*) mit Algorithmen für den Pixel-weisen Abgleich verdichtet werden (engl. *dense point cloud*) (vgl. Kapitel 3.5.3 zu *Structure from Motion*). Aktuell wird vor allem das *Semi-Global Matching* (SGM) nach Hirschmüller (2008) angewandt. Ein Softwarepaket für klassische Photogrammetrie ist beispielsweise *IMAGINE Photogrammetry* (ehemals *Leica Photogrammetry Suite*).

3.5 UAS-SFM

In den letzten beiden Jahrzehnten gab es eine deutliche Zunahme in der Verbreitung und im Einsatz von *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs) (Aber et al. 2019). In diesem Kapitel soll daher nun auf die Datenerfassung mittels optischen Kamerasensoren auf solchen UAV-Plattformen eingegangen werden. Ein *Unmanned Aerial System* (UAS) bezeichnet dabei nicht nur die Trägerplattform, sondern auch die darauf befindliche On-Board-Sensorik, die Aufnahmesensoren, also die Nutzlast, sowie die Bodenstation, von der aus der Flug durchgeführt und überwacht wird (Bill 2016). Der Schwerpunkt in diesem Kapitel liegt dabei auf der kleinformatigen Luftbildphotographie (engl. *small-format aerial photography*, SFAP; vgl. Aber et al. 2019).

Zunächst soll nun auf die verschiedenen UAV-Modelle sowie auf die Spezifika bei der Befliegung eingegangen werden. In einem weiteren Abschnitt wird dann die *Structure from Motion* (SfM) Technik näher beleuchtet, mit welcher aus den aufgenommenen Bildern die dreidimensionale Oberfläche konstruiert wird und schließlich Orthofotos und Oberflächenmodelle erstellt werden können.

3.5.1 UAV-Plattformen und Aufnahmesensoren

Die Technologie der UAVs hat sich ursprünglich aus der Branche der ferngesteuerten Modellflugzeuge entwickelt und wurde außerdem für die militärische Aufklärung genutzt (Toth und Jutzi 2017). In der Fernerkundung werden UAVs dagegen erst seit wenigen Jahren genutzt. Zum Einsatz kommen dafür meist kleine UAVs (engl. *small UAS*, sUAS), deren Gesamtgewicht nicht mehr als 25 kg beträgt (ebd., S. 42). Grundsätzlich umfasst der Term *unmanned aerial vehicle* aber eine Vielzahl von Plattformen, die sich unter anderem hinsichtlich Aerodynamik, Größe, Gewicht und möglicher Flughöhe unterscheiden (Aber et al. 2019).

In der Literatur werden folgende Typen an Plattformen (siehe Abb. 13) unterschieden, welche hauptsächlich zur Anwendung kommen (vgl. Aber et al. 2019, Carrivick et al. 2016):

- Starrflügler mit Eigenantrieb (engl. *self-propelled fixed-wing aircraft*)
- Helikopter (Einrotor- oder Doppelrotorsystem)
- Multirotor-UAV oder Multikopter

Starrflügler-UAVs mit Eigenantrieb halten sich wie bemannte Flugzeuge durch die Vorwärtsbewegung in der Luft. Angetrieben werden sie dabei von einem Propeller. UAVs dieses Typs können daher nicht in der Luft schweben. Ihre Energieeffizienz ermöglicht dafür eine relativ lange Flugzeit wodurch mit einem einzigen Flug größere Gebiete bis zu mehreren hundert Hektar abgedeckt werden können. Ein Nachteil ist, dass Starrflügler meist vergleichsweise groß sind und daher eine Start- bzw. Landebahn benötigen. (Aber et al. 2019, Carrivick et al. 2016)

Im Gegensatz zu den Starrflüglern können Heli- und Multikopter in der Luft schweben. Start und Landung erfolgen vertikal, weshalb keine Landebahn nötig ist und UAVs dieser Kategorie in nahezu jedem Terrain genutzt werden können. Einrotor- oder Doppelrotorsysteme sind energieeffizienter als Multirotor-UAVs, sind dafür aber unter windigen Bedingungen weniger stabil in der Luft. (ebd.)

Multikopter gibt es in verschiedenen Ausführungen mit vier (Quadcopter), sechs (Hexacopter) oder acht (Octocopter) Rotoren (Aber et al. 2019). Die Vorteile der Multikopter sind neben der Stabilität in der Luft auch eine hohe Flexibilität und eine einfache Bedienung. Sie gelten daher auch als am häufigsten verwendete Plattform zur Erfassung von Bildern für SfM (Carrivick et al. 2016). Multirotor-UAVs benötigen allerdings deutlich mehr Energie als Starrflügler um sich entgegen der Schwerkraft in der Luft zu halten. Aufgrund der begrenzten Akkulaufzeit von ca. 20 Minuten und der normalerweise geringeren Geschwindigkeit können daher auch keine so großen Gebiete abgedeckt werden (Aber et al. 2019, Carrivick et al. 2016).

Aufgrund der Eigenschaften der verschiedenen Systeme, unterscheidet sich auch die Flugplanung deutlich. Während Rotorsysteme sehr flexibel sind und „nahezu jede Trajektorie fliegen können“, ist die Flugplanung bei Starrflügler-UAVs sehr ähnlich zu der für bemannte Flugzeuge (Toth und Jutzi 2017, S. 43).

Neben den genannten gibt es noch hybride Systeme, welche die Vorteile von Starrflüglern und Rotorsystemen vereinen (Aber et al. 2019). Diese UAVs sind so konstruiert, dass sie durch Flügel in der Luft gehalten werden, aber zusätzliche Rotoren das vertikale Starten und Landen ermöglichen (engl. *Vertical Take-Off and Landing*, VTOL). In Carrivick et al. (2016) werden als weitere Kategorie außerdem noch Luftschiffe genannt, welche aber wegen ihrer hohen Kosten nur selten zum Einsatz kommen.

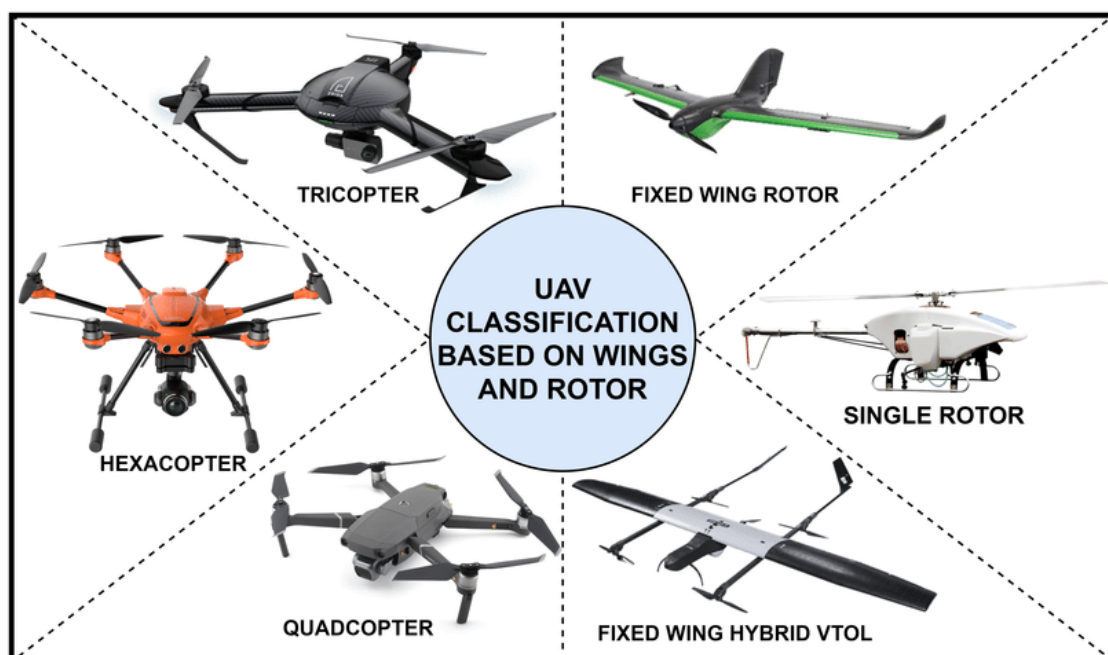


Abbildung 13: Übersicht über verschiedene UAV-Plattform-Typen (Quelle: Chamola et al. 2021, S. 3)

Im Gegensatz zu den teuren großformatigen digitalen Kameras, welche in der „klassischen“ Photogrammetrie in (bemannten) Flugzeugen verwendet werden, kommen bei sUAS aufgrund der geringen Traglast meist „Klein- oder Kleinstbildkameras“ zum Einsatz (Ackermann et al. 2020, S. 50). Die Vorteile sind neben der vielfältigen Verfügbarkeit auch die geringen Kosten und das geringe Gewicht (Toth und Jutzi 2017). Trotz starker Verbesserung der eingesetzten Aufnahmesensoren in den vergangenen Jahren sind diese jedoch nicht mit der Qualität Großbildkameras zu vergleichen (Ackermann et al. 2020). Aufgrund der geringeren Flughöhe kann aber dennoch eine hohe räumliche Auflösung erreicht werden, was das Ableiten von dichten Punktwolken und in weiterer Folge die „Erstellung detaillierter Oberflächenmodelle“ ermöglicht (Toth und Jutzi 2017, S. 43).

Aktuell kommen in Fernerkundung mit UAVs zwar überwiegend optische Kameras zum Einsatz, es werden aber auch Hyperspektral- und Thermalkameras verwendet (Ackermann et al. 2020). Mittlerweile gibt es außerdem UAV-Lösungen für LiDAR-Sensoren. Aufgrund des wachsenden Marktpotenzials in diesem Bereich entwickeln verschiedene Anbieter inzwischen für UAVs geeignete Versionen ihrer Sensorsysteme (Toth und Jutzi 2017).

Eine repräsentative Übersicht über gegenwärtig in der Fernerkundung eingesetzte UAS mit unterschiedlichen Größen und Sensoren bieten Toth und Jutzi (2017, S. 44).

3.5.2 UAS-Befliegung

Im Gegensatz zur traditionellen Luftbildphotogrammetrie und ALS wo in einer Höhe von über 800 m geflogen wird, ist die Flughöhe mit maximal 300 m bei UAS Befliegungen deutlich niedriger (Sefercik et al. 2019). Mit UAS wird dementsprechend im unüberwachten Luftraum geflogen (Ackermann et al. 2020). Dabei ist die Flughöhe ebenso wie die Flugdauer neben der verfügbaren Energie eines UAS auch durch rechtliche Bestimmungen eingeschränkt. Die meisten Ländern erlauben Flughöhen bis etwa 150 m bei einem Betrieb in Sichtweite (Toth und Jutzi 2017). Für Österreich unterlag die Gesetzgebung zum Betrieb von UAS in den letzten Jahren einigen Veränderungen. So hat die Europäische Kommission im Mai 2019 die Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 erlassen, wodurch die nationalen Regelungen zu unbemannten Luftfahrzeugen in der EU vereinheitlicht werden. In der offenen Kategorie („Open“) sind dabei UAVs mit einem Gewicht von unter 25 kg erlaubt und dürfen in maximal 120 m Höhe betrieben werden. Es muss während des gesamten Flugs eine direkte Sichtlinie zum UAV bestehen (engl. *visual line of sight*, VLOS). Zudem ist das Überfliegen von Menschenansammlung prinzipiell nicht erlaubt (Austro Control o. J.). Aufgrund des zunehmenden Einsatzes der UAS-Technologie spielt die Sicherheit für Nutzer:innen und Öffentlichkeit eine immer größer werdende Rolle (Toth und Jutzi 2017).

Die Flugplanung erfolgt auf Grundlage des zu vermessenden Projekts. Je nach Qualitätsanforderungen und Größe des Untersuchungsgebiets werden die Bildflugdaten festgelegt. Dazu zählen „Flughöhe, Streifenanzahl, Überlappung, Auflösung etc.“ (Bill

2016, S. 285). Die Flugmission mit einem UAS wird in der Regel vorab geplant und folgt dann automatisch den festgelegten Flugbahnen bzw. Trajektorien, wobei die Bildaufnahme an vordefinierten Punkten, also Points-of-Interest (POIs), oder in einem bestimmten Zeitintervall erfolgt (ebd.). Die Navigation erfolgt dabei mittels GNSS und IMU. Im Gegensatz zu ALS oder auch traditioneller Luftbildphotogrammetrie sind die am UAV verbauten Sensoren jedoch meist relativ ungenau, weshalb mit den Sensordaten nur eine grobe Geopositionierung möglich ist (Toth und Jutzi 2017). Mit dem Einsatz von RTK-Techniken kann die Genauigkeit bedeutend erhöht werden, jedoch ist das System dann teurer und schwerer (Remondino et al. 2011). Meist erfolgt über vorab eingemessene Passpunkte eine indirekte Geopositionierung.

Grundsätzlich können durch die im Vergleich zu bemannten Missionen geringe Flughöhe hochaufgelöste Luftbilder erstellt werden. Durch die Beschränkungen in der Betriebsdauer von UAS sowie rechtlichen Bestimmungen lassen sich dafür aber nur kleine Gebiete abdecken (Toth und Jutzi 2017). Dennoch können UAS nach Bill (2016, S. 82) „*die große Lücke zwischen der terrestrischen und der flugzeug- und satellitengetragenen Geodatenerfassung für viele Anwendungen schließen, bei denen für eine überschaubare Flächenausdehnung des aufzunehmenden Gebiets sowohl eine große Bodenauflösung als auch eine hohe Aktualität von Bedeutung ist*“.

3.5.3 Structure from Motion (SfM)

Wie bereits im vorigen Kapitel erläutert, können auf Basis von sich überlappenden, digitalen Bildern dreidimensionale Modelle erstellt werden. Seit den 1980er Jahren hat sich die Technik *Structure from Motion* (SfM) entwickelt, um ein 3D-Punktwolkenmodell des fotografierten Objekts bzw. der aufgenommenen Oberfläche zu generieren. SfM basiert damit auf den gleichen Grundprinzipien wie die stereoskopische Photogrammetrie (Westoby et al. 2012).

Carrivick et al. (2016, S. 37) beschreiben SfM wie folgt:

“Structure from Motion (SfM) as applied in the geosciences is not so much a single technique as a workflow employing multiple algorithms developed from three-dimensional (3D) computer vision, traditional photogrammetry, and more conventional survey techniques. Only one of these steps is technically ‘SfM’ as defined in the computer vision literature. In full, the workflow is commonly known as SfM-MVS, to account for the Multi-View Stereo (MVS) algorithms used in the final stages.”

Während es also in der Literatur üblich ist, den gesamten Arbeitsablauf mit *Structure from Motion* zu beschreiben, ist damit genau genommen nur ein Teil des Arbeitsablaufes gemeint (vgl. Abb. 14). Der SfM Ansatz hat seine Ursprünge in der Wissenschaft der Computer Vision und war deshalb auch nicht auf die Luftbildphotogrammetrie ausgelegt. SfM ist daher auch streng genommen keine Weiterentwicklung der digitalen Photogrammetrie, sondern verbindet vielmehr photogrammetrische Prinzipien mit Entwicklungen im Bereich der 3D Computer Vision (Carrivick et al. 2016). Mit der

Verbreitung der Digitalkameras Anfang der 2000er Jahre und später der starken Zunahme im Einsatz von Drohnen, also UAVs, wurde kleinformatige Luftbildphotographie immer beliebter, um hochauflösende topografische Daten zu generieren. Damit erfolgte auch die Verbreitung von SfM für geowissenschaftliche Zwecke (Aber et al. 2019). Heute gängige SfM-Softwarepakete enthalten daher Konzepte, Werkzeuge sowie statistische Auswertungen, die auch in der klassischen Luftbildphotogrammetrie üblich sind (ebd.). Diese Softwarepakete ermöglichen die photogrammetrische Verarbeitung von UAS-Aufnahmen, um hochauflösende Orthofotos und digitale Oberflächenmodelle zu erstellen. Eine Übersicht über kommerzielle Softwarepakete und Open-Source-Software bieten Carrivick et al. (2016, S. 80ff).

In der traditionellen Photogrammetrie werden Erhebungen so durchgeführt, dass die genaue Kameraposition und eine exakte Kamerakalibrierung jederzeit bekannt sind und die Fluglinien die Aufnahme von nahe parallelen Stereobildpaaren ermöglichen, die eine Längsüberlappung von 60% aufweisen (siehe voriges Kapitel). Dagegen sind photogrammetrische Ansätze auf Basis von SfM vor allem von hohen Bildredundanzen abhängig (Aber et al. 2019). Für den SfM Ansatz ist dementsprechend ein Bildsatz mit einem großen Grad an Überlappung und möglichst variablen Bildgeometrien erforderlich. Die aufzunehmende Szene wird idealerweise aus vielen verschiedenen Positionen aufgenommen. Daraus leitet sich auch der Begriff „Structure from Motion“ ab, da die Bilder von einem sich bewegenden Sensor stammen (Westoby et al. 2012). Die Kenntnis der genauen Kameraposition- und -ausrichtung zum Zeitpunkt der Befliegung ist dabei nicht notwendig (ebd.).

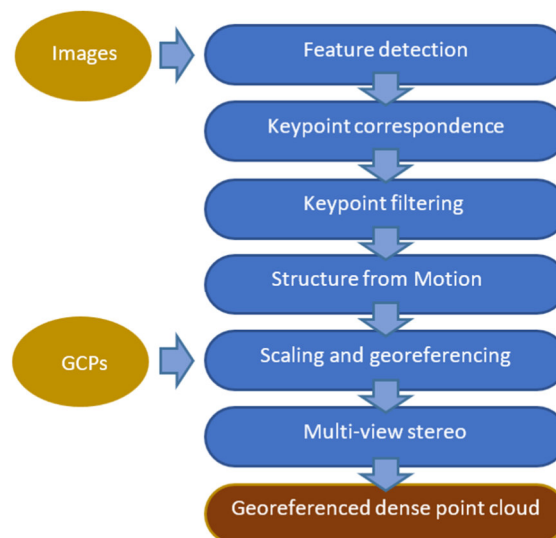


Abbildung 14: Typischer SfM-MVS Workflow zur Erstellung einer dichten Punktwolke aus überlappenden Bildern (eigene Darstellung nach Carrivick et al. 2016, S. 38)

Die einzelnen Arbeitsschritte eines typischen SfM Workflows sind in Abb. 14 gelistet, wobei die aufgenommenen Bilder sowie die GCPs die Eingangsdaten sind. In Abb. 15 sind die drei wesentlichen Abschnitte des Workflows nochmals schematisch aufbereitet. Im ersten Schritt werden Schlüsselpunkte identifiziert und anschließend Korrespondenzen zwischen diesen Punkten bestimmt. Der hierfür am häufigsten verwendete Algorithmus ist das SIFT (engl. *scale-invariant feature transform*) Verfahren. Durch das Filtern der Schlüsselpunkte bzw. der Korrespondenzen werden dann unzureichende und fehlerhafte Übereinstimmungen entfernt. Nun beginnt der eigentliche SfM Prozess, bei dem mit Bündelausgleichs-Algorithmen die innere und äußere Orientierung sowie die 3D-Szene gleichzeitig rekonstruiert werden. Möglich ist das durch die große Anzahl an Schlüsselpunkten sowie die hohe Überbestimmtheit durch die großen Bildredundanzen. Das Ergebnis dieses SfM-Prozesses ist eine „dünne“ 3D-Punktwolke (*sparse point cloud*). Da diese in einem willkürlichen Koordinatensystem vorliegt und daher weder der Maßstab der Punktwolke noch die absolute Orientierung im Raum bekannt ist, erfolgt die Transformation in ein reales Bodenkoordinatensystem mit Hilfe von GCPs (indirekte Georeferenzierung, siehe Kapitel 3.3). Im letzten Schritt erfolgt die Verdichtung der Punktwolke mit Multiview-Stereo-Algorithmen, um eine detailliertere Darstellung der

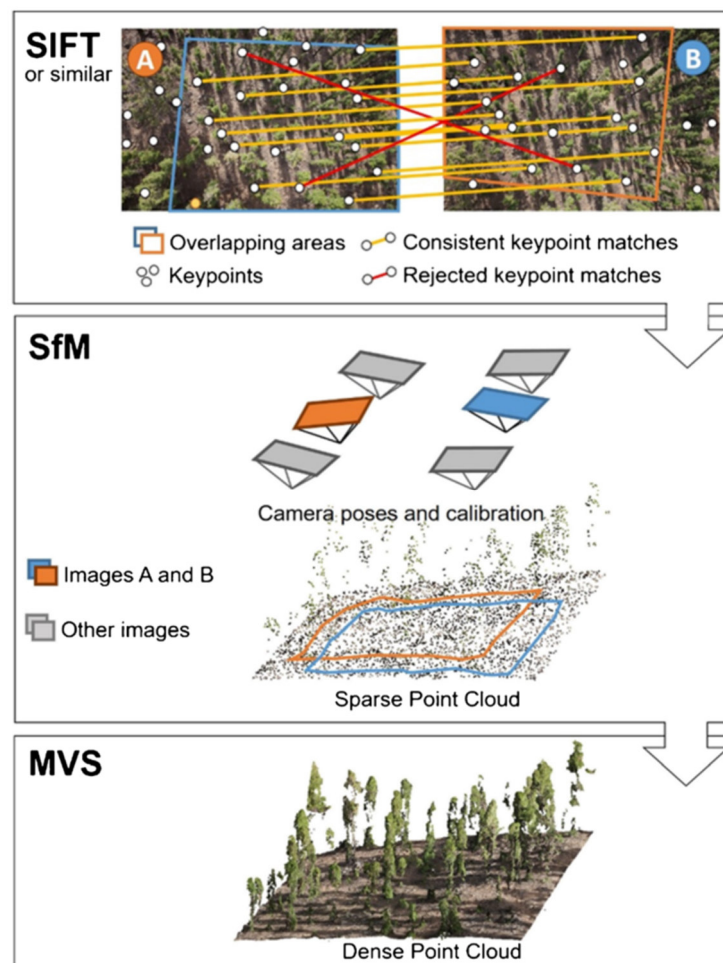


Abbildung 15: Schematische Darstellung des gesamten SfM-MVS Workflows (Quelle: Iglhaut et al. 2019, S. 158)

aufgenommenen Oberfläche zu erhalten (*dense point cloud*). (Aber et al. 2019, Carrivick et al. 2016)

Eine dichte Punktwolke mit Farbinformationen ist das Endprodukt des SfM-MVS Workflows. In einem nächsten Schritt werden in der Regel das DOM und ein Orthomosaik abgeleitet (Iglhaut et al. 2019).

3.6 Radar- und Satellitenfernerkundung

Digitale Oberflächenmodelle können auch aus Radar-Daten gewonnen werden. Die Fernerkundungstechnik wird als *Synthetic Aperture Radar* (SAR) bezeichnet. Es handelt sich wie bei LiDAR um ein aktives Verfahren, bei dem „mit synthetischer Apertur seitlich zur Flugrichtung Mikrowellenimpulse zur Erdoberfläche gesendet und die von dort rückgestreuten Signale empfangen“ werden (Ackermann et al. 2020, S. 52). Der Vorteil der Radartechnik ist, dass sie beinahe unabhängig von Witterungsverhältnissen funktioniert, da Mikrowellen auch Wolken durchdringen können. Des Weiteren können je nach angewandtem Wellenlängenbereich bei Vegetationsflächen entweder ein Gelände- oder ein Oberflächenmodell abgeleitet werden (ebd.).

Radar wird meist auf satellitengestützten Plattformen verwendet. Die wichtigste Mission war dabei SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), bei der die Erde im Jahr 2000 aufgenommen wurde und als Ergebnis ein nahezu globales, homogenes DHM mit einer räumlichen Auflösung von 30 m entstand, welches frei verwendet werden kann und auch heute noch zum Einsatz kommt (Heipke 2017). Ein weiteres Beispiel ist die *TanDEM-X-Mission* durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), dessen Ziel die Bereitstellung eines globales Oberflächenmodells ist und womit je nach Aufnahmemodus eine räumliche Auflösung von 1 m erreicht werden kann (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. o. J.). Die Datensätze der Mission sind jedoch im Gegensatz zum SRTM DGM nicht frei verfügbar.

Aber nicht nur Radar wird auf Satelliten verwendet. Auch optische Sensoren werden verwendet und die Bilder dann ähnlich wie Luftbilder stereoskopisch ausgewertet. So wird beispielsweise ein globales DHM mit einer Pixelgröße von 30 m aus dem optischen Satelliten-System *ASTER* gewonnen (Carrivick et al. 2016), welches der Allgemeinheit zur freien Verfügung steht. Die Genauigkeit von optischen Satellitendaten zur Gewinnung von DHMs hat in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen, wobei der Unterschied zu Daten aus flugzeuggetragenen Systemen immer geringer wird (Jäger et al. 2020).

3.7 Vergleich der Systeme und Relevanz für die Schattenmodellierung

Vergleicht man stereophotogrammetrische Verfahren, ALS bzw. LiDAR und UAV-SfM Verfahren, ergeben sich einige grundlegende Unterschiede. Eine Zusammenfassung dieser im Folgenden näher beleuchteten Unterschiede ist in Tabelle 1 ersichtlich.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen bildbasierten Verfahren und LiDAR ist, dass bei der Stereoauswertung nur sichtbare Bildinhalte abgebildet und für die Beschreibung der Erdoberfläche im Oberflächenmodell berücksichtigt werden können. Das kann zu einer unvollständigen Rekonstruktion der Oberfläche führen, da manche Stellen im Luftbild nicht sichtbar und Objekte von anderen Objekten überdeckt sein könnten (Bill 2016). Beim Laserscanning-Verfahren hingegen kann der Laserpuls durch die Vegetation auf den Boden dringen, welcher in Luftbildern meist nicht sichtbar ist. Daraus ergibt sich auch der Vorteil, dass neben einem Digitalen Oberflächenmodell gleichzeitig auch ein Digitales Geländemodell erstellt werden kann (Ackermann et al. 2020). Aufgrund der Tatsache, dass es sich beim Laserscanning um ein aktives Verfahren handelt, ist eine Befliegung von den vorherrschenden Lichtverhältnissen unabhängig (Jäger et al. 2020). Im Gegensatz dazu ist ein Vorteil der bildbasierten Auswertung, dass die RGB-Farbinformationen aus den Bildern vorhanden sind.

In Österreich werden von öffentlicher Hand sowohl Luftbildbefliegungen als auch ALS durchgeführt. Während Luftbildbefliegungen von der Landesvermessung flächendeckend in einem regelmäßigen Zyklus durchgeführt werden, erfolgt die ALS Erfassung deutlich seltener. Die in der Regel höhere Aktualität kann daher als Vorteil der Gewinnung von DOMs aus Luftbildern im Vergleich zu ALS-Verfahren gesehen werden (Ackermann et al. 2020). Aus Kostengründen kann die stereophotogrammetrische Auswertung von Luftbildern auch deshalb sinnvoll sein, da dann keine zusätzliche ALS-Befliegung für die Erstellung von DOMs notwendig ist.

Die stereophotogrammetrische Auswertung von Bilddaten zur Erstellung von DOMs ist bereits seit mehreren Jahrzehnten etabliert. Mit dem Aufkommen von ALS wurde diese Vormachtstellung zwischenzeitlich eingeschränkt. Nach Jäger et al. (2020, S. 18) kam es aber zu einer „Renaissance“ der Stereophotogrammetrie bzw. digitalen Bildzuordnung, insbesondere durch die Möglichkeit der Erstellung von dichten Punktwolken. Dies ist insbesondere auch auf die Verbreitung der SfM-Technologie zurückzuführen. Carrivick et al. (2016, S. 4) gehen davon aus, dass die Auswirkungen von SfM auf die Datenaufnahme größer sein werden als jene durch das Aufkommen von ALS. Die Autoren sprechen in dem Zusammenhang von einer „*Demokratisierung*“ der Datenaufnahme und Entwicklung von hoch aufgelösten 3D- bzw. Oberflächenmodellen, insbesondere deshalb, weil nur sehr wenige Eingangsdaten erforderlich sind, welche kostengünstig erfasst werden können. So können auch mit Bildern, welche aus einer unkalibrierten Kamera aufgenommen wurden, vergleichsweise sehr genaue DOMs erstellt werden. Solche Kameras kommen vorrangig auf UAV-Plattformen zum Einsatz. Zwar bietet die Datenerfassung vom bemannten Flugzeug aus grundsätzlich den besten Kompromiss aus räumlicher Abdeckung und Bodenauflösung, jedoch stellt die Datenerfassung mit UAVs zusammen mit der SfM-

Technologie eine kostengünstige Alternative dar und ermöglicht verschiedene neue Anwendungen (Carrivick et al. 2016, Remondino et al. 2011). Im Vergleich zu den immer besser aufgelösten Satellitenbildern ist ein weiterer Vorteil in der Datenerfassung mit UAV, dass diese nahe an der Erdoberfläche operieren und daher atmosphärische Effekte nicht berücksichtigt werden müssen (Aber et al. 2019).

Tab. 1: Zusammenfassung wesentlicher Unterschiede zwischen ALS und Image Matching und dem UAV-SfM Verfahren

	LiDAR/ALS	Stereophotogrammetrie (Image Matching) aus Luftbildbefliegung	UAV-SfM (eigene Befliegung)
Plattform	Flugzeug	Flugzeug	UAV
Daten- erfassung	aktiv	passiv	passiv
	Laserstrahl kann durch Vegetation dringen	nur sichtbare Bildinhalte	nur sichtbare Bildinhalte
	von Lichtverhältnissen unabhängig	von Lichtverhältnissen abhängig	von Lichtverhältnissen abhängig
Aktualität	kein festgelegter Aktualisierungszyklus	rechtlich bindender, regelmäßiger Zyklus	selbst festgelegter Befliegungszeitpunkt
Erfassungs- zeitpunkt	meist im Winter	Sommer (belaubte Phase)	Sommer (belaubte Phase)
Maßstab	für großräumige Anwendungen	für großräumige Anwendungen	für kleinräumigere Anwendungen
Ausstattung/ Kosten	teure Ausrüstung erforderlich	kalibrierte Großbildkameras erforderlich	kostengünstiges Equipment
Auswertung	Erstellung von DOM und DGM möglich, Nachbearbeitung erforderlich	mehr Eingangsdaten erforderlich	wenige Eingangsdaten erforderlich, einfache Anwendung „Black-Box“

Generell hängt die Genauigkeit, mit der die Erdoberfläche und die darauf befindlichen Objekte erfasst werden können, stark von den Gegebenheiten ab. So können insbesondere sich bewegende Objekte, wie beispielsweise Vegetation, die sich im Wind bewegt, zu Fehlern bei der Suche nach korrespondierenden Punkten im SfM Workflow führen. Aber auch stark reflektierende Oberflächen oder, wie bereits erwähnt, nicht sichtbare oder stark

beschattete Oberflächen können letztendlich zu Informationslücken im DOM führen (Aber et al. 2019). Vor allem die Generierung von DOMs aus einem UAV-SfM-Workflow ist dabei fehleranfällig, was insbesondere an der hohen räumlichen Auflösung sowie der meist kleinen räumlichen Abdeckung liegt (ebd.). Fehler können auch dadurch auftreten, dass der hochautomatisierte Workflow meist eine „Black-Box“ ist und die Parameter zur Schätzung der Qualität oft nicht transparent sind (Aber et al. 2019). Aus dem Vorteil der einfachen Handhabung sowie dem hohen Automatisierungsgrad von SfM-MVS im Vergleich zu anderen Verfahren können sich also auch Nachteile ergeben, etwa durch das Risiko der Fehlerfortpflanzung (ebd.).

Es stellt sich nun die Frage, welche Unterschiede sich aufgrund der unterschiedlichen Erfassungsmethoden in den Punktwolken und in weiterer Folge im DOM ergeben. In der vorhandenen Literatur findet man dazu teilweise unterschiedliche Einschätzungen, wobei die Untersuchungen aufgrund sehr unterschiedlicher Methodik nur schwer vergleichbar sind.

Widyaningrum und Gorte (2017) führten einen Vergleich zwischen den Punktwolken aus SfM, klassisch photogrammetrischen Verfahren (SGM) und LiDAR durch. Um gleiche Aufnahmebedingungen zu garantieren, erfolgte die Datenaufnahme zeitgleich. Die beiden bildbasierten Ansätze zeigten mehr Informationslücken. Die Gründe hierfür sind Schwierigkeiten beim Identifizieren von Schlüsselpunkten aufgrund von Schatten im Bild, gering texturierten Oberflächen und sich bewegende Objekte wie Blätter. Hinsichtlich der Höhenwerte sind die größten Unterschiede zwischen der LiDAR Punktwolke und den Punktwolken aus den bildbasierten Verfahren im Bereich von dichten Bäumen erkennbar, wobei LiDAR-Punkte geringere Höhen aufwiesen.

Liao et al. (2021) verglichen Raster-DOMs aus SfM und LiDAR für unterschiedliche Landnutzungstypen. Die Datenaufnahme erfolgte jeweils mittels UAV. Die Autor:innen stellten fest, dass die größten Unterschiede zwischen den beiden Erfassungsmethoden in bewaldeten Gebieten auftreten und dass die SfM-Punktwolke bei dichter Vegetation größere Fehler aufweist. Ihre Untersuchung ergab außerdem, dass die Höhenwerte des SfM-DOMs durchschnittlich 40 cm niedriger waren als beim LiDAR-DOM.

Hinsichtlich der Modellierung von Schatten bzw. Sonnenstrahlung gibt es bisher kaum Untersuchungen dazu, inwiefern unterschiedliche Erfassungsmethoden der DOMs die Ergebnisse beeinflussen. Für den urbanen Raum untersuchten Polo und García (2023) in ihrer Arbeit den Einfluss zweier Erfassungsmethoden zur Erstellung von DOMs auf das Solarpotenzial. Herangezogen wurden dafür ein DOM aus LiDAR und ein DOM, welches mittels SfM erstellt wurde. Die größten relativen Differenzen im Untersuchungsgebiet betrugen weniger als 7 % und konzentrierten sich vor allem im Bereich von Bäumen und Gebäudekanten. Beim Vergleich der Schattenverhältnisse, welche mittels Sky View Faktor und GIS berechnet wurden, konnte gezeigt werden, dass das SfM-DOM Schattenmuster besser definiert als das LiDAR-DSM und sich auch hier die größten Unterschiede rund um Bäume und in bewaldeten Gebieten befinden. Es sei an dieser Stelle aber angemerkt, dass die Luftbilder für die SfM Verarbeitung nicht aus einer UAV-Befliegung stammen.

Zur Modellierung der Wassertemperatur entlang eines Flusses untersuchten Dugdale et al. (2019) in ihrer Arbeit ein mit ALS erzeugtes DOM und ein mittels SfM erstelltes DOM aus einer UAV-Befliegung hinsichtlich ihrer Eignung, die Variabilität der Schattenmuster in einem Flusstemperaturmodell zu charakterisieren. Die Autoren konnten dabei zeigen, dass mit dem UAV-SfM Modell vergleichbare Genauigkeiten wie mit LiDAR-Daten erreicht werden können.

Žižlavská et al. (2021) untersuchten den Einfluss von Vegetation entlang von Radfahrwegen auf die Oberflächentemperaturen und auch sie konnten zeigen, dass ein UAV-SfM-DOM in Kombination mit GIS-Tools geeignet ist, die Menge an einfallender Sonnenstrahlung und Beschattung zu modellieren.

Größere Unterschiede zwischen den DOMs aus unterschiedlichen Erfassungsmethoden konnten in verschiedenen Untersuchungen also in Verbindung mit dichter Vegetation festgestellt werden. Dennoch konnte die Eignung von SfM für die Modellierung von Sonne und Schatten mehreren Studien festgestellt werden, wobei keine Quantifizierung der Unterschiede bei der Schattenmodellierung auf Grundlage verschiedener Erfassungsmethoden durchgeführt wurde.

4 Vorgehensweise und praktische Umsetzung

In diesem Kapitel soll die Vorgehensweise sowie die praktische Umsetzung von der Datenerfassung bis zur Analyse im GIS beleuchtet werden. Nach einer Einführung in das Untersuchungsgebiet wird ein kurzer Überblick über den gesamten Workflow präsentiert. Im Anschluss wird auf die einzelnen Schritte des Workflows im Detail eingegangen.

4.1 Das Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsgebiet dienen mehrere Abschnitte des Radwegs Thayarunde in Niederösterreich (siehe Verein Zukunftsraum Thayaland). Der insgesamt über 100 km lange Radrundweg liegt größtenteils im Bezirk Waidhofen an der Thaya im nördlichen Waldviertel und verläuft im Norden auch einige Kilometer über der Grenze in Tschechien. Das Gebiet ist Teil des Granit- und Gneishochlands, welches durch sanft geschwungene Hochflächen und flachen Geländeformen geprägt ist (Fink et al. 2000). Für die Landschaft des nördlichen Waldviertels charakteristisch ist ein Mosaik aus Ackerbau und Wald, wobei Fichtenforste dominierend sind (Amt der NÖ Landesregierung 2015).

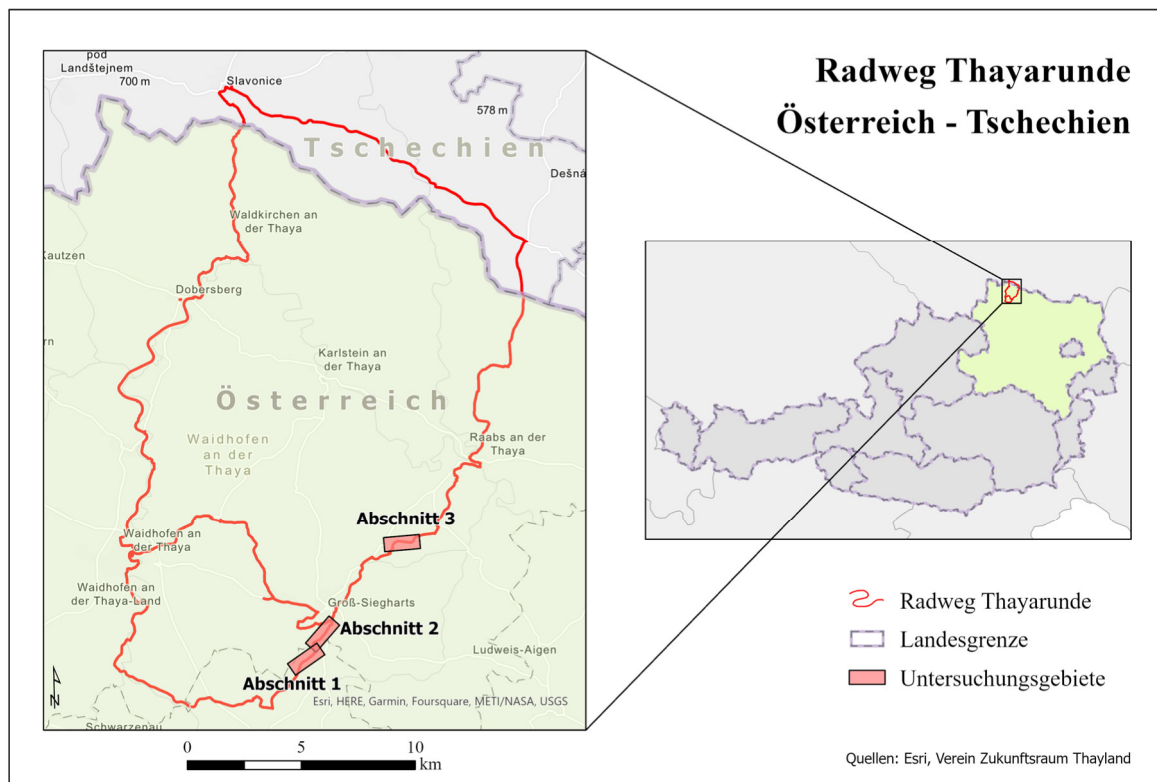
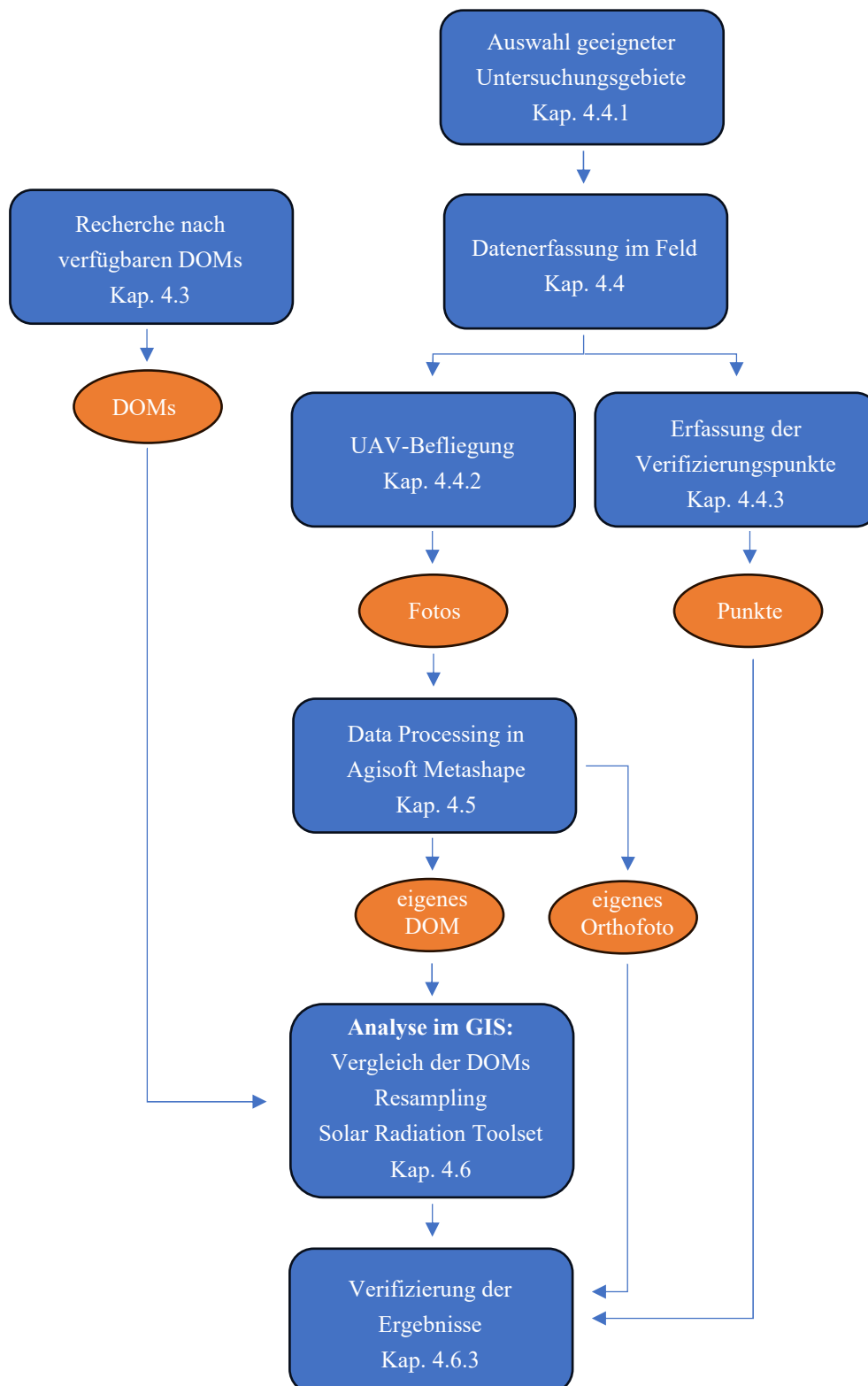


Abbildung 16: Überblick über das Untersuchungsgebiet (eigene Abbildung)

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf unbebauten Gebieten und dem Schattenwurf durch Vegetation entlang des Radweges, da hier, wie bereits erwähnt, noch kaum Untersuchungen durchgeführt wurden. Generell verläuft der Großteil der gesamten Strecke durch unbebaute Landschaft und nur ein sehr geringer Teil der gesamten Radroute durch Siedlungsgebiete. Für die eigene Datenerfassung bzw. die Analyse wurden drei Abschnitte auf dem südöstlichen Teil des Radrundwegs ausgewählt (siehe obige Karte, Abb. 16). Auf die Auswahl der Abschnitte wird in Kap. 4.4.1 näher eingegangen. Die Etappe des Radweges zwischen Göpfritz an der Wild und Raab an der Thaya verläuft auf den ehemaligen Bahntrassen der Göpfritz-Raabs-Bahn, weshalb es auf diesem Teil der Strecke keine größeren Steigungen gibt. Generell liegen die Abschnitte auf einer Seehöhe von rund 490 m bis 620 m. Der Radweg ist asphaltiert und durchgehend etwa zwei Meter breit.

4.2 Der Workflow im Überblick

Im folgenden Flussdiagramm ist der gesamte Workflow dargestellt. Zunächst erfolgte eine Recherche nach verfügbaren und für die Analyse geeigneten DOMs für das Untersuchungsgebiet. Dabei wurde auf offizielle Datensätze vom Bund und vom Land Niederösterreich zurückgegriffen. Des Weiteren wurden geeignete Abschnitte entlang des Radweges für die eigene Datenerfassung im Feld ausgewählt. Die anschließende Datenerfassung im Feld bestand dann aus zwei Teilen, der Befliegung mit UAV und die Erfassung der Verifizierungspunkte für die spätere Verifizierung der GIS-Analyse. Die Fotos der Befliegung wurden im Anschluss in der SfM-Software Agisoft von Metashape prozessiert. Für jeden Abschnitt wurden zwei Produkte abgeleitet: ein DOM im Rasterformat sowie ein Orthofoto. Das DOM wurde dann ebenso wie die verfügbaren DOMs für die Analyse im GIS herangezogen. Nachdem die unterschiedlichen Modelle verglichen wurden, erfolgte die Schattenanalyse mit dem *Solar Radiation* Toolset von ArcGIS Pro. Die Orthofotos dienten gemeinsam mit den Verifizierungspunkten der Überprüfung der Ergebnisse. Unter Orthofotos versteht man entzerrte und maßstabgetreue Luft- oder Satellitenbilder. Dabei wird das Originalbild „mittels differenzieller Entzerrung in eine strenge Orthogonalprojektion“ umgewandelt, um „Effekte der projektiven Verzerrung und unterschiedlicher, von der Geländehöhe abhängiger Maßstäbe“ zu beseitigen (Bill 2016, S. 104).



4.3 Verfügbare DOMs

Für das Untersuchungsgebiet stehen mehrere Digitale Oberflächenmodelle im Rasterformat aus öffentlicher Hand zur Verfügung. Für ganz Österreich flächendeckend kann ein DOM vom Eich- und Vermessungswesen (BEV) bezogen werden. Für Niederösterreich sind zusätzlich DOMs vom Land Niederösterreich in verschiedenen Auflösungen erhältlich. Generell unterscheiden sich die DOMs vom BEV und vom Land NÖ vor allem hinsichtlich der Art der Erstellung, aber auch hinsichtlich der Aktualität, Kosten und Art der Bereitstellung. Die zur Verfügung stehenden DOMs und die wesentlichen Unterschiede sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tab. 2: Übersicht über die verfügbaren DOMs (Stand November 2021)

Produkt/ Herausgeber	Art d. Erstellung	Erfassungszeitraum	Erfassungs- zyklus	Kosten	Bereitstellung
DOM BEV 0,5m	Image Matching	Mai - August 2018	dreijährig	6€/km2*	BEV-Shop
DOM Land NÖ 1m	ALS/LiDAR	Februar - März 2020	mehrfährig	kostenlos	Geoshop NÖ
DOM Land NÖ 5m	ALS/LiDAR	Februar - März 2020	mehrfährig	kostenlos	Geoshop NÖ
DOM Land NÖ 10m	ALS/LiDAR	Februar - März 2020	mehrfährig	kostenlos	data.gv.at

*Kosten für die interne Nutzung

Das DOM des BEV wird durch automatische Bildkorrelation, dem sogenannten Image Matching, nach dem Verfahren der Stereophotogrammetrie erzeugt (siehe Kapitel 3.4.3). Dabei wird zuerst eine georeferenzierte, dreidimensionale Punktwolke generiert, aus der in einem nächsten Schritt eine Raster-Datei abgeleitet wird (BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen o. J.c). Mit einer Rasterweite von 0,5 m ist das DOM vom BEV jenes mit der besten Auflösung. Die Höhengenaugigkeit beträgt rund 1 m, wobei bei Bewuchs, Gebäuderändern sowie im Hochgebirge größere Abweichungen auftreten können (ebd.). Da das DOM aus den digitalen Luftbildern gewonnen wird, ist die Aktualität abhängig von der Luftbildbefliegung. Diese erfolgt in einem dreijährigen Zyklus. Flächendeckend stehen die DOMs des BEV seit der Flugperiode 2013 – 2015 zur Verfügung (BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen 2019).

Die DOMs vom Land NÖ sind in unterschiedlichen Auflösungen erhältlich. Grundlage ist jeweils eine dreidimensionale Punktwolke, welche mittels Airborne Laserscanning erzeugt wird (siehe dazu Kapitel 3.2). Die Befliegung und damit die Aktualisierung der Datensätze erfolgt hier nicht in einem fixen Intervall, weshalb die Aktualität sehr unterschiedlich ist innerhalb des Landesgebiets Niederösterreichs. Für das Untersuchungsgebiet wurde das DOM zuletzt 2020 aktualisiert. Im Süden Niederösterreichs fand die letzte Befliegung laut Flugplan (welcher auf Anfrage zur Verfügung gestellt wurde) aber beispielsweise 2006 statt.

Im Unterschied zu den DOMs des Landes NÖ, welche nach Registrierung im Geoshop kostenlos bezogen werden können (siehe Amt der NÖ Landesregierung o. J.), wird beim BEV ein Preis von 6 Euro pro km² für die interne Nutzung verrechnet, wobei zusätzliche Nutzungsgebühren anfallen können.

Neben dem Befliegungszyklus ist auch der Erfassungszeitraum innerhalb eines Jahres ein entscheidender Unterschied zwischen Datensätzen von BEV und Land NÖ. Dies ist durch die jeweilige Erfassungsmethode begründet. Aufgrund der unterschiedlichen Ausprägung der Vegetation erfolgt die ALS Befliegung in den Wintermonaten und die Luftbildbefliegung in den Sommermonaten. (siehe Kapitel 3.2 und Kapitel 3.4.2)

Ein DOM bzw. DHM auf Basis von Satellitendaten wurde nicht herangezogen. Verfügbare Datensätze haben für diese Anwendung eine zu geringe Auflösung. Genauere Daten mit einer Auflösung bis zu 1 m stehen für die Allgemeinheit nicht zur Verfügung.

4.4 Datenerfassung im Feld

Um mit der SfM-Technologie ein eigenes digitales Oberflächenmodell erzeugen zu können, wurden an zwei Feldtagen im Frühherbst 2021 Bilder mittels UAS entlang des Radfahrweges aufgenommen. Insgesamt wurden drei Abschnitte mit einer Länge von 300 bis 500 Meter für die Befliegung ausgewählt (siehe Abb. 16). Die Datenerfassung umfasste neben der Befliegung mit der Drohne auch die Aufnahme von Verifizierungspunkten entlang von zwei der drei beflogenen Teilstrecken, um die Ergebnisse im Anschluss an die Analyse verifizieren zu können.

4.4.1 Auswahl der Gebiete

Mit der Auswahl der drei Abschnitte wurde versucht, die verschiedenen Gegebenheiten im grundsätzlich recht homogenen Untersuchungsgebiet abzubilden. Die Abschnitte unterscheiden sich dabei insbesondere hinsichtlich der Vegetationsdichte entlang des Radweges. Während ein Abschnitt entlang des Waldrandes führt und daher fast durchgehende Vegetation beidseitig des Weges aufweist, ist die Vegetation entlang der anderen beiden Abschnitte deutlich weniger dicht. Es wurde außerdem versucht, Abschnitte mit unterschiedlichem Verlauf hinsichtlich der Himmelsrichtungen auszuwählen, da dies einen entscheidenden Faktor für die Sonneneinstrahlung darstellt.

Die Auswahl geeigneter Gebiete war allerdings aufgrund rechtlicher Vorgaben beschränkt. So liegt der südlichste Teil des Radweges in einer militärischen Flugverbotszone, welche auch für Drohnenflüge gilt.

In weiterer Folge sollen nun die drei gewählten Abschnitte kurz beschrieben werden.

Abschnitt 1	
Länge des Abschnitts	650 m
Ausrichtung	SW - NO
Beschreibung	Nahezu gerader Streckenabschnitt mit diverser, unterschiedlich hoher und dichter Vegetation. Beidseitig des Radweges befinden sich Laub- und Nadelbäumen und Buschwerk.



Abbildung 18: Abschnitt 1, eigene Aufnahme vom Flugtag am 25.09.2021



Abbildung 18: Abschnitt 1, eigene Aufnahme vom Flugtag am 25.09.2021

Abschnitt 2	
Länge des Abschnitts	450 m
Ausrichtung	SW - NO
Beschreibung	Weniger dichte Vegetation und mehr Buschwerk als in Abschnitt 1. Teilweise befindet sich ein Wall beidseitig des Weges.



Abbildung 19: Abschnitt 2, eigene Aufnahme vom Flugtag am 25.09.2021



Abbildung 20: Abschnitt 2, eigene Aufnahme vom ersten Besichtigungstag am 15.09.2021

Abschnitt 3	
Länge des Abschnitts	550 m
Ausrichtung	Nahezu W - O
Beschreibung	Ähnlich wie Abschnitt 2, aber eine andere Ausrichtung. Vorwiegend recht niedrige Vegetation (Buschwerk). Im Gegensatz zu Abschnitt 2 ist das Gelände ganz flach.



Abbildung 21: Abschnitt 3, eigene Aufnahme vom zweiten Flugtag am 04.10.2021

4.4.2 Befliegung

Neben den Faktoren, die es bei der Auswahl geeigneter Abschnitte zu beachten gibt, spielt auch der Zeitraum der Befliegung eine entscheidende Rolle. So müssen Jahreszeit und Witterungsverhältnisse bei der Datenerfassung berücksichtigt werden. Sowohl bei der Befliegung mittels UAV als auch bei der Aufnahme der Verifizierungspunkte war eine Abhängigkeit vom Wetter gegeben. Um die Ergebnisse später verifizieren zu können, war eine Datenaufnahme bei Sonnenschein erforderlich. Ebenfalls ausschlaggebend war der Zeitraum der Datenaufnahme. Für ein aussagekräftiges Ergebnis war es notwendig, dass die Vegetation noch auf ihrem Höchststand war, weshalb der mögliche Zeitraum zur Datenaufnahme durch den Beginn des Laubfalls beschränkt war.

Die Befliegung wurde an zwei Feldtagen durchgeführt. Am **25. September 2021** wurden die Abschnitte 1 und 2 beflogen, am **04. Oktober 2021** Standort 3. Am ersten Flugtag herrschten dabei mit ungetrübtem Sonnenschein und annähernder Windstille sehr gute Bedingungen für den Drohnenflug. Am zweiten Flugtag waren die Witterungsverhältnisse aufgrund von anfänglichem Nebel schwieriger. Dieser wurde zwar im Laufe des Tages lichter, jedoch sorgten Nebel, vorbeiziehende Wolken und kurzen Sonnenphasen für sich schnell ändernde Lichtverhältnisse, wodurch es schwierig war, die richtigen Kameraeinstellungen zu finden.

Die Befliegungen wurden mit einer DJI Mavic 2 Pro durchgeführt, ausgestattet mit einem 20 Megapixel 1-Zoll-CMOS-Sensor mit einer Brennweite von 10mm bzw. 28mm (35mm-Äquivalent; für die genauen technischen Daten siehe: www.dji.com/at/mavic-2, letzter Zugriff am 07.06.2023).

Da es sich hierbei nicht um eine RTK-fähige Drohne handelt, wurden für eine genaue Positionsbestimmung des späteren Modells *Ground Control Points* (GCPs; dt.: Passpunkte) mit einem Differential-GNSS-Empfänger im RTK-Modus der Firma Trimble eingemessen. Es wurden laminierte A3 Ausdrücke verwendet (siehe Abb. 22).

Im Abschnitt 1 wurden 13 Passpunkte verteilt und eingemessen, im kleineren zweiten Abschnitt wurden 7 Passpunkte und im dritten Abschnitt 10 Passpunkte eingemessen. Ein Teil der Punkte wurde am Radweg selbst platziert, der andere Teil auf den angrenzenden Feldern bzw. Waldlichtungen.

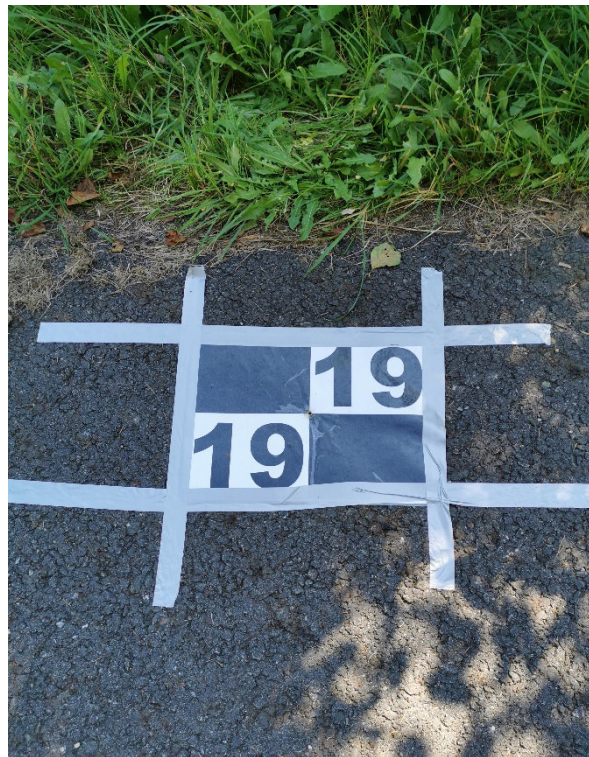


Abbildung 22: Beispiel für einen am Weg befestigten Passpunkt (eigene Aufnahme)

Bevor nach dem Einmessen der GCPs mit der Befliegung gestartet werden konnte, wurde aus Sicherheitsgründen und um alle rechtlichen Vorgaben einzuhalten der beflogene Bereich weitreichend abgesperrt (siehe Abb. 23).

Die Flugplanung erfolgte mit Pix4D Capture, einer App zur Planung von Drohnenflügen. Dabei wurde mit Hilfe der App pro Abschnitt eine sogenannte Mission erstellt und der Umfang des zu beflegenden Abschnitts bestimmt. Um in weiterer Folge ein aussagekräftiges Modell zu erhalten, wurde auf den etwa 450 bis 650 m langen Strecken beidseitig des Radweges eine Fläche von 90 bis 100 m Breite beflogen. Nachdem alle

Parameter für den Flug festgelegt wurden, kann die Mission in Pix4D Capture gestartet werden. Die Drohne fliegt dann selbstständig die in der App definierte Fläche ab.



Abbildung 23: Warnhinweis auf der beflogenen Teilstecke (Aufnahme: Pöchersdorfer, P.)

Pro Abschnitt wurden **zwei Flüge** direkt hintereinander durchgeführt, wobei die Aufnahme der Bilder einmal **senkrecht (nadir)** und einmal schräg mit einem Winkel von **70° (oblique)**, gemessen von einer horizontalen Kameraausrichtung, durchgeführt wurde. Während Schrägaufnahmen in der traditionellen Photogrammetrie selten zur Anwendung kommen, bieten Sie Vorteile bei SfM-MVS Workflows und bei der Erfassung von komplexen dreidimensionalen Objekten und Geländeformen (Aber et al. 2019). So kann das Hinzufügen von Oblique-Aufnahmen den sogenannten Doming-Effekt abschwächen, der im Zusammenhang mit einer ungenauen inneren Orientierung nicht metrischer Kameras auftritt (ebd.). Der Doming-Effekt beschreibt dabei *„eine großflächige systematische Verformung der rekonstruierten Oberfläche, die oft als eine abgerundete, gewölbte Verzerrung der Oberfläche erscheint“* (Magri und Toldo 2017, S. 235, übersetzt aus dem Englischen).

Für alle Flüge wurde eine **Flughöhe von 80 m** sowie eine **Längs- und Querüberlappung von jeweils 85 %** gewählt. Da man in der Literatur keine eindeutige Empfehlung für diese Parameter findet, orientiert sich die vorliegende Arbeit hinsichtlich der Flughöhe an Dugdale et al. (2019) und Žižlavská et al. (2021), die eine ähnliche Fragestellung behandeln. Der Überlappungsbereich entspricht den Empfehlungen von Pix4d (o. J.) für eine Befliegung über dichter Vegetation. Zwar weist nur der erste der drei beflogenen Abschnitte dichte Vegetation auf, jedoch wurde der gewählte Überlappungsbereich

beibehalten, um die Vergleichbarkeit der Modelle zu gewährleisten. Alle Flüge wurden außerdem im **langsamen Flugmodus** befliegen.

Die Bilder weisen eine **durchschnittliche *Ground Sample Distance (GSD)* von ca. 1,9 cm/ Pixel** auf. Unter der GSD versteht man in der Fernerkundung die Bodenauflösung bzw. den am Boden gemessenen Abstand zwischen den Pixelzentren. Sie ist abhängig von der Flughöhe und der Brennweite der verwendeten Kamera. Dabei variiert die GSD innerhalb des Bildes geringfügig, unter anderem da die Erdoberfläche nicht komplett flach ist und es so zu leichten Variationen in der Flughöhe kommen kann. (Aber et al. 2019)

Die Kameraeinstellungen wurden abhängig von den Lichtverhältnissen zum Befliegungszeitpunkt festgelegt. Folgende Einstellungen wurden für die einzelnen Abschnitte getroffen:

Tab. 3: Kameraeinstellungen

Abschnitt	Blendenzahl	Belichtungszeit	ISO
Abschnitt 1	F/5	1/800 Sek.	ISO-200
Abschnitt 2	F/5	1/800 Sek.	ISO-200
Abschnitt 3	F/4	1/400 Sek.	ISO-200

Die Belichtung eines Fotos bzw. die Bildhelligkeit wird abhängig von den Lichtverhältnissen durch die Kombination von drei Sensoreinstellungen bestimmt: Blende, Belichtungszeit und ISO-Empfindlichkeit (O'Connor et al. 2017). Die Blendenzahl gibt an, wie groß die Blendenöffnung ist. Je höher die Zahl, umso kleiner ist die Öffnung und umso weniger Licht kann eindringen (Heinrich 2017). Die Belichtungszeit gibt die Dauer der Belichtung des Sensors an. ISO beschreibt die Lichtempfindlichkeit des Sensors, wobei ISO-100 als Standardempfindlichkeit gilt (ebd.). Höhere ISO-Werte gehen einher mit größerer scheinbarer Helligkeit, jedoch können hohe ISO-Werte auch zu mehr Bildrauschen führen (O'Connor et al. 2017).

4.4.3 Aufnahme der Verifizierungspunkte

Für die Aufnahme der Verifizierungspunkte wurden im GIS zunächst zufällige Punkte entlang der jeweiligen Abschnitte erstellt. Mit Hilfe des ArcGIS Collectors, der mobilen Datenerfassungs-Applikation von ESRI (siehe doc.arcgis.com/de/collector-classic/, letzter Zugriff am 13.07.2023), wurden die Punkte im Untersuchungsgebiet zunächst markiert. Im Anschluss wurde mit dem ArcGIS Collector jeder Punkt fotografiert. Die Punkte wurden dann mit dem GNSS, wie zuvor die Passpunkte, eingemessen. Für jeden eingemessenen Punkt wurde schließlich schriftlich dokumentiert, ob sich dieser zum gegebenen Zeitpunkt im Schatten befindet oder nicht. Die Aufnahme erfolgte an zwei Tagen: die Erfassung im Abschnitt 1 erfolgte am **26.09.2021**, die Erfassung im Abschnitt 2 am **05.10.2021**.

Für den dritten Abschnitt konnten die Punkte jedoch nicht aufgenommen werden. Obwohl der Standort an unterschiedlichen Tagen mit guten Wetterprognosen aufgesucht wurde,

konnte aufgrund des Nebels keine Aufzeichnung über die Schattenverhältnisse durchgeführt werden. Da zu diesem Zeitpunkt der Laubfall bereits begann, konnte zu einem späteren Zeitpunkt keine für den Anwendungszweck akkuraten Ergebnisse mehr erzielt werden.

4.5 Data-Processing und Erstellung der DOMs

Um die DOMs vergleichen zu können, ist ein einheitliches räumliches Bezugssystem erforderlich. Während die DOMs von Bund und Land Niederösterreich im geodätischen Datum MGI vorliegen, wurden die mit dem GNSS eingemessenen GCPs ebenso wie die Verifizierungspunkte im globalen geodätischen Referenzsystem WGS84 (*World Geodetic System 1984*) aufgenommen. In einem ersten Schritt wurden daher die XYZ-Koordinaten der eingemessenen Punkte mit Hilfe des Transformators des BEV ins MGI transformiert (siehe BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen o. J.b). Wichtig ist dabei auch, den Höhenbezug zu beachten. Die Z-Koordinaten der eingemessenen Punkte liegen als ellipsoidische Höhe vor. Damit wird der Normalabstand zwischen Geländepunkt und Ellipsoid bezeichnet. Die ellipsoidische Höhe bezieht sich also immer auf ein bestimmtes Ellipsoid, je nach Referenzsystem (BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen 2020). Nach der Transformation vom WGS84 ins MGI war dann noch die Umwandlung der ellipsoidischen Höhen in österreichische Gebrauchshöhen erforderlich, da sich sowohl die Höhenmodelle des BEV als auch des Landes NÖ darauf beziehen. Es handelt sich beim System der österreichischen Gebrauchshöhen um den amtlichen Höhenbezug für Österreich. Aus historischen Gründen wird als Bezugshorizont der mittlere Wasserstand der Adria für das Jahr 1875 angenommen („Pegel Triest 1875“, siehe BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen 2020, 15ff.).

Die Erstellung der DOMs der einzelnen Abschnitte erfolgte mit der kommerziellen Software Agisoft Metashape Professional (Version 1.8.2. build 14127, siehe www.agisoft.com/, letzter Zugriff am 09.06.2023). Agisoft Metashape ist eine weit verbreitete SfM-Software. Ein Vergleich verschiedener Softwarepakete erfolgt in dieser Arbeit nicht. Für eine vergleichende Analyse der drei gängigsten SFM-basierten Softwarepakete Agisoft, Pix4d und Visual SFM sei dabei auf Sefercik et al. (2019) verwiesen.

Die photogrammetrische Auswertung in Agisoft erfolgte in Anlehnung an die von Over et al. (2021) und Noble und Matthews (2017) für das *United States Geological Survey (USGS)* beschriebenen Workflows. Im Folgenden sollen nun die wesentlichen Arbeitsschritte sowie die wichtigsten Einstellungen in Agisoft skizziert werden. Der Arbeitsablauf wurde mit den gleichen Konfigurationen für jeden Satz von Bildern, also für jeden Abschnitt, durchgeführt.

1) Kontrolle der Bildqualität

Nach dem Laden der Fotos folgt zunächst eine visuelle Kontrolle der Bildqualität. Anschließend wird die Bildqualität auch mit der Option *Estimate Image Quality* bewertet und alle Bilder mit einer schlechten Qualität (Schwellenwert < 0.5) entfernt.

2) Structure from Motion (*Align photos*)

In diesem Schritt werden die Fotos ausgerichtet. Das beinhaltet die Detektion der *Keypoints*, das *Matching* und anschließend die Schätzung der Kamerapositionen. Am Ende dieses Schrittes erhält man die „dünne“ Punktwolke.

Folgende Einstellungen wurden getroffen (aufgrund der schwierigeren Lichtbedingungen und der damit einhergehenden schlechteren Bildqualität wurden die Parameter für Abschnitt 3 angepasst):

- a) Accuracy: *high*
- b) Generic preselection: *enabled*
- c) Key point limit: 60.000 (Abschnitt 3: 40.000)
- d) Tie point limit: 0 (Abschnitt 3: 10.000)

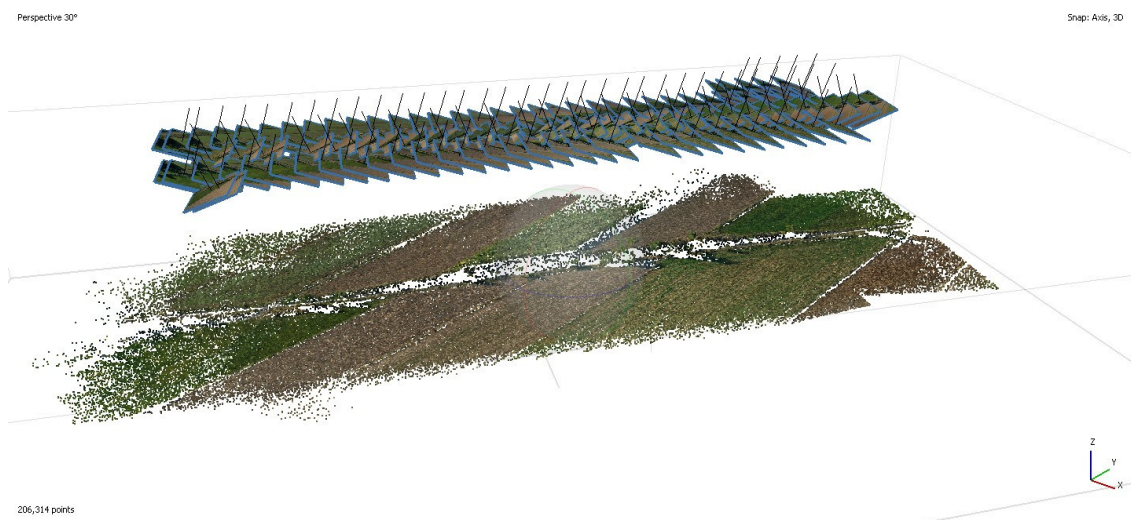


Abbildung 24: Geschätzte Kamerapositionen und dünne Punktwolke als Ergebnis des SfM Arbeitsschrittes (eigene Abbildung)

3) Georeferenzierung (Platzierung der GCPs)

Mit *Add markers* werden in diesem Schritt die GCPs geladen. Zunächst wird das Koordinatensystem des Projekts auf das Koordinatensystem der GCPs, *MGI/Austria East* (EPSG: 9273), umgestellt. Die vom GNSS an Board des UAV für jedes Bild gespeicherten Kamerapositionen, welche im vorigen Schritt zur Beschleunigung des *Alignment*-Prozesses mit einbezogen wurden, müssen nun entfernt werden, da diese im

Gegensatz zu den GCPs im WGS84 vorliegen und das Anwenden von unterschiedlichen räumlichen Bezugssystemen hier nicht möglich ist.

Für jeden GCP werden nun sogenannte *Marker* in allen Bildern platziert, in denen der jeweilige GCP sichtbar ist. Für jeden Abschnitt werden 1-3 GCPs als sogenannte *check points* definiert, welche nicht für die Georeferenzierung herangezogen werden, um diese später zur Feststellung der Fehlergröße heranziehen zu können.

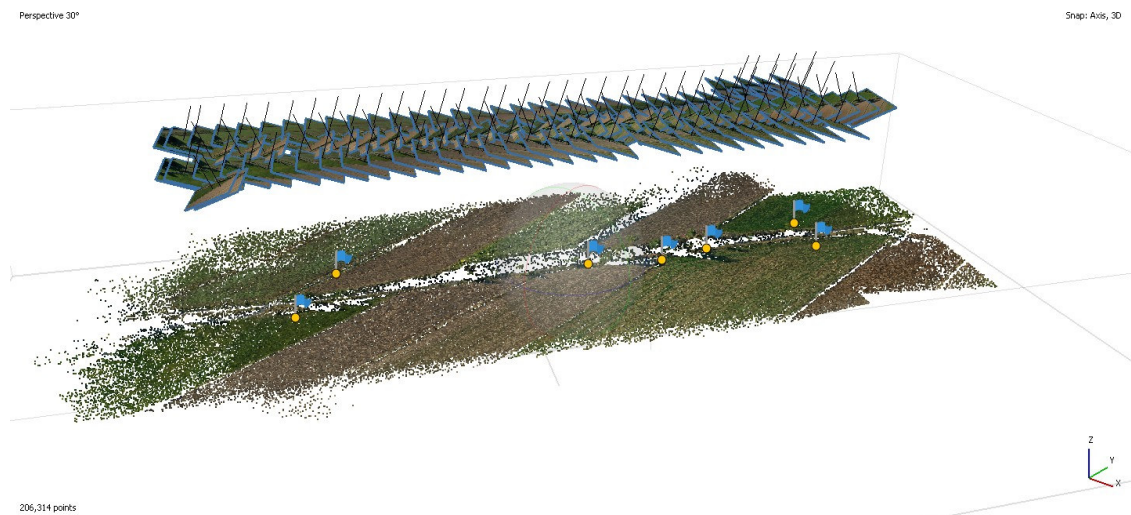


Abbildung 25: Georeferenzierte dünne Punktwolke. Die blauen Fähnchen zeigen die Positionen der eingemessenen GCPs an. (eigene Abbildung)

4) Optimierung und Reduzierung der Fehler

Es folgen nun einige Arbeitsschritte zur Optimierung der „dünnen“ Punktwolke. Es werden mehrere Filteroptionen angewandt und die geschätzten Kamerapositionen mehrmals optimiert (*optimize cameras*). Der Ablauf folgt den oben zitierten Workflows; die Filteroptionen wurden für die eigenen Daten angepasst.

5) Erstellung der dichten Punktwolke (*dense point cloud*)

In diesem Schritt erfolgt das Verdichten der Punktwolke mittels Multi-View-Stereo-Algorithmen. Für das Erstellen der dichten Punktwolke wurden folgende Einstellungen getroffen:

Quality: *high* (Aufgrund der größeren Datenmenge *medium* für Abschnitt 1)

Depth filtering: *mild* (für einen Vergleich der verschiedenen Filter-Einstellungen siehe Tinkham und Swayze 2021)

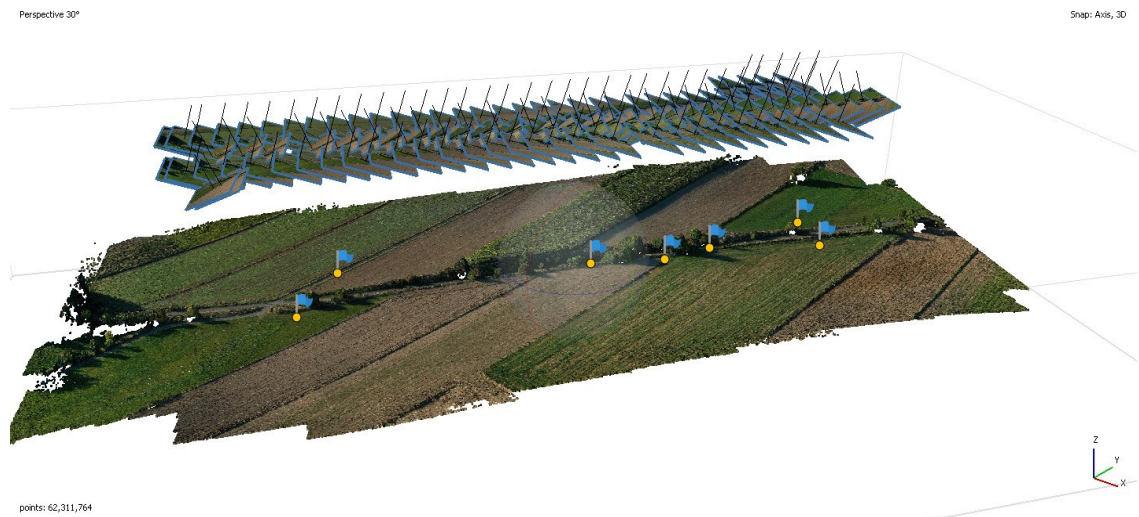


Abbildung 26: Verdichtete Punktwolke (eigene Abbildung)

6) Erstellung von *Mesh* und *Texture*

Beim *Mesh* handelt es sich um ein Polygonnetz, dessen Scheitelpunkte von den Punkten der dichten Punktwolke gebildet werden.



Abbildung 27: Texturiertes Mesh-Modell. Es sind keine Datenlücken mehr vorhanden. (eigene Abbildung)

7) Erstellung des Digitalen Oberflächenmodells

Grundlage für die Erstellung des DOMs ist die dichte Punktwolke.

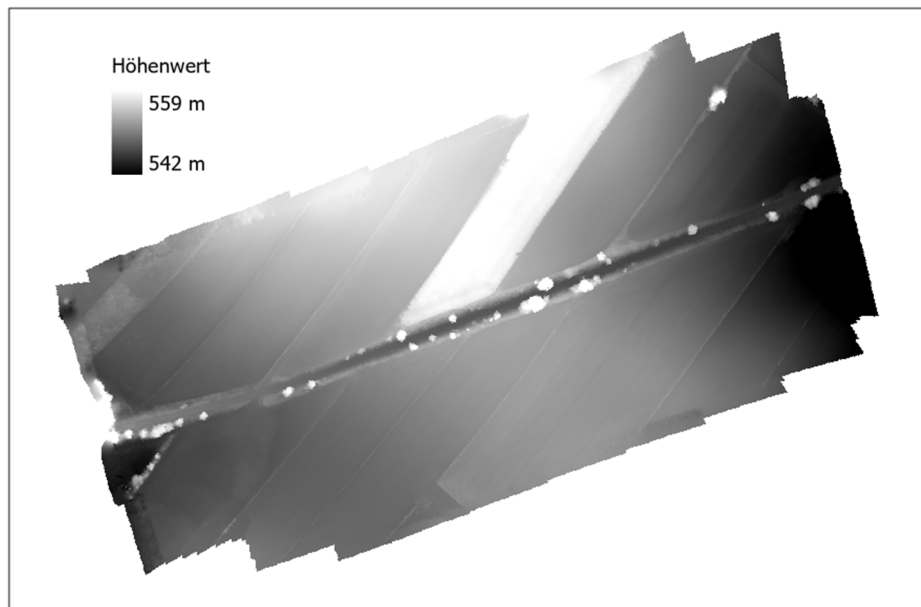


Abbildung 28: DOM visualisiert im GIS (eigene Darstellung)

8) Erstellung des Orthomosaiks

Für die Erstellung des Orthomosaiks (siehe Abb. 29) werden jeweils nur die Bilder des ersten Flugs (nadir) herangezogen, um ein Ergebnis mit einem klar ersichtlichen, abgrenzbaren Schatten zu erhalten. Durch den zeitlichen Abstand zwischen den beiden Flügen am jeweiligen Standort verändert sich aufgrund der Sonnenbewegung auch der Schattenwurf auf den Bildern. Das führt in weiterer Folge zu einem verschwommenen Schatten am Orthomosaik, wenn der gesamte Bilddatensatz verwendet wird. Das Orthomosaik wurde auf Grundlage des DOMs entzerrt. Die Pixelgröße entspricht dabei der GSD.

9) Exportieren der Modelle und Erstellung des Reports

Im letzten Schritt werden DOM und Orthomosaik exportiert und ein abschließender Report erstellt. Der Report enthält unter anderem eine genaue Aufschlüsselung der Fehlergrößen sowie eine Zusammenfassung der *Processing* Schritte inklusive der gewählten Einstellungen.

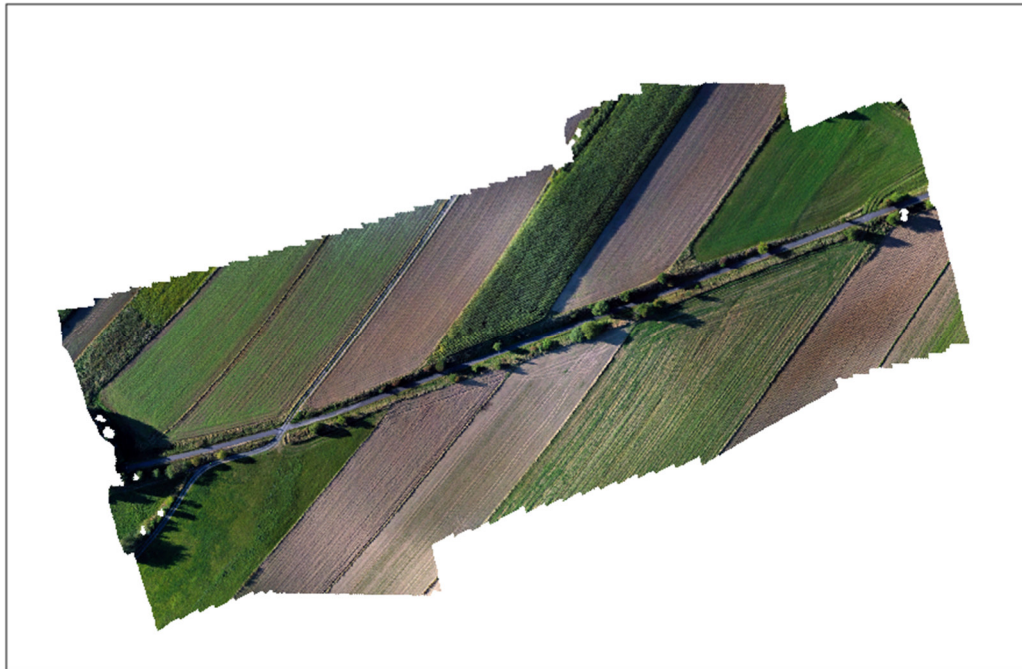


Abbildung 29: Orthomosaik auf Grundlage der Nadir-Aufnahmen, visualisiert im GIS (eigene Abbildung)

4.6 Analyse im GIS und Verifizierung der Ergebnisse

4.6.1 Solar Radiation Toolset

Für die Analyse wurde das *Solar Radiation* Toolset von ArcGIS verwendet. Die Funktionsweise wurde bereits in Kapitel 2.3 erläutert. Für jedes verfügbare DOM (siehe Tab. 2) sowie für das auf Basis der eigenen Befliegung erstellte DOM wurden mehrere Analysen durchgeführt. Zunächst wurden mit dem *Area Solar Radiation* Tool für jeden der drei Abschnitte Karten der direkten Sonnenstrahlung erstellt. Um die Ergebnisse der Analyse verifizieren zu können, wurden dabei jeweils zwei Zeitpunkte gewählt: Tag und Uhrzeit der UAV-Befliegung des jeweiligen Abschnitts sowie der Aufnahmezeitpunkt der Verifizierungspunkte. Das Tool erfordert dabei die exakte Eingabe des Datums sowie der lokalen Sonnenzeit in Dezimalstunden. Die Sonnenzeit ist abhängig vom aktuellen Sonnenstand an einem bestimmten Ort (Ilk 2021). Berechnet man die Sonnenzeit abhängig von der lokalen Standardzeit, der „Uhrzeit“, wird das Verhältnis zwischen der lokalen Zeitzone und dem Längengrad an einer bestimmten Position berücksichtigt, ebenso wie die Zeitgleichung, welche – vereinfacht – die leicht unregelmäßige Bewegung der Erde um die Sonne korrigiert. Für die Umrechnung von lokaler Zeit auf Sonnenzeit wurde ein Online-Tool verwendet (www.susdesign.com/sunangle/, letzter Zugriff am 25.07.2023). Neben dem genauen Zeitpunkt muss außerdem noch die Anzahl der Richtungen zur Ermittlung der Horizontalwinkel festgelegt werden. Dabei wurde der Maximalwert von 360 gewählt,

um eine bestmögliche Genauigkeit zu erreichen. Insgesamt führt dies zwar zu einer höheren Rechenzeit, jedoch wird dadurch auch die Vergleichbarkeit der DOMs gewährleistet.

Als weiteres Tool im *Solar Radiation* Toolset ermöglicht das *Solar Radiation Graphics* Tool auf Basis von bestimmten Punkten bzw. Positionen die Erstellung von Sichtbarkeitsfeldern sowie dazugehörigen Sonnenkarten im Raster-Format. Die Überlagerung dieser ermöglicht die Darstellung der Bewegung der Sonne über einen bestimmten Zeitraum sowie die Abschattung durch Topografie und Objekte auf der Erdoberfläche. Für die Verifizierungspunkte wurde jeweils eine solche Sichtbarkeitsgrafik erstellt (siehe Abb. 7 & 8 im Kapitel 2.3).

4.6.2 Resampling der Datensätze

Die räumliche Auflösung der Sonnenstrahlungs-Raster als Ergebnis der Analyse mit dem *Area Solar Radiation* Tool entspricht der Auflösung des für die Analyse verwendeten DOMs. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden die DOMs mit dem *Resampling* Tool auf eine gleiche räumliche Auflösung gebracht. Es soll evaluiert werden, ob ein DOM mit ursprünglich schlechterer Auflösung durch *Resampling* auf eine geringere Zellengröße ein gleich bzw. ähnlich zufriedenstellendes Ergebnis liefern kann als ein DOM, welches originär eine höhere Auflösung aufweist.

Dabei werden meistens drei Verfahren unterschieden (Lange 2020):

Beim *nearest neighbor* Verfahren wird der gesuchten Zelle im Ergebnis-Raster der Zellenwert „des nächstgelegenen Pixels im Ausgangsbild zugewiesen“ (Lange 2020, S. 472). Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass die Zellenwerte nicht verändert werden. Der maximale Lagefehler kann dabei die halbe Pixelgröße betragen (ebd.). Zudem ist das Verfahren hinsichtlich der Rechengeschwindigkeit die schnellste Methode (ESRI o. J.b).

Bei der „bilinearen Interpolation“ wird der neue Pixelwert im Ergebnisraster auf Grundlage des gewichteten Mittels der vier nächstgelegenen Pixel des Ausgangsbildes bestimmt. Dies führt zu einer Glättung der Daten, da hier im Gegensatz zum *nearest neighbor* Verfahren die Zellenwerte verändert werden (Lange 2020).

Ähnlich dem Prinzip der bilinearen Interpolation werden bei der „kubischen Interpolation“ bzw. „kubischen Faltung“ (engl. *cubic convolution*) die umliegenden 16 Pixel für die Berechnung des neuen Zellenwertes im Ergebnis-Raster herangezogen. Der Vorteil dieser Methode ist eine geringere geometrische Verzerrung als bei der *nearest neighbor* Methode, jedoch ist diese Methode auch jene mit dem größten Rechenaufwand (ESRI o. J.b).

In Abb. 30 ist beispielhaft das Ergebnis der einzelnen *Resampling* Methoden veranschaulicht, welche für das DOM des Landes NÖ angewandt wurden, um die räumliche Auflösung von 5 m auf 1 m zu erhöhen. Das Ergebnis-Raster der *nearest neighbor* Methode kann optisch von Ausgangsraster nicht unterschieden werden. Die

Schattenmodellierung wurde mit allen drei Resampling-Varianten durchgeführt, um herauszufinden, mit welchem Verfahren die besten Ergebnisse erzielt werden können (siehe Kap. 5.3).

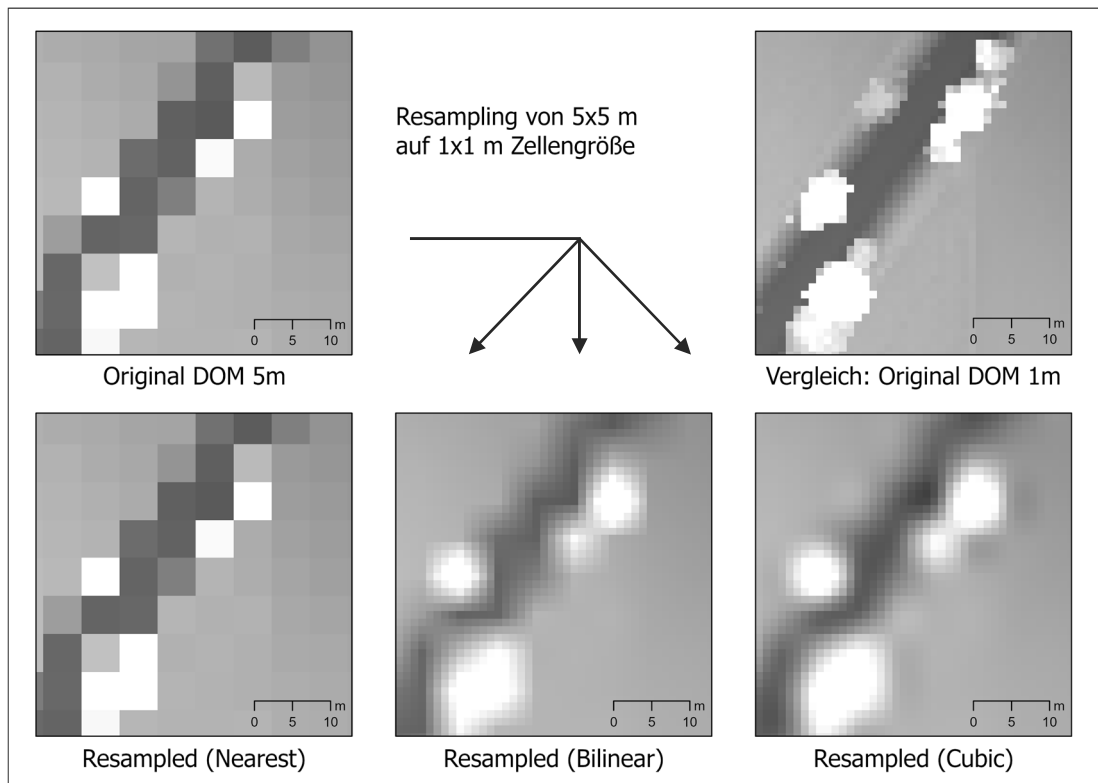


Abbildung 30: Unterschiedliche Resampling-Methoden im Vergleich (eigene Abbildung)

4.6.3 Verifizierung der Ergebnisse

Die Verifizierung der Ergebnisse aus der Schattenberechnung erfolgt auf zwei Arten: einerseits auf Grundlage des sichtbaren Schattens in den selbst erstellten Orthomosaiken und andererseits anhand der im Feld aufgenommenen Verifizierungspunkte.

Für ersteres wurden die Schattenflächen in den Orthomosaiken händisch digitalisiert (siehe Abb. 31). Dabei wurden „halbschattige“ Bereiche, in denen Sonnenlicht das Blätterdach der Vegetation teilweise durchdringt, als durchgängige Schattenfläche digitalisiert. Aufgrund wechselnder Bewölkung am zweiten Flugtag wurden für Abschnitt 3 zudem auch einzelne Orthofotos, auf welchen die Lichtverhältnisse günstig waren, aus Agisoft exportiert und für die Digitalisierung herangezogen. Im nächsten Schritt wurde überprüft, inwiefern die Schattenflächen als Ergebnis der Analyse – wie in Kap. 4.6.1 beschrieben – mit den am Orthomosaik ersichtlichen Schattenflächen übereinstimmen. Der gesamte Workflow im GIS ist in Abb. 32 dargestellt. Zunächst wurde ein *Reclassify* für alle Ausgabe-Raster durchgeführt. Dabei wurden alle Zellen mit dem Wert 0 (= Schatten) und alle Zellen mit Werten größer 0 (= von der Sonne beschienen) zusammengefasst. Im

Anschluss wurden die reklassifizierten Raster in Polygon-Features umgewandelt und mit dem *Clip*-Tool die Wegfläche des Radwegs extrahiert. Zur Quantifizierung der Überschneidung mit den digitalisierten Schatten- und Nicht-Schattenflächen wurde schließlich das *Intersect*-Tool herangezogen.

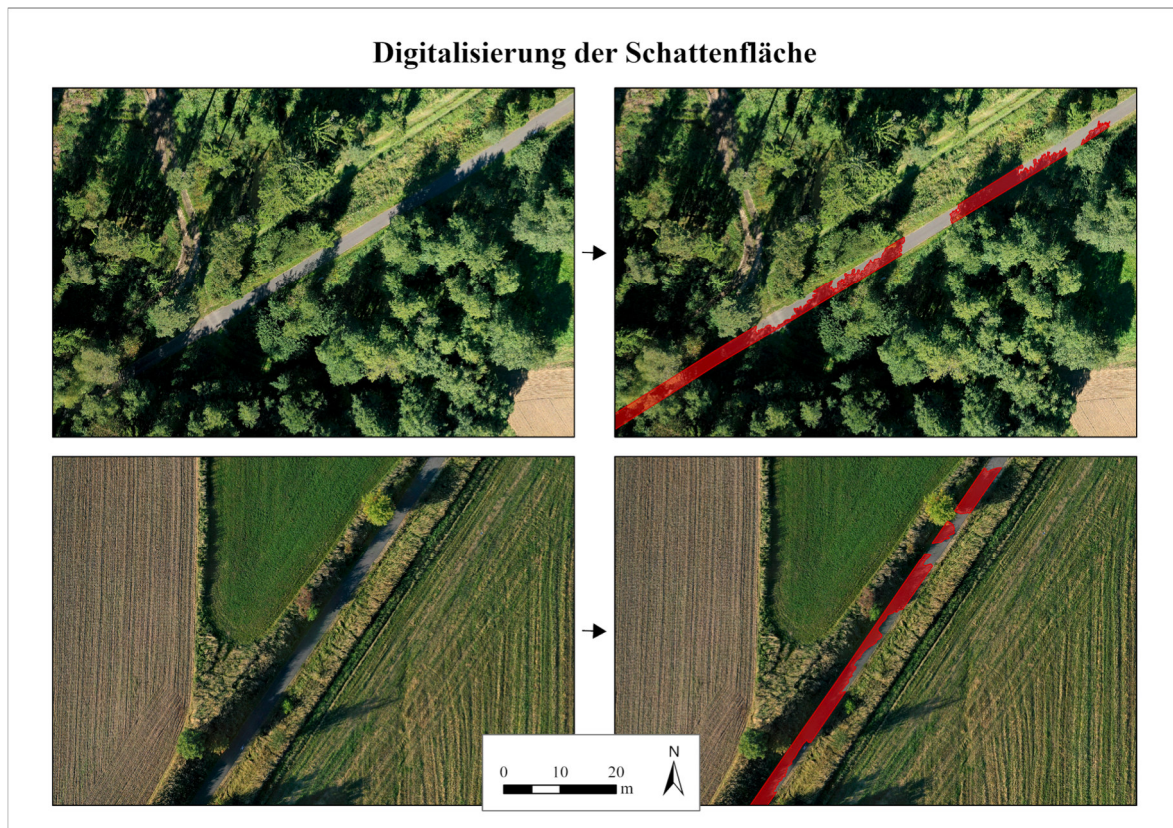


Abbildung 31: Ausschnitte der digitalisierten Schattenflächen (eigene Abbildung)

Bei zweiterem wurde für jeden Verifizierungspunkt (siehe Kap. 4.4.3) überprüft, ob dieser laut erstellter Sichtbarkeitsgrafik zum jeweiligen Aufnahmezeitpunkt im Schatten liegt oder nicht, und dieses Ergebnis mit den Aufzeichnungen aus der Feldarbeit abgeglichen.

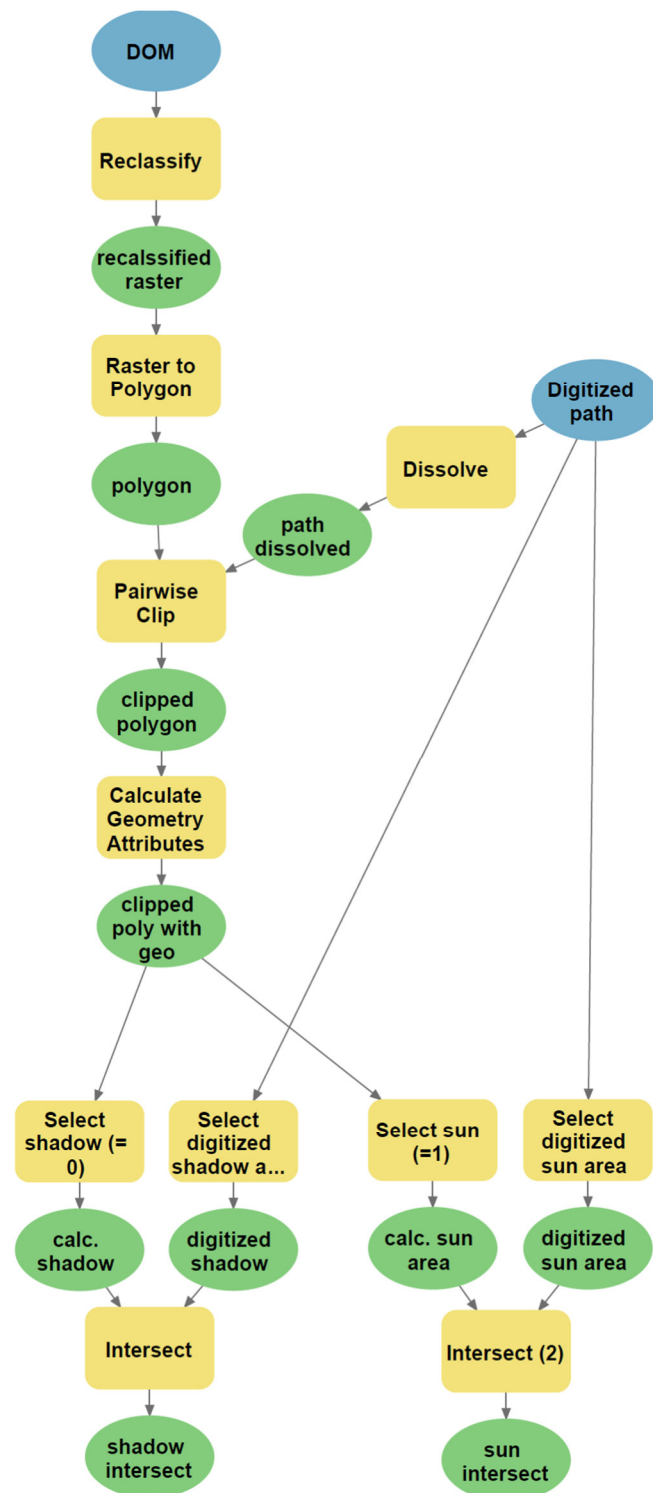


Abbildung 32: Workflow im GIS zur Verifizierung der Ergebnisse auf Grundlage der digitalisierten Schattenflächen (eigene Abbildung)

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Analysen dargestellt werden. Nach einem Überblick über die erstellten Orthofotos und DOMs aus der eigenen Befliegung sollen die unterschiedlichen DOMs zunächst miteinander verglichen werden und Differenzen evaluiert werden. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Schattenanalyse der unterschiedlichen DOMs präsentiert und verifiziert.

5.1 SfM-Modelle

Folgende Produkte im Rasterformat wurden nach der Verarbeitung in Agisoft exportiert:

Abschnitt 1:

- Orthomosaik, räumliche Auflösung **1,91 cm/Pixel** (entspricht der GSD)
- DOM, räumliche Auflösung **10 cm/Pixel**

Abschnitt 2:

- Orthomosaik, räumliche Auflösung **1,97 cm/Pixel** (entspricht der GSD)
- DOM, räumliche Auflösung **10 cm/Pixel**

Abschnitt 3:

- Orthomosaik, räumliche Auflösung **1,84 cm/Pixel** (entspricht der GSD)
- DOM, räumliche Auflösung **10 cm/Pixel**

Eine Übersicht über die Anzahl der verwendeten GCPs und die Fehler- bzw. Unsicherheitswerte ist in Tabelle 4 ersichtlich. Als *Control points* werden in *Agisoft* jene GCPs bezeichnet, die für die Georeferenzierung herangezogen werden. Die Checkpoints dienen zur Überprüfung und werden bei der Georeferenzierung nicht berücksichtigt. Bei den Fehlerwerten handelt es sich um den *Root Mean Squared Error* (RSME), eine absolute Fehlerkennzahl zur Schätzung der Genauigkeit des Modells. Es werden dabei möglichst niedrige Werte angestrebt. Der *XY error* gibt dabei die den RMSE für die X- und Y-Koordinaten der *Control points* bzw. *Check points* an, also den horizontalen Fehler, während der *Z error* den RMSE für die Z-Koordinate angibt, den vertikalen Fehler.

Der *Total error* der *Control points* für alle drei Modelle liegt zwischen rund 5 und 10 cm. Der höhere RSME-Wert für die *Check points* lässt sich dadurch erklären, dass hier bewusst jene GCPs herangezogen wurden, welche in den Bildern schlechter verortet werden konnten und höhere Fehler aufwiesen, damit diese die Genauigkeit der Georeferenzierung nicht negativ beeinflussen.

Tab. 4: Anzahl der GCPs und Unsicherheitswerte (RMSE)

		Anzahl	XY error (cm)	Z error (cm)	Total error (cm)
Abschnitt 1	Control points	10	8,17	4,52	9,33
	Check points	3	14,82	17,52	22,95
Abschnitt 2	Control points	6	1,10	5,11	5,22
	Check points	1	2,50	16,26	16,45
Abschnitt 3	Control points	8	10,10	2,55	10,42
	Check points	2	10,09	7,53	12,59

Die folgenden Abbildungen (33-35) zeigen, wie die GCPs in den einzelnen Abschnitten verteilt wurden. Da die höchste Genauigkeit entlang des Radweges benötigt wird, wurde hier der Großteil der GCPs platziert.

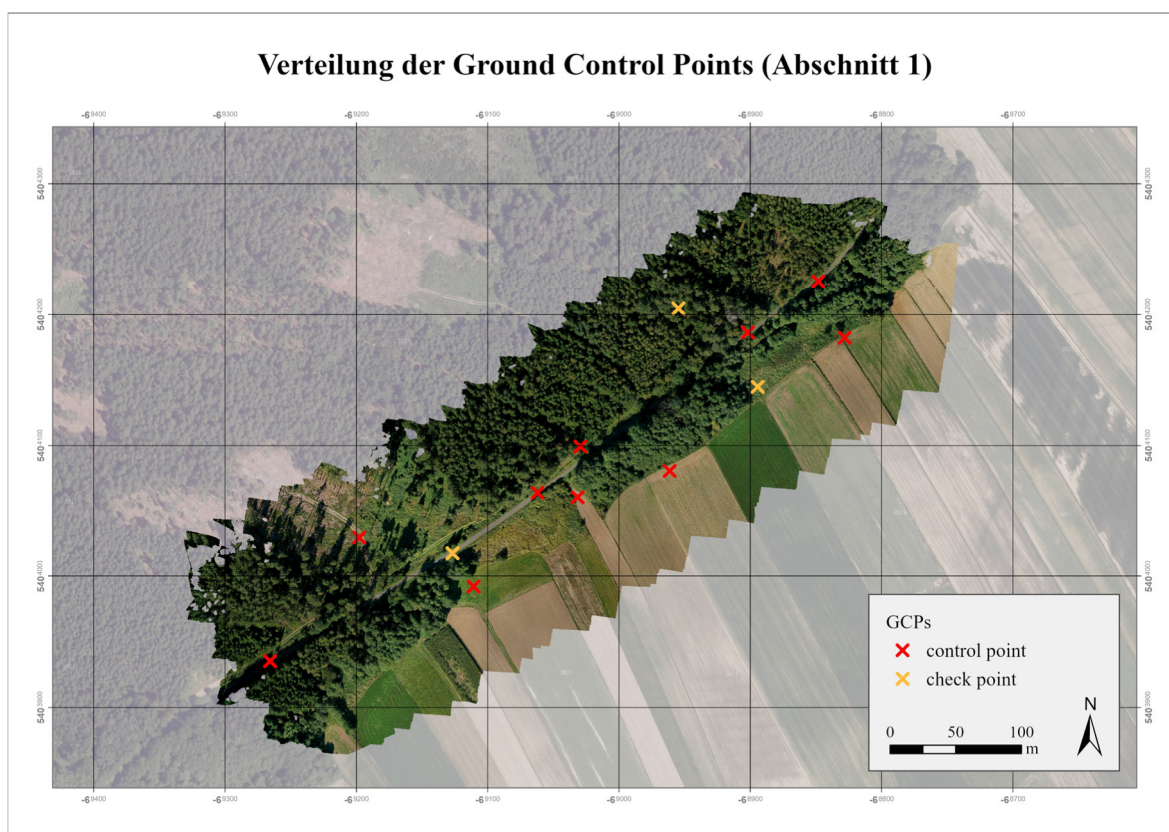


Abbildung 33: Verteilung der GCPs im Abschnitt 1 (eigene Abbildung)

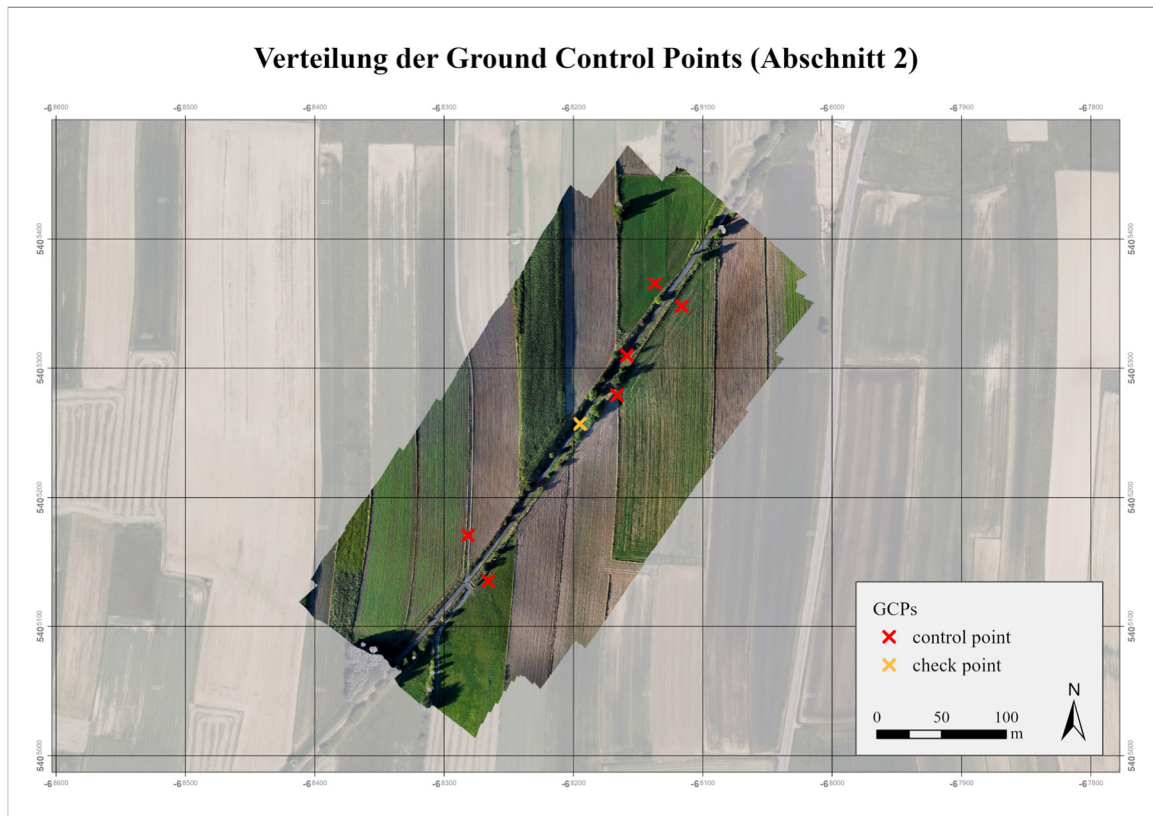


Abbildung 34: Verteilung der GCPs im Abschnitt 2 (eigene Abbildung)

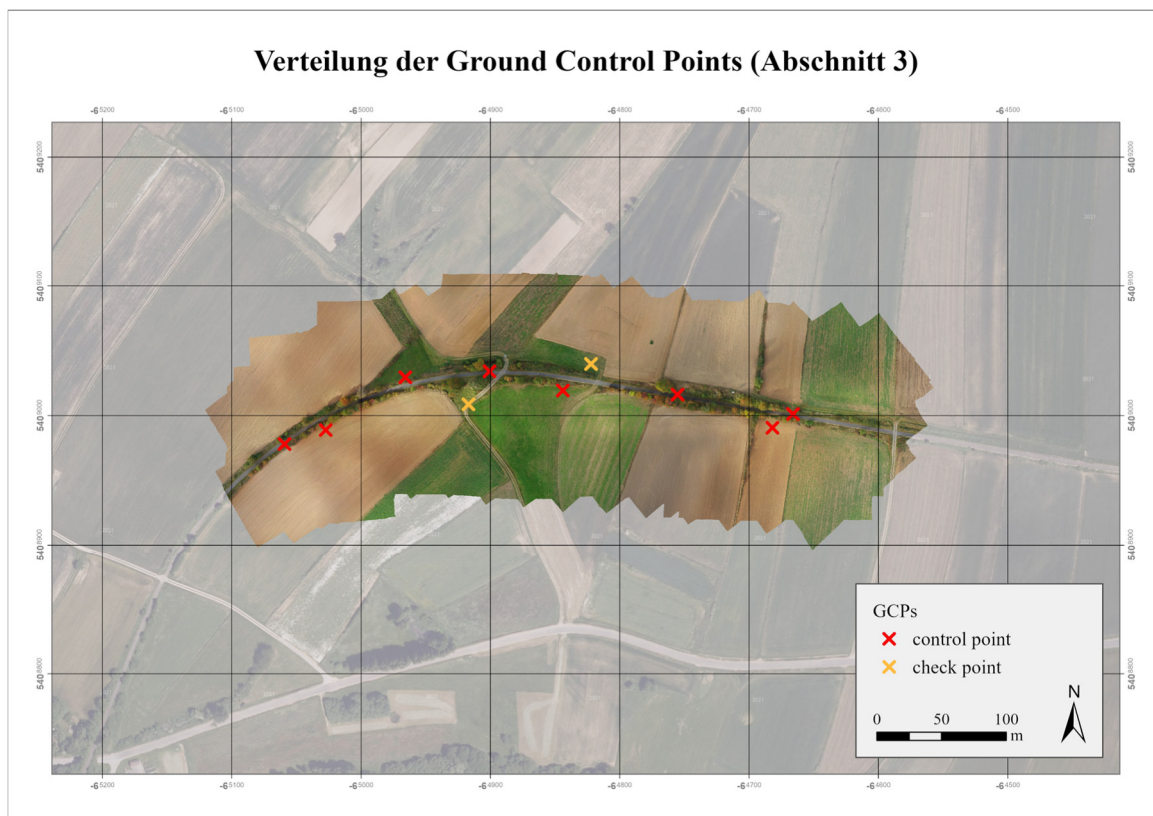


Abbildung 35: Verteilung der GCPs im Abschnitt 3 (eigene Abbildung)

5.2 Vergleich der DOMs

Neben dem eigenen, mit SfM erstellten DOM, stehen für jeden Abschnitt die DOMs des Landes NÖ und des BEV zur Verfügung (siehe Tab. 2). Einen optischen Vergleich aller DOMs bietet folgende Abbildung:

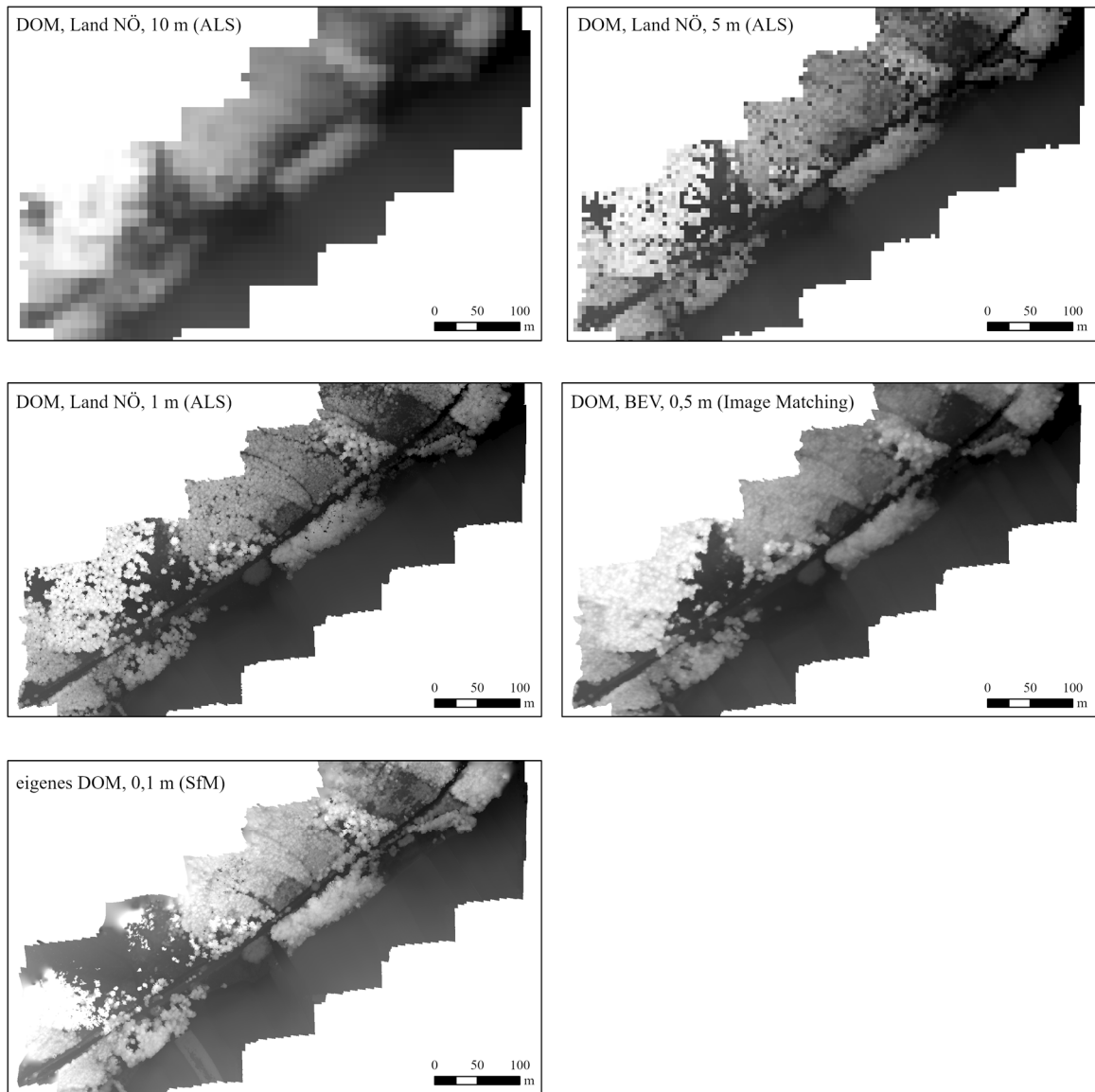


Abbildung 36: Überblick über alle DOMs. Abschnitt 1 (eigene Abbildung)

Die unterschiedlichen räumlichen Auflösungen der DOMs sind deutlich erkennbar. Der Detailgrad nimmt dabei mit der Höhe der räumlichen Auflösung zu. Während der Radweg ab einer Auflösung von 5 m eindeutig erkennbar ist, ist dessen Verlauf bei einer Auflösung von 10 m nicht mehr klar abgrenzbar. Auch die Abgrenzung einzelner Bäume ist im Gegensatz zu den höher aufgelösten DOMs nicht mehr möglich. Beim selbst erstellten DOM mittels SfM (**SfM-DOM**) kann man erkennen, dass die Randbereiche teilweise

verschwimmen, da der Bilddatensatz hier nicht mehr ausreichend dicht für eine Modellierung war.

Einen optischen Vergleich, wie sich die unterschiedliche Auflösung und Erfassungsmethode im Detail auswirken, zeigt Abb. 37. Während bei einer räumlichen Auflösung von 1 m die Bäume realtiv klar unterscheidbar sind, ist dies bei einer Auflösung von 5 m nicht mehr möglich. Trotz einem vergleichsweise geringen Unterschied in der räumlichen Auflöung unterscheiden sich das mit 1 m aufgelöste DOM des Landes NÖ (**ALS-1-DOM**, oben rechts) deutlich vom mittels Image Matching erstellten DOM des BEV mit 0,5 m Auflösung (**IMG-DOM**, unten links). Bei ersterem ist das Blätterdach unterbrochen, während es beim IMG-DOM durchgängig erscheint. Man könnte annehmen, dass dies auf die unterschiedliche Erfassungsmethode zurückzuführen ist, jedoch zeigt sich

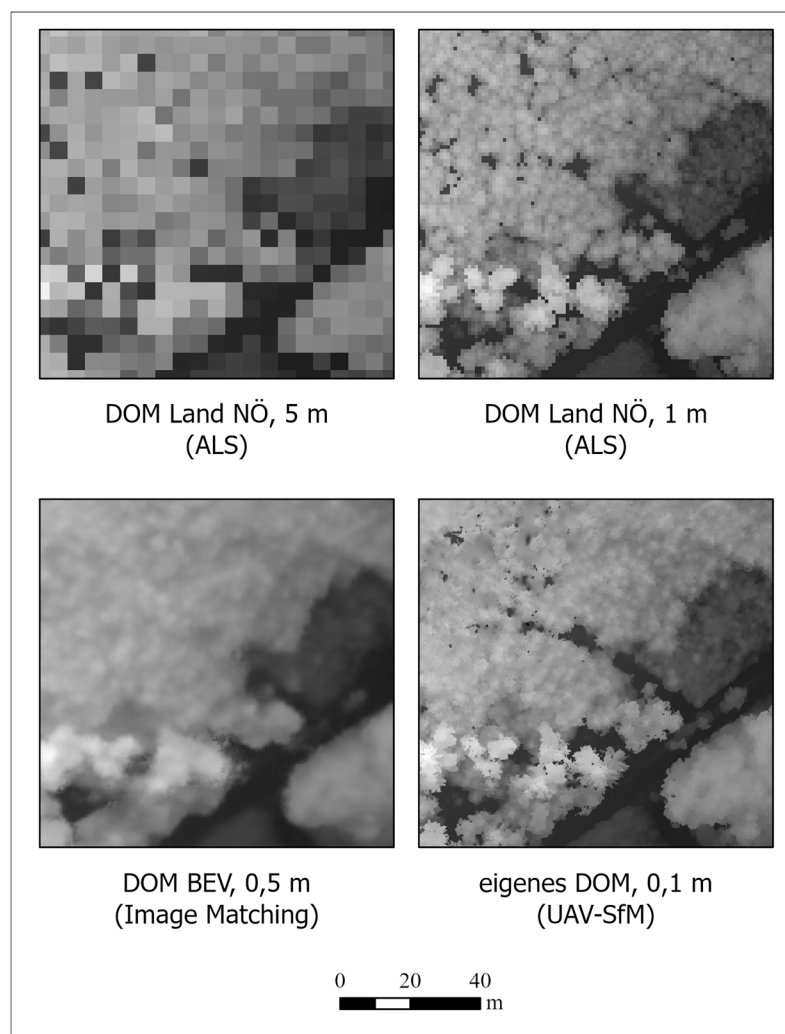


Abbildung 37: Vergleich verschiedener räumlicher Auflösungen und Erfassungsmethoden (eigene Abbildung)

dieser Unterschied, auch beim Vergleich des IMG-DOMS mit dem SfM-DOM, obwohl beide DOMs mittels bildbasierter Verfahren erstellt wurden.

In Abb. 38 ist die Differenz zwischen dem IMG-DOM (b) und dem SfM-DOM (c) für einen Ausschnitt des Abschnitts 2 dargestellt. Dafür wurde das Raster des SfM-DOMs vom Raster des IMG-DOMs subtrahiert. Negative Werte bzw. grüne Bereiche bedeuten, dass das eigene mit SfM erstellte DOM an dieser Stelle im Vergleich zum IMG-DOM größere Höhenwerte aufweist, während rote Bereiche Pixel mit niedrigeren Höhenwerten darstellen. Beim optischen Vergleich der beiden Ausschnitte fällt auf, dass die Bäume und Sträucher entlang des Radweges im IMG-DOM des BEV nicht deutlich erkennbar sind. Das zeigt sich auch in der Differenz der beiden Raster. Beim Bewuchs entlang des Weges weist das SfM-DOM deutlich größere Höhenwerte auf.

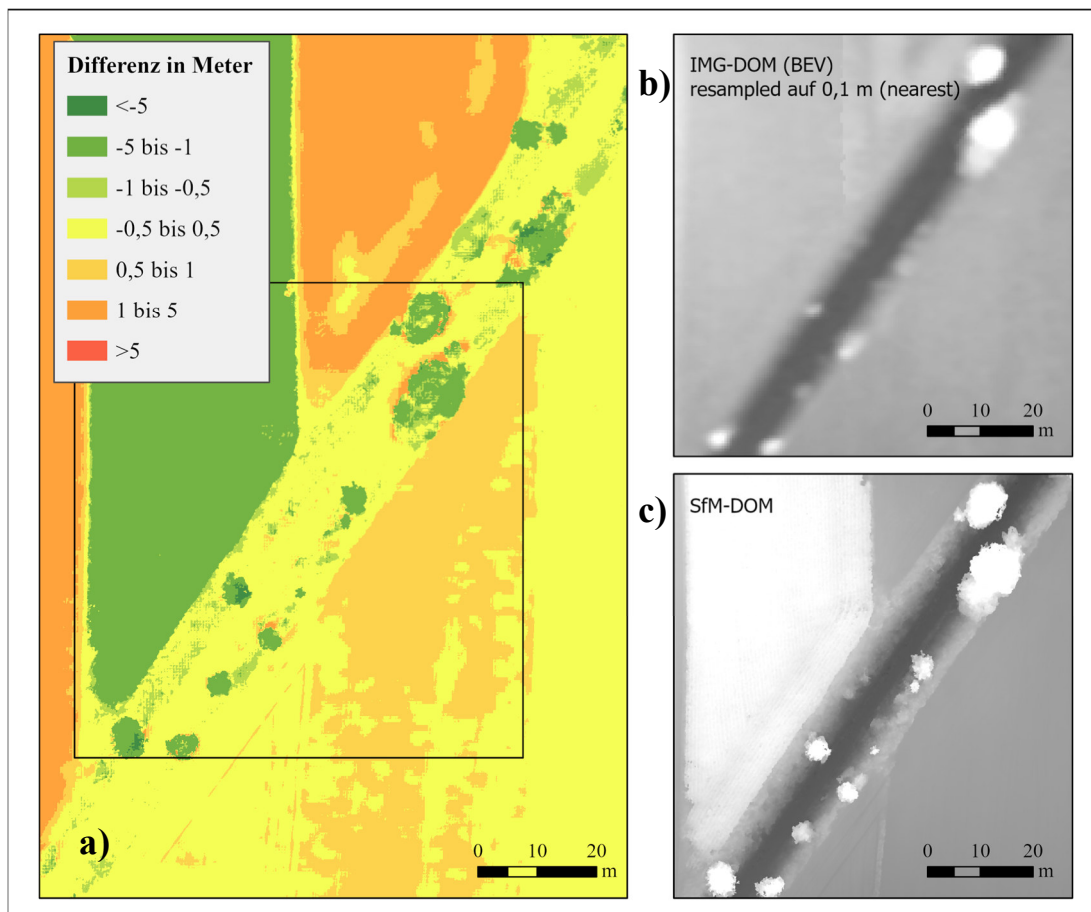


Abbildung 38: a) Differenz zwischen dem IMG-DOM (resampled auf 0,1 m mit der nearest neighbor Methode) und dem SfM-DOM, berechnet durch die Subtraktion des SfM-DOMs vom IMG-DOM; b) Ausschnitt aus dem IMG-DOMs; c) Ausschnitt aus SfM-DOM (eigene Abbildung)

Unterschiede in den DOMs ergeben sich auch aufgrund der unterschiedlichen Aktualität der Datensätze, wie in Abb. 39 ersichtlich ist. Bei der Differenz zwischen dem ALS-1-DOM des Landes NÖ und dem eigenen SfM-DOM für Abschnitt 1 ist deutlich der große, rote Bereich im Südwesten des Abschnitts erkennbar. Im aktuellen Orthofoto wird

ersichtlich, dass die Bäume in dem Bereich nicht mehr existieren, während diese am älteren ALS-1-DOM noch vorhanden waren.

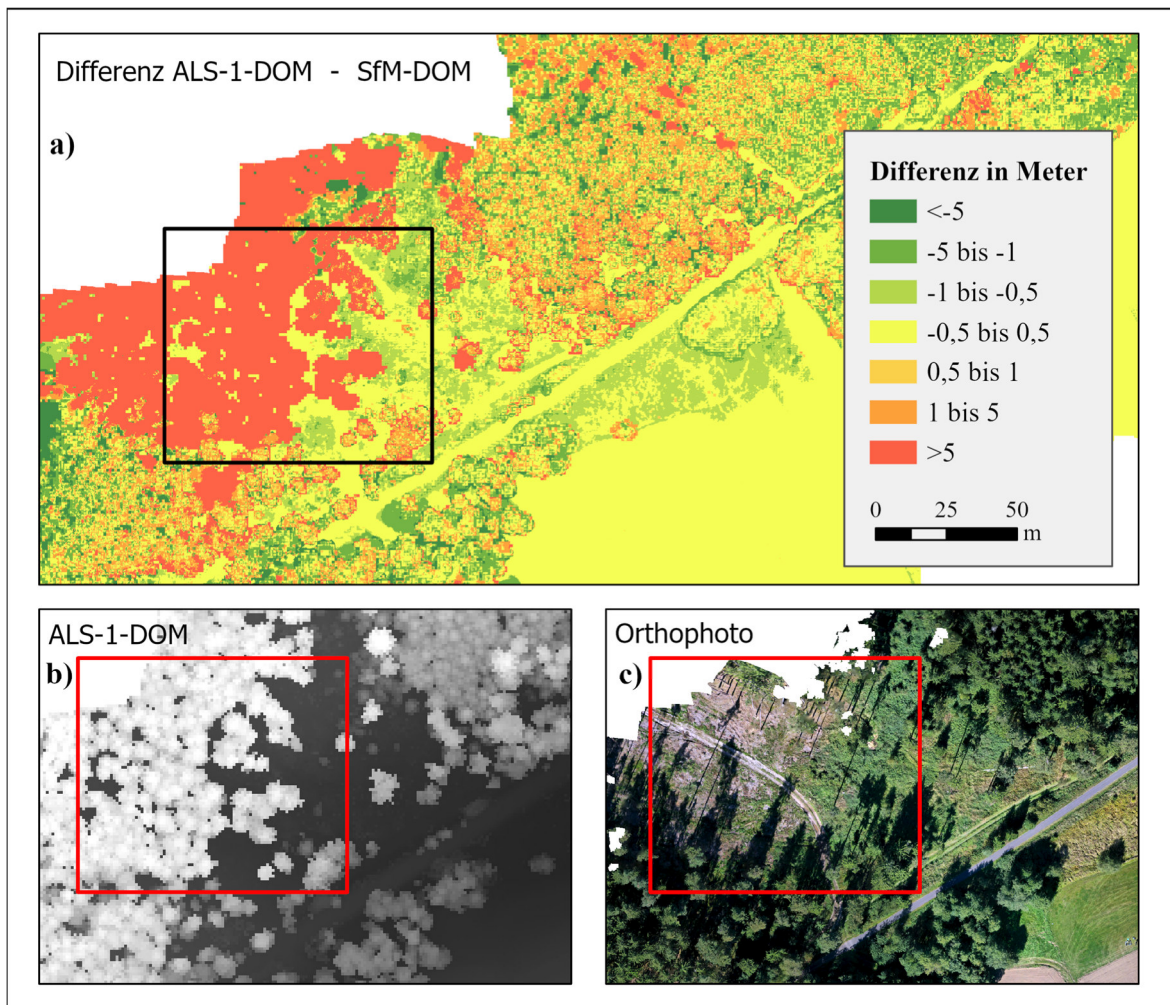


Abbildung 39: a) Differenz zwischen dem ALS-1-DOM und dem eigenen SfM-DOM; b) Ausschnitt aus dem ALS-1-DOM des Landes NÖ; c) Ausschnitt aus dem auf Grundlage der UAV-Befliegung erstellten Orthofoto (eigene Abbildung)

5.3 Ergebnisse der Schattensimulation

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus der GIS-Schattenanalyse auf Grundlage der verschiedenen Digitalen Oberflächenmodelle präsentiert.

5.3.1 Verifizierung mit Orthomosaik

Zunächst wurde die Schattenanalyse für alle DOMs mit dem *Area Solar Radiation Tool* durchgeführt. Die Größe der in die Berechnung einbezogenen Fläche entspricht dabei dem mit der UAV-Befliegung abgedeckten Gebiet pro Abschnitt. Die berechnete Schattenfläche wurde schließlich mit der digitalisierten Schattenfläche verglichen.

Für Abschnitt 1 erfolgte die Datenaufnahme am 25.09.2021 zwischen **13:51** und **14:07 Uhr**. Im Solar Radiation Tool wurde daher genau die Mitte dieser Zeitspanne, nämlich **13:59 Uhr, als Zeitpunkt für die Berechnung** gewählt. Umgerechnet in Sonnenzeit und Dezimalstunden ergibt das den Eingabewert von **13,13**. Die anhand des Orthomosaiks digitalisierte Wegfläche beträgt knapp **1368 m²**, wobei **63 %** dieser Fläche zum Aufnahmezeitpunkt im Schatten liegen:

Tab. 5: Zusammenfassung der Parameter für Abschnitt 1

Parameter Abschnitt 1	
Zeitpunkt der Aufnahme der Luftbilder:	25.09.21, 13:51-14:07 Uhr
Zeitpunkt der Berechnung:	13:59 Uhr; entspricht 13,13 Sonnenzeit in Dezimalstunden
Digitalisierte Wegfläche gesamt	1367,9 m ²
Digitalisierte Schattenfläche:	865,0 m ² ; entspricht 63,24 % der Wegfläche

Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse der Schattenanalyse für die verschiedenen Digitalen Oberflächenmodelle für Abschnitt 1. Die Modelle wurden jeweils in der originären Auflösung, so wie sie zur Verfügung gestellt wurden, für die Analyse herangezogen. Zusätzlich wurde das ALS DOM mit der Auflösung von 5 m einem *Resampling* mit den gängigsten drei Verfahren (*nearest neighbor*, *bilinear*, *cubic*; siehe Kap. 4.6.2) auf 1 m Auflösung unterworfen und ebenfalls in die Analyse inkludiert. Ein *Resampling* der anderen DOMs auf unter 1 m wurde nicht durchgeführt, da dies aufgrund der Rechenzeit nicht praktikabel ist.

Das ALS DOM mit 10 m Auflösung konnte bei keinem der Abschnitte berücksichtigt werden, sowohl das Original als auch die Resampling-Varianten des DOMs. Die Auflösung war zu gering und der schmale Weg wurde im DOM nicht hinreichend repräsentiert, weshalb bei der Analyse auch kein Schatten auf der Wegfläche berechnet werden konnte.

Tab. 6: Ergebnisse der Schattensimulation auf Grundlage der unterschiedlichen DOMs für Abschnitt 1

ABSCHNITT 1	Berechnete Schattenanteil	Korrekt ausgewiesene Schattenfläche	Korrekt ausgewiesene Fläche gesamt
DOM	in % der gesamten Wegfläche	in % der tatsächlichen Schattenfläche	in % der gesamten Wegfläche
SfM 0,1m	61,6	90,8	90,1
Image Matching 0,5m (BEV)	47,1	71,7	80,4
ALS 1m (Land NÖ)	55,4	82,7	86,0
ALS 5m (Land NÖ)	46,4	68,3	76,7
ALS 5m res. 1m (nearest)	57,1	80,4	81,4
ALS 5m res. 1m (bilinear)	40,6	61,6	74,1
ALS 5m res. 1m (cubic)	44,1	66,4	76,6

Die erste Spalte (Tab. 6) gibt an, wie groß der Anteil der berechneten Schattenfläche an der gesamten Wegfläche generell ist, unabhängig davon, ob die ausgewiesene Schattenfläche auch räumlich deckungsgleich mit der tatsächlichen Schattenfläche ist. Der Wert bezieht sich ausschließlich auf die Schattenmenge in Bezug auf die Wegfläche. In Abb. 40 sind die Ergebnisse dieser Berechnung grafisch aufbereitet. Es ist deutlich erkennbar, dass in diesem Abschnitt der Anteil der berechneten Schattenflächen mit allen DOMs unterschätzt wurde. Den größten Anteil an berechneter Schattenfläche weist das mittels SfM erstellte DOM mit knapp 62 % der gesamten Wegfläche auf. Der berechnete Wert liegt dabei nur geringfügig unter dem Anteil der tatsächlichen Schattenfläche. Auch mit dem ALS-1-DOM sowie mit jenem DOM, welches mit der *nearest neighbor* Methode interpoliert wurde (**ALS-5-NEAR-DOM**), konnte die Schattenmenge relativ genau ermittelt werden.

Insgesamt erreicht das SfM-DOM in allen Punkten der Analyse die besten Resultate. Es wurden 90,8 % der digitalisierten Schattenfläche auch in der Analyse als solche ausgewiesen, wie in Spalte 2 ersichtlich ist. Bei diesem Wert wurde also nicht nur die Schattenmenge generell berücksichtigt, sondern auch überprüft, wie die Schattenfläche am Radweg verteilt ist und ob sich die ausgewiesene Schattenfläche räumlich mit der tatsächlichen Schattenfläche deckt, also „korrekt verortet“ wurde.

Die dritte Spalte (Tab. 6) gibt schließlich an, wie hoch der Anteil der gesamten Wegfläche ist, welcher korrekt als schattig oder sonnig ausgewiesen wurde (vgl. Abb. 41, zur Vorgehensweise siehe auch Kap. 4.6.3). In diesem Wert sind also nicht nur die korrekt berechneten Schattenflächen, sondern auch die von der Sonne beschienenen Flächen berücksichtigt. Auch hier weist das SfM-DOM einen ähnlich hohen Wert von über 90 % auf.

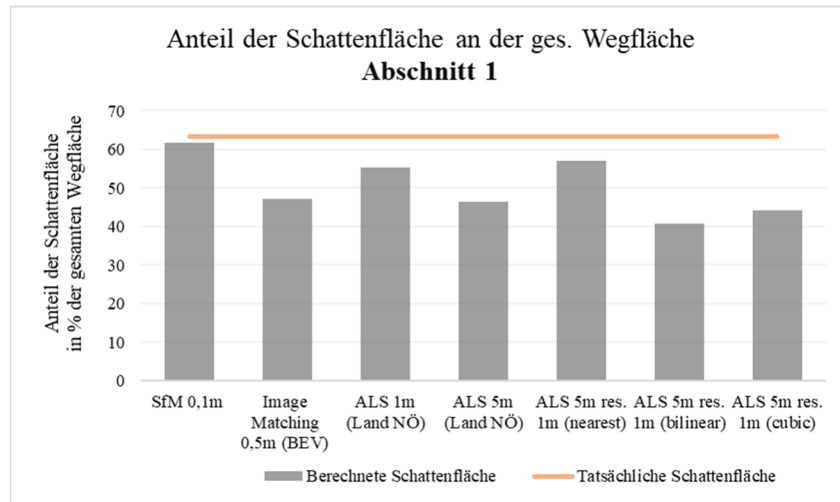


Abbildung 40: Anteil der berechneten (grau) bzw. tatsächlichen (orange) Schattenfläche in Prozent der gesamten Wegfläche (eigene Abbildung)

Interessant ist, dass das ALS-1-DOM mit 1 m Auflösung höhere Werte erzielt als das IMG-DOM mit einer etwas höheren Auflösung von 0,5 m. Der Anteil an berechneter Schattenfläche liegt etwa beim ALS-1-DOM mit 55,4 % um einige Prozentpunkte höher als beim IMG-DOM. Auch wenn man den Anteil an korrekt ausgewiesener Fläche gesamt betrachtet, liegt das ALS DOM vorne.

Betrachtet man die Ergebnisse der mittels verschiedener Resampling-Verfahren auf 1 m interpolierte ALS DOMs, so zeigt sich, dass mit dem **ALS-5-NEAR-DOM** die besten Ergebnisse erzielt wurden. Gesamt wurde mit diesem Modell nicht nur ein höherer Anteil der Wegfläche richtig ausgewiesen als bei dem originalen 5 m ALS DOM (**ALS-5-DOM**), sondern auch ein besseres Ergebnis als mit dem IMG-DOM erreicht.

Die schlechtesten Ergebnisse hinsichtlich der Genauigkeit wurden bei der Analyse mit dem ALS DOM erzielt, welches mit dem bilinearen Resampling-Verfahren von 5 m auf 1 m Auflösung interpoliert wurde (**ALS-5-BI-DOM**). Der Anteil an berechneter Schattenfläche liegt mit rund 41 % deutlich unter dem Anteil der tatsächlichen Schattenfläche von rund 63 %, was auch in Abb. 40 erkennbar ist. Gesamt wurden immerhin knapp 75 % der Wegfläche korrekt als schattig oder sonnig ausgewiesen.

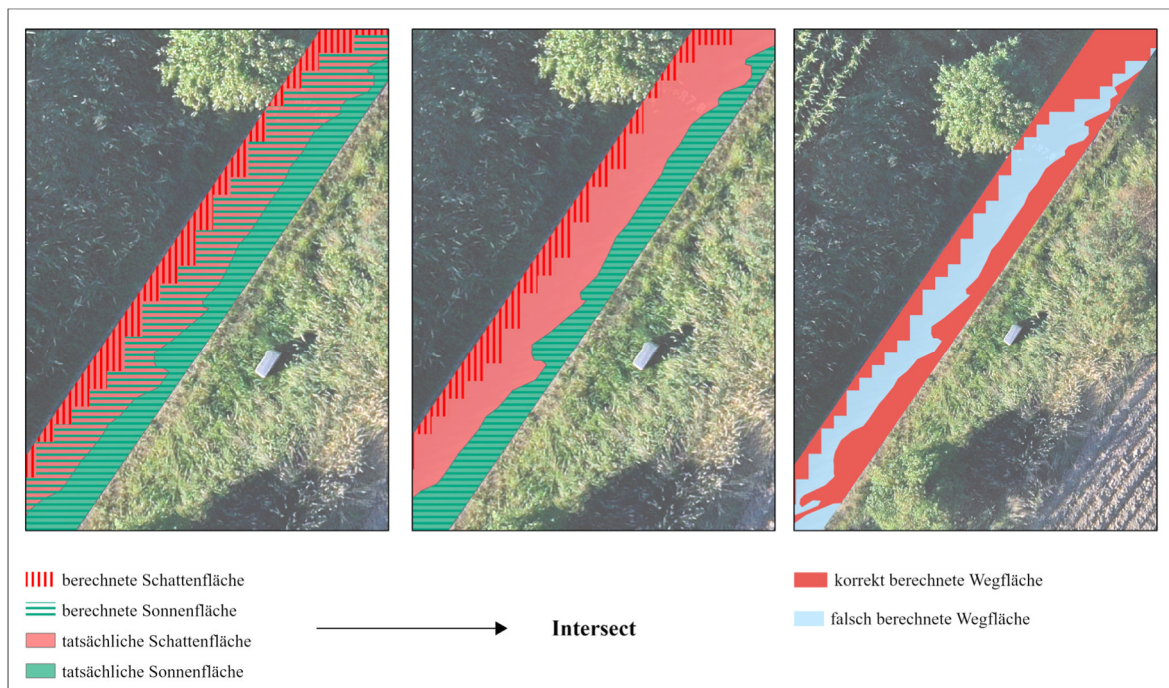


Abbildung 41: Exemplarische Darstellung zur Vorgehensweise, um die gesamte korrekt ausgewiesene Wegfläche zu ermitteln (eigene Abbildung)

Die Befliegung des Abschnitts 2 erfolgte zu einem späteren Zeitpunkt am selben Tag wie Abschnitt 1. Die Bilder wurden zwischen **16:53** und **16:59** Uhr aufgenommen, weshalb **16:56 Uhr (16,1 Sonnenzeit)** als Zeitpunkt für die Berechnung gewählt wurde. Insgesamt wurde eine Wegfläche von knapp **1050 m²** digitalisiert. Aufgrund der im Vergleich zu Abschnitt 1 deutlich weniger dichten Vegetation entlang des Weges ist auch der Anteil der Schattenfläche mit **51 %** niedriger:

Tab. 7: Zusammenfassung der Parameter für Abschnitt 2

Parameter Abschnitt 2	
Zeitpunkt der Aufnahme der Luftbilder:	25.09.21, 16:53-16:59 Uhr
Zeitpunkt der Berechnung:	16:56 Uhr; entspricht 16,1 Sonnenzeit in Dezimalstunden
Digitalisierte Wegfläche gesamt	1049,3 m ²
Digitalisierte Schattenfläche:	535,4 m ² ; entspricht 51,0 % der Wegfläche

Die Ergebnisse der Analyse für Abschnitt 2 sind in Tab. 8 dargelegt. Insgesamt zeigt sich ein ähnliches Bild wie in Abschnitt 1. Das SfM-DOM weist auch hier mit knapp 90 % den höchsten Anteil an korrekt berechneter Fläche und damit ein sehr zufriedenstellendes Ergebnis auf. Im Vergleich zu Abschnitt 1 wird der Schatten jedoch ein wenig überschätzt. Der Anteil der berechneten Schattenfläche liegt bei fast 60 %, während der Anteil der digitalisierten Schattenfläche nur 51 % der Wegfläche beträgt (siehe Abb. 42).

Im Gegensatz dazu unterschätzt das ALS-1-DOM den Schattenanteil recht deutlich mit rund 15 Prozentpunkten, jedoch wurden insgesamt immerhin 80 % der gesamten Wegfläche korrekt ausgewiesen, was nach dem SfM-DOM das zweitbeste Ergebnis ist. Noch deutlicher wurde die Schattenmenge vom IMG-DOM unterschätzt. Im Gegensatz dazu konnte die Schattenmenge mit dem ALS-NEAR-DOM vergleichsweise gut geschätzt werden.

Tab. 8: Ergebnisse der Schattensimulation auf Grundlage der unterschiedlichen DOMs für Abschnitt 2

ABSCHNITT 2	Berechneter Schattenanteil	Korrekt ausgewiesene Schattenfläche	Korrekt ausgewiesene Fläche gesamt
DOM	in % der gesamten Wegfläche	in % der tatsächlichen Schattenfläche	in % der gesamten Wegfläche
SfM 0,1m	59,9	98,1	89,1
Image Matching 0,5m (BEV)	27,9	53,9	76,0
ALS 1m (Land NÖ)	34,6	64,6	80,4
ALS 5m (Land NÖ)	31,3	52,3	71,1
ALS 5m res. 1m (nearest)	42,0	67,6	75,9
ALS 5m res. 1m (bilinear)	13,1	28,6	62,2
ALS 5m res. 1m (cubic)	21,6	38,4	66,6

Besonders deutlich wird in Abschnitt 2, dass die mit bilinearer (**ALS-5-BI-DOM**) oder kubischer Methode (**ALS-5-CU-DOM**) interpolierten ALS DOMs keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern. Mit rund 13 und 21,6 % wird die Schattenfläche sehr deutlich unterschätzt. Insgesamt konnten mit beiden Modellen ca. zwei Drittel der Wegfläche korrekt ausgewiesen werden.

In Abbildung 43 ist die berechnete Schattenfläche für Abschnitt 2 am dreidimensional visualisierten SfM-DOM veranschaulicht. Abbildung 44 zeigt den berechneten Schatten auf Grundlage des SfM-DOMs und des IMG-DOMs im Vergleich. Deutlich erkennbar ist, dass das Schattenmuster mit dem SfM-DOM sehr präzise modelliert werden kann und selbst der Schatten von Sträuchern und höheren Gräsern erfasst wird. An manchen Stellen

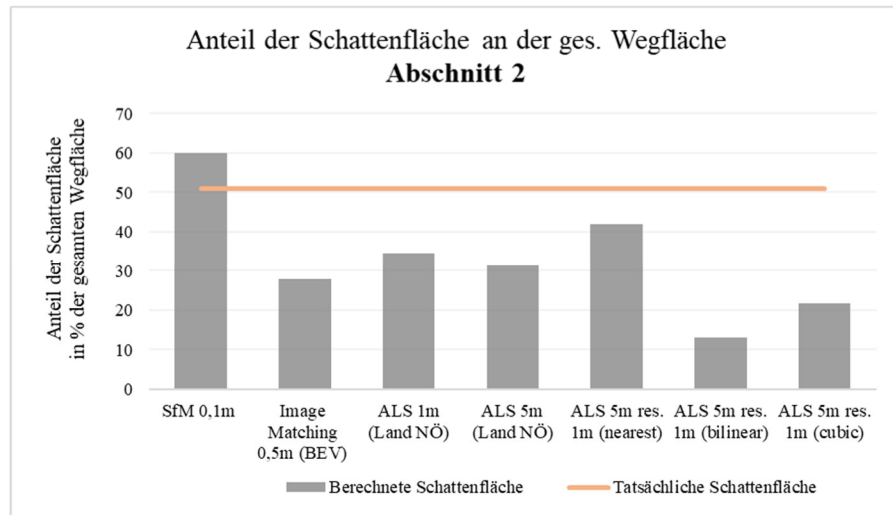


Abbildung 42: Anteil der berechneten (grau) bzw. tatsächlichen (orange) Schattenfläche in Prozent der gesamten Wegfläche (eigene Abbildung)

wird die Schattenfläche etwas überschätzt, was auch daran liegt, dass das Area Solar Radiation Tool keine Halb- bzw. Teilschatten berechnen kann. Im Gegensatz dazu unterschätzt das IMG-DOM die Schattenfläche an einigen Stellen.

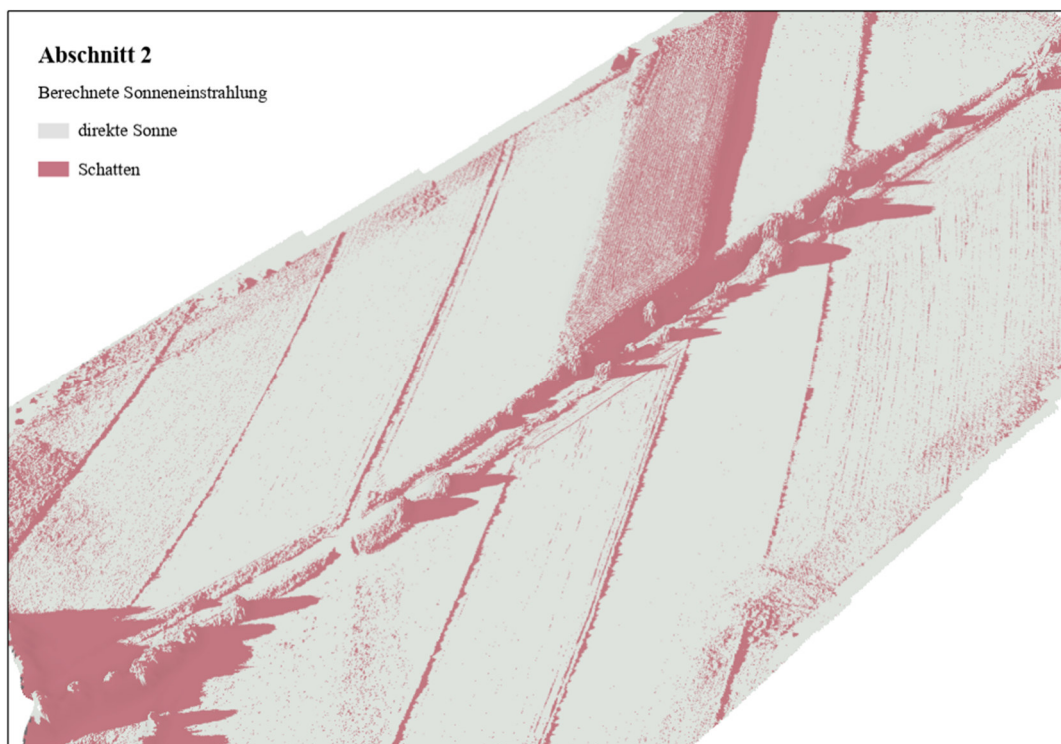


Abbildung 43: Berechnete Schattenfläche für Abschnitt 2 auf Grundlage des SfM-DOMs, visualisiert am dreidimensionalen Modell (eigene Abbildung)

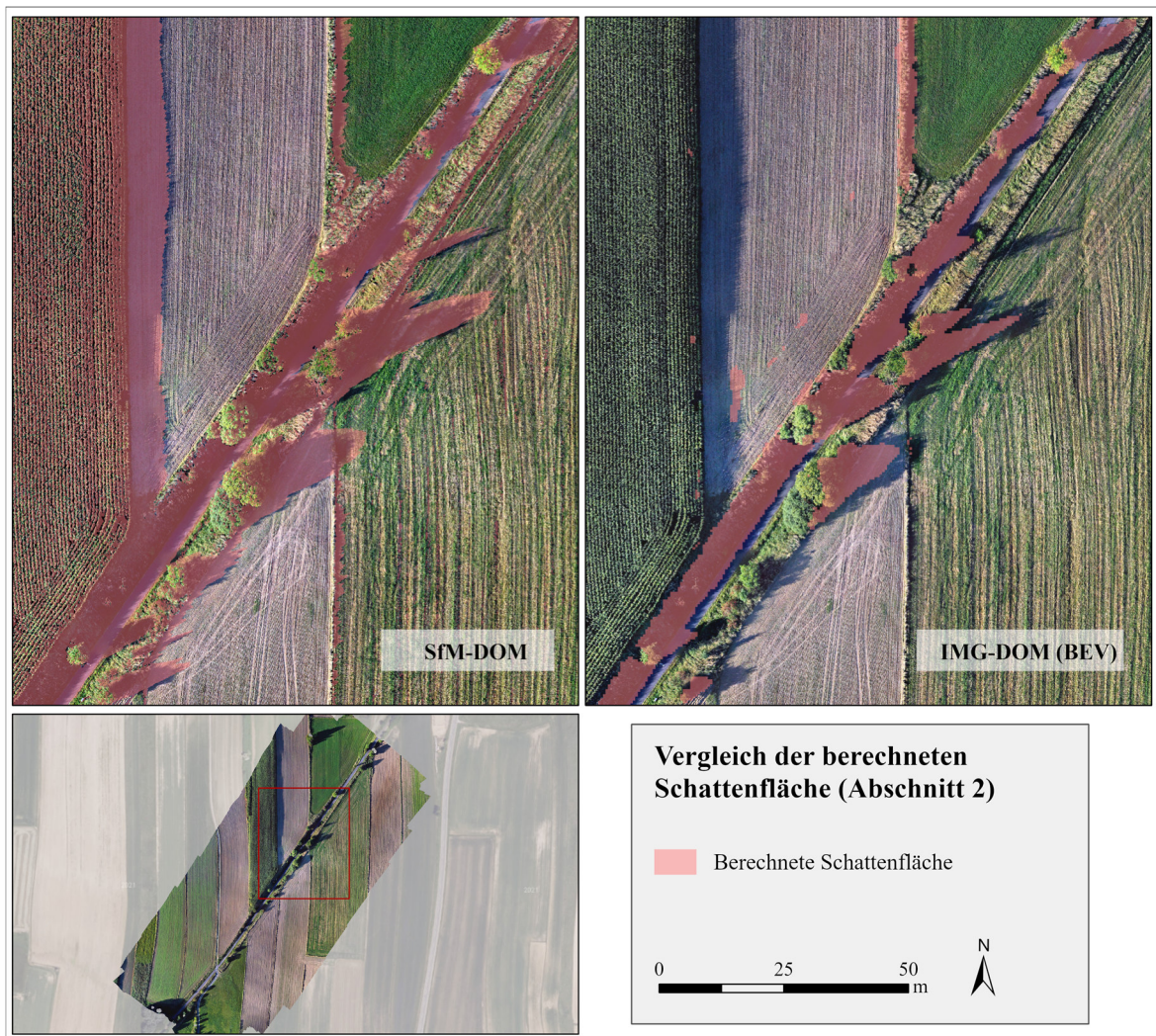


Abbildung 44: Vergleich der berechneten Schattenfläche auf Grundlage des SfM-DOMs und des IMG-DOMs für Abschnitt 2 (eigene Abbildung)

Die Datenaufnahme für Abschnitt 3 wurde an ein paar Tage nach dem ersten Befliegungstag durchgeführt. Die Bilder wurden am 04.10.21 zwischen **15:19** und **15:28** Uhr aufgenommen. Als Zeitpunkt für die Berechnung wurde demnach **15:24 Uhr (14,62 Sonnenzeit)** gewählt. Die gesamte digitalisierte Wegfläche beträgt **1304,5 m²**, wovon **53,3 %** beschattet sind:

Tab. 9: Zusammenfassung der Parameter für Abschnitt 3

Parameter Abschnitt 3	
Zeitpunkt der Aufnahme der Luftbilder:	04.10.21, 15:19-15:28 Uhr
Zeitpunkt der Berechnung:	15:24 Uhr; entspricht 14,62 Sonnenzeit in Dezimalstunden
Digitalisierte Wegfläche gesamt	1304,5 m ²
Digitalisierte Schattenfläche:	695,5 m ² ; entspricht 53,3 % der Wegfläche

Die Dichte und Höhe der Vegetation ist ähnlich zu Abschnitt 2, auch der Anteil an Schattenfläche ist mit 53 % fast gleich hoch. Betrachtet man die Ergebnisse für Abschnitt 3 (Tab. 10), so zeigt sich, dass das SfM-Modell auch hier die höchsten Werte erreicht. Die Berechnung überschätzt dabei geringfügig den digitalisierten Schatten. Im Gegensatz zu den anderen Abschnitten schneidet das ALS-1-DOM mit einem Anteil von 89 % an korrekt ausgewiesener Wegfläche fast gleich gut ab.

Tab. 10: Ergebnisse der Schattensimulation auf Grundlage der unterschiedlichen DOMs für Abschnitt 3

ABSCHNITT 3	Berechnete Schattenanteil	Korrekt ausgewiesene Schattenfläche	Korrekt ausgewiesene Fläche gesamt
DOM	in % der gesamten Wegfläche	in % der tatsächlichen Schattenfläche	in % der gesamten Wegfläche
SfM 0,1m	56,9	94,7	90,8
Image Matching 0,5m (BEV)	41,8	75,1	85,0
ALS 1m (Land NÖ)	48,9	85,6	89,0
ALS 5 m (Land NÖ)	25,6	45,6	69,7
ALS 5m res. 1m (nearest)	46,5	68,0	72,6
ALS 5m res. 1m (bilinear)	29,6	48,5	68,8
ALS 5m res. 1m (cubic)	34,3	54,7	70,7

Besonders ist in diesem Abschnitt auch, dass das IMG-DOM zwar auch in diesem Abschnitt niedrigere Werte als das ALS-1-DOM liefert, allerdings der Abstand zum Ergebnis des SfM-DOMs deutlich niedriger ist. Im Gegensatz dazu konnte das ALS-5-NEAR-DOM etwas schlechtere Ergebnisse als in den anderen beiden Abschnitten erzielen.

In Abb. 45 ist erkennbar, dass auch in diesem Abschnitt der Schatten mit allen DOMs bis auf das SfM-DOM unterschätzt wurde. Das zweitbeste Ergebnis konnte hier mit dem ALS-1-DOM erzielt werden.

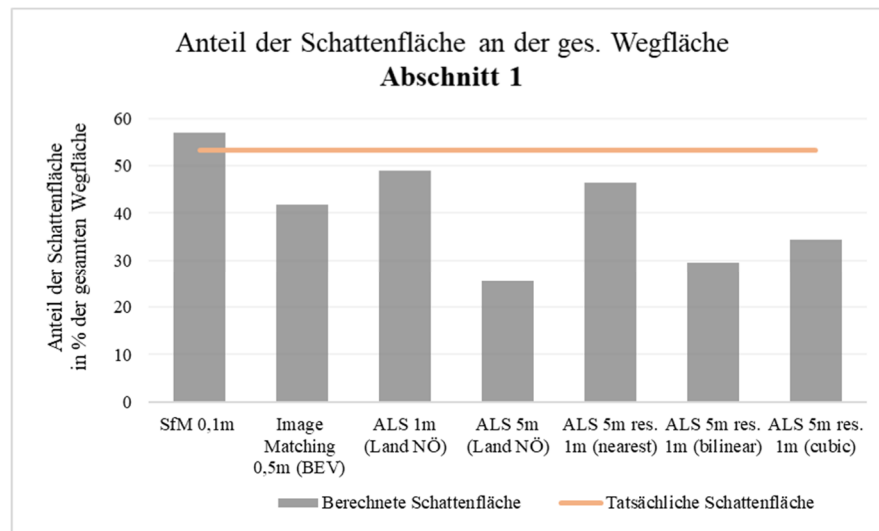


Abbildung 45: Anteil der berechneten (grau) bzw. tatsächlichen (orange) Schattenfläche in Prozent der gesamten Wegfläche (eigene Abbildung)

Abbildung 46 zeigt, wie sich das Resampling der Raster-DOMs auf die Genauigkeit in der Berechnung auswirkt. In roter Farbe dargestellt ist jene Schattenfläche, die auf Grundlage des SfM-DOMs berechnet wurde. In der oberen Karte ist die berechnete Schattenfläche aus dem ALS-5-DOM dargestellt, während die untere Karte den berechneten Schatten auf Grundlage jenes DOMs zeigt, das mittels *nearest neighbor* Verfahren auf 1 m Auflösung interpoliert wurde.

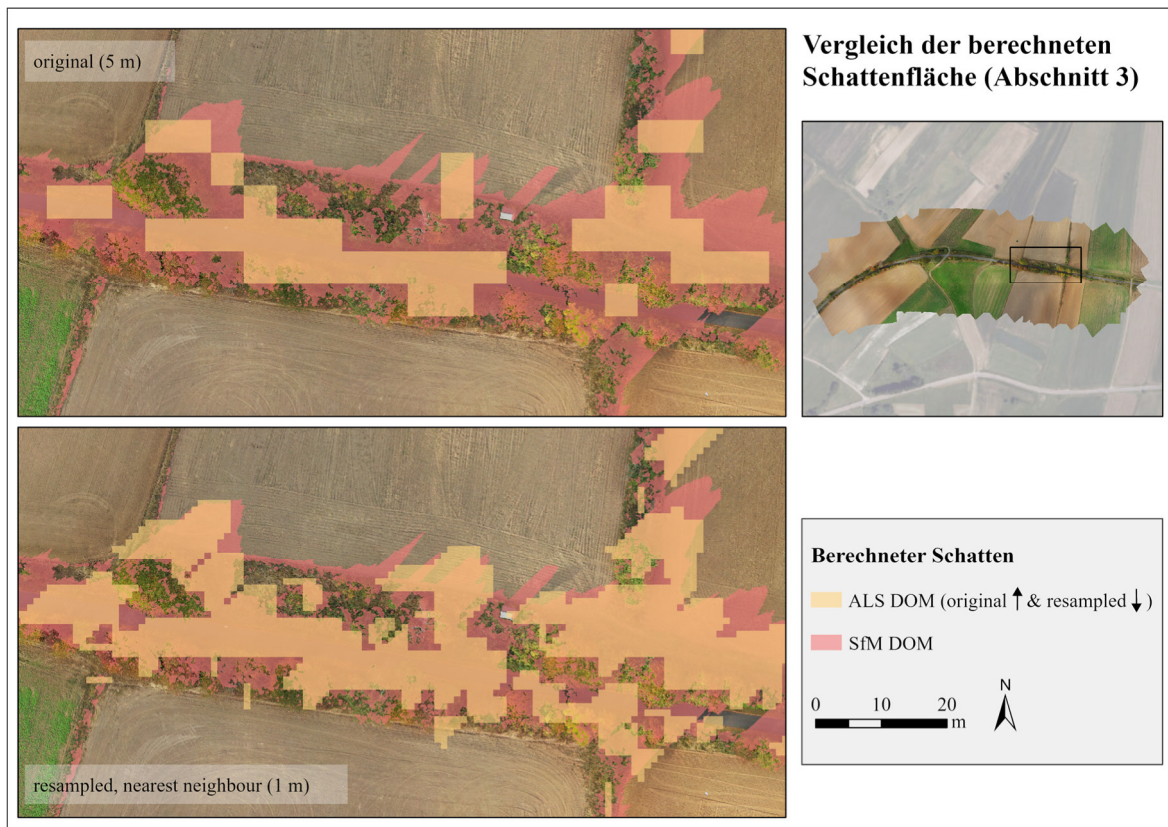


Abbildung 46: Unterschiede im Ergebnis der Schattenanalyse zwischen dem originalen ALS-5-DOM und dem mit der nearest neighbor Methode auf 1 m interpolierten DOM im Vergleich zum berechneten Schatten des SfM-DOMs (eigene Abbildung)

Ein wesentlicher Faktor bei der Berechnung der Sonneneinstrahlung mit dem *Solar Radiation Toolset* ist die Rechendauer. Tabelle 11 zeigt, wie sich die Auflösung auf die Rechendauer auswirkt. Die angegebenen Zeitspannen geben dabei die Rechendauer für eine Fläche von ca. **0,09 km²** an. Für die Berechnung wurde dabei ein handelsüblicher Rechner mit 32 GB RAM und einem Intel Prozessor mit 3.70GHz verwendet. Zu beachten ist, dass hier die Sonnenstrahlung nur zu einer bestimmten Uhrzeit durchgeführt wurde und die Rechenzeit deutlich steigt, sobald man die Sonnenstrahlung für einen längeren Zeitraum berechnen möchte.

Tab. 11: Rechendauer für 0,09 km² mit dem Solar Radiation Toolset, abhängig von der räumlichen Auflösung

räuml. Auflösung	Rechendauer
DOM 10 m	4 Sek.
DOM 5 m	4 Sek.
DOM 1 m	1 Min. 12 Sek.
DOM 0,5 m	9 Min. 32 Sek.
DOM 0,1 m	2 Tage 4 Std. 34 Min.

5.3.2 Verifizierung mit Verifizierungspunkte

Im zweiten Schritt wurde mit dem *Solar Radiation Graphics* Tool für alle Verifizierungspunkt Sichtbarkeitsgrafiken auf Grundlage der verschiedenen DOMs erstellt. So kann für jeden Punkt genau jener Zeitpunkt für die Berechnung festgelegt werden, zu der der Punkt eingemessen und fotografisch dokumentiert wurde, um so die Ergebnisse mit der Beobachtung im Feld abgleichen zu können. Abbildung 47 zeigt für

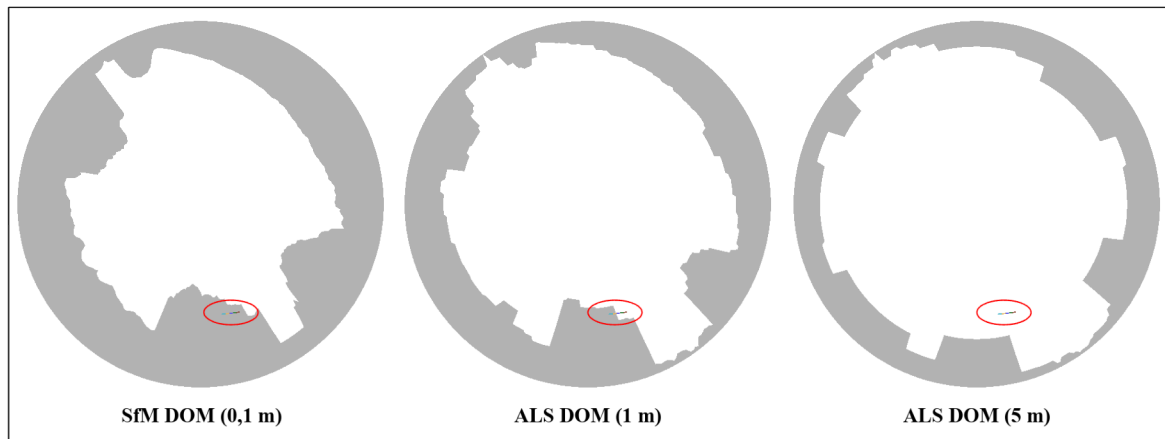


Abbildung 47: Sichtbarkeitsgrafiken anhand unterschiedlicher DOMs für einen Punkt entlang des Weges. In Rot eingekreist ist die Bewegung der Sonne innerhalb von 20 min. Graue Bereiche zeigen die Abschattung durch Topographie bzw. Objekte auf der Erdoberfläche (eigene Abbildung)

einen Punkt beispielhaft, wie sich die Sichtbarkeitsgrafiken ändern, je nachdem welches DOM für die Berechnung verwendet wurde. Grau eingefärbt sind jeweils jene Bereiche, die abgeschattet sind, wenn man von dem Punkt aus nach oben in den Himmel blickt. In Rot eingekreist ist die Bewegung der Sonne über etwa eine halbe Stunde. Ist die Markierung der Sonnenbewegung im grauen Bereich, so befindet sich der Punkt im Schatten. Es wird deutlich, dass die Ergebnisse für die drei verschiedenen DOMs sehr unterschiedlich ausfallen. Während der Punkt die gesamte halbe Stunde im Schatten liegt, wenn die Berechnung auf dem SfM-DOM beruht, befindet sich der Punkt laut Analyseergebnis in der Sonne, wenn das ALS-5-DOM verwendet wird.

Abbildung 48 zeigt die Verteilung der Verifizierungspunkte entlang des Radweges für Abschnitt 1. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die am Orthomosaik sichtbaren Schattenflächen nicht mit den beobachteten Verhältnissen übereinstimmen, da die Datenaufnahme der Verifizierungspunkte an einem anderen Tag und zu einer anderen Uhrzeit als die UAV-Befliegung durchgeführt wurde. Für Abschnitt 1 erfolgte die Einmessung der Verifizierungspunkte am 26.09.2021, zwischen 14:15 und 14:55 Uhr.

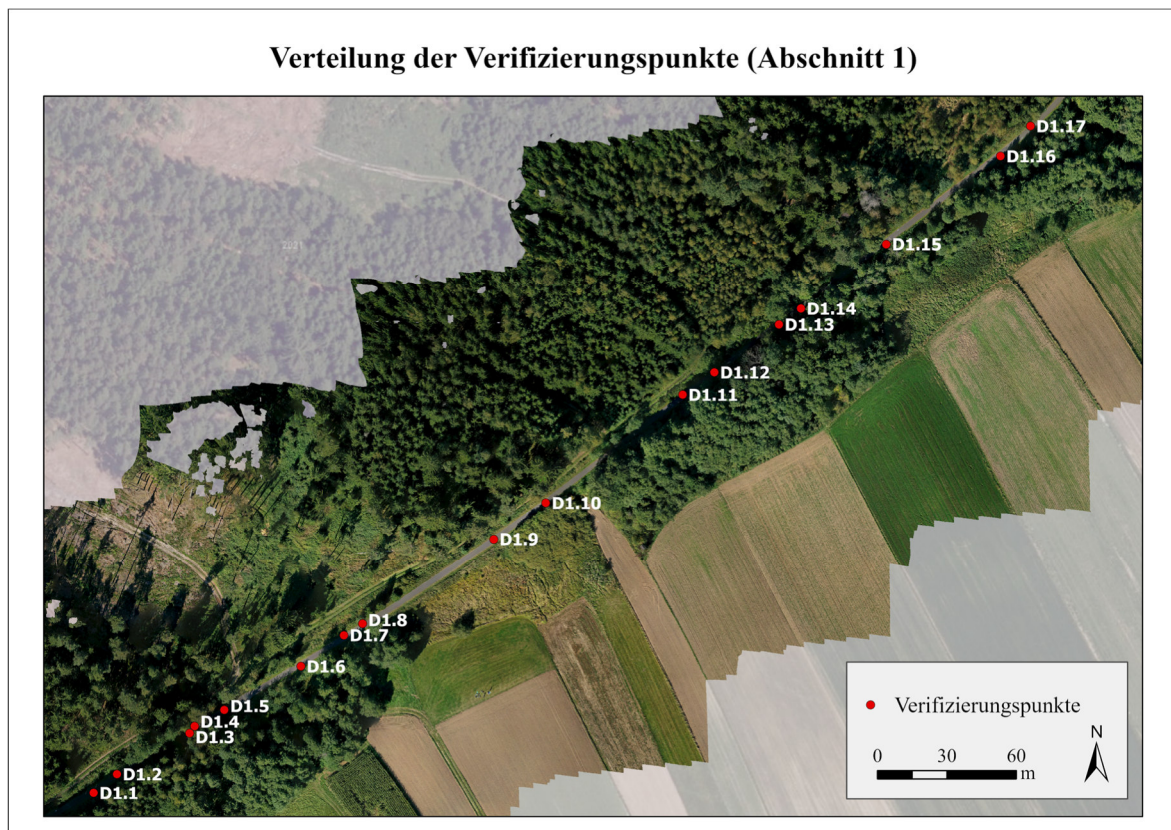


Abbildung 48: Verteilung der Verifizierungspunkte in Abschnitt 1 (eigene Abbildung)

In Tabelle 12 werden nun die im Feld beobachteten Schattenverhältnisse mit den Analyseergebnissen auf Grundlage der unterschiedlichen DOMs verglichen. Dabei zeigt sich ein recht ähnliches Bild wie bei der Analyse der Schattenflächen mit dem *Area Solar Radiation Tool*. Die meisten korrekten Punkte konnten einerseits mit dem eigenen SfM-DOM und andererseits mit dem ALS-1-DOM erreicht werden. Von den insgesamt 17 aufgenommenen Punkten wurden 15 richtig erkannt. Immerhin 13 korrekt ausgewiesene Punkte konnten mit dem IMG-DOM sowie mit dem ALS-5-NEAR und dem ALS-5-CU-DOM erreicht werden. Nur geringfügig schlechter mit 12 von 17 Punkten schneiden die übrigen DOMs ab, was einem Anteil von ca. 70 % an korrekt ausgewiesenen Punkten entspricht.

Auch für Abschnitt 2 wurden Verifizierungspunkte aufgenommen. Insgesamt wurde 13 Punkte am 05.10.2021 zwischen 13:30 und 13:45 Uhr eingemessen. Die Verteilung ist in Abb. 49 ersichtlich.

Die Auswertung ergibt auch hier (Tab. 13), dass mit dem SfM-DOM die meisten Punkte richtig erkannt wurden. Nur ein einziger Punkt wurde nicht korrekt erkannt. Interessant ist hier, dass dieser Punkt nur bei der Berechnung mit dem SfM-DOM fälschlicherweise im Schatten lag, während der Punkt bei der Berechnung mit allen anderen DOMs richtig ausgewiesen wurde. Dass der Schatten mit dem SfM-DOM teilweise überschätzt wird, konnte auch im Abgleich mit dem Orthofoto festgestellt werden.

Tab. 12: Vergleich der Sichtbarkeitsgrafiken auf Grundlage der verschiedenen DOMs mit den Beobachtungen im Feld für die Verifizierungspunkte in Abschnitt 1

Punkt	Zeit	beobachtet	SfM 0,1m	DOM					
				Image Match. 0,5m (BEV)	ALS 1m (Land NÖ)	ALS 5m (Land NÖ)	ALS 5m res. 1m (near.)	ALS 5m res. 1m (bil.)	ALS 5m res. 1m (cubic)
D1.1	14:10	Schatten	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
D1.2	14:14	Schatten	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗
D1.3	14:17	Schatten	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
D1.4	14:20	Sonne	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓
D1.5	14:21	Schatten	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
D1.6	14:24	Schatten	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗
D1.7	14:27	Schatten	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
D1.8	14:29	Sonne	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
D1.9	14:32	Sonne	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
D1.10	14:38	Schatten	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✓
D1.11	14:42	Schatten	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
D1.12	14:43	Schatten	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
D1.13	14:46	Schatten	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
D1.14	14:49	Schatten	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
D1.15	14:51	Sonne	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓
D1.16	14:55	Schatten	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
D1.17	14:57	Sonne	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
KORREKT			15	13	15	12	13	12	13

Das ALS-1-DOM schnitt im Vergleich geringfügig schlechter ab als in Abschnitt 1. Die schlechtesten Ergebnisse für Abschnitt 2 wurden wie auch schon bei der flächenhaften Schattenberechnung mit dem ALS-5-BI und dem ALS-5-CU-DOM erzielt. Dabei wurden 8 von 13 Punkten korrekt erkannt, also nur etwas mehr als die Hälfte der Punkte.

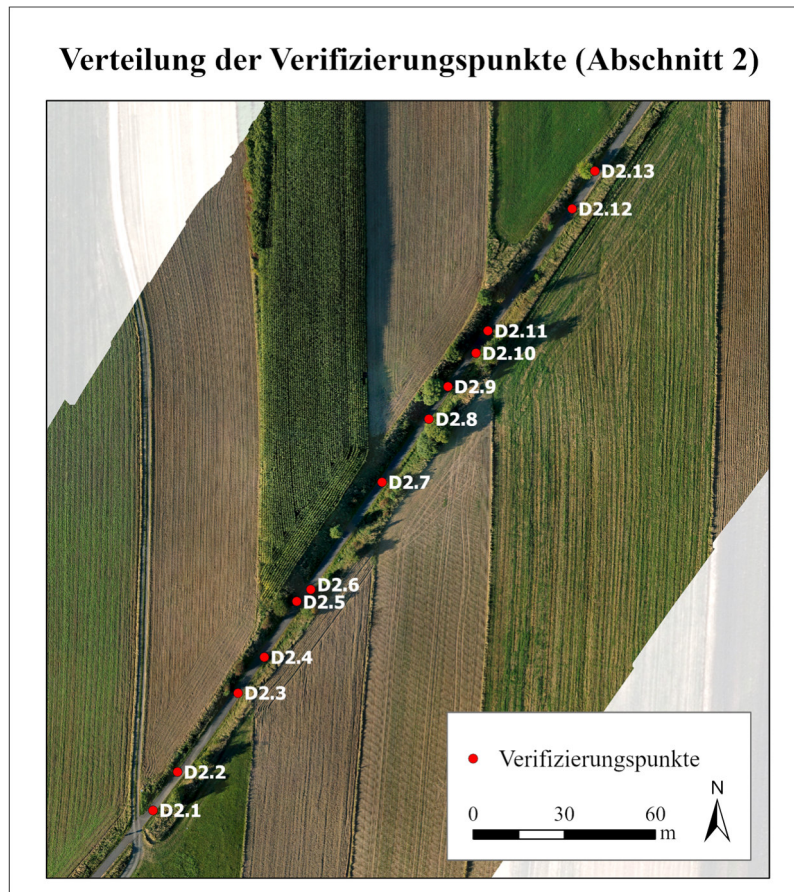


Abbildung 49: Verteilung der Verifizierungspunkte in Abschnitt 2 (eigene Abbildung)

Tab. 13: Vergleich der Sichtbarkeitsgrafiken auf Grundlage der verschiedenen DOMs mit den Beobachtungen im Feld für die Verifizierungspunkte in Abschnitt 2

Punkt	Zeit	beobachtet	SfM 0,1m	DOM					
				Image Match. 0,5m (BEV)	ALS 1m (Land NÖ)	ALS 5m (Land NÖ)	ALS 5m res. 1m (near.)	ALS 5m res. 1m (bil.)	ALS 5m res. 1m (cubic)
D2.1	13:27	Sonne	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
D2.2	13:29	Schatten	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
D2.3	13:31	Sonne	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
D2.4	13:32	Sonne	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
D2.5	13:34	Sonne	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
D2.6	13:36	Schatten	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
D2.7	13:38	Sonne	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
D2.8	13:40	Schatten	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
D2.9	13:42	Schatten	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗
D2.10	13:44	Sonne	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
D2.11	13:45	Schatten	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✗
D2.12	13:48	Sonne	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
D2.13	13:49	Sonne	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
KORREKT			12	10	10	9	10	8	8

5.3.3 Gegenüberstellung & Zusammenfassung der Ergebnisse

Dieses Unterkapitel dient einer Gegenüberstellung und Zusammenfassung der Ergebnisse für alle drei Abschnitte. Tabelle 14 bietet einen Überblick über die Ergebnisse und den zu erwartenden Genauigkeiten je nach DOM. Die erste Spalte der Tabelle zeigt den minimalen und maximalen Anteil an korrekt berechneter Wegfläche für die drei Abschnitte. In Abbildung 50 sind die Ergebnisse grafisch aufbereitet. Während das SfM-DOM über alle Abschnitte nahezu identisch gute Ergebnisse liefert, liegen zwischen niedrigstem und bestem Wert bei den anderen DOMs teilweise einige Prozentpunkte.

Tab. 14: Zusammenfassung der Ergebnisse aus allen drei untersuchten Abschnitten

DOM	Korrekt ausgewiesene Fläche gesamt in % der gesamten Wegfläche (Min. - Max.)	Korrekt berechnete Verifikationspunkte von 30 Punkten ges.	Mittlere Abweichung des berechneten vom tatsächlichen Schattenanteil in Prozentpunkten
SfM 0,1m	89 - 91	27	+ 3,6
Image Matching 0,5m (BEV)	76 - 85	23	- 16,9
ALS 1m (Land NÖ)	80 - 89	25	- 9,5
ALS 5m (Land NÖ)	69 - 77	21	- 21,4
ALS 5m res. 1m (nearest)	73 - 81	23	- 7,3
ALS 5m res. 1m (bilinear)	67 - 77	20	- 28,1
ALS 5m res. 1m (cubic)	67 - 74	21	- 22,5

Die zweite Spalte gibt die Summe der korrekt berechneten Verifikationspunkte für Abschnitt 1 und 2 an. Mit dem SfM-DOM konnten also beispielsweise 27 von 30 zufällig auf dem Weg platzierten Punkte richtig als schattig oder von der Sonne beschienen erkannt werden.

Die dritte Spalte stellt die Abweichung des berechneten Schattenanteils vom tatsächlichen Schattenanteil dar, gemittelt über alle drei Abschnitte. Der Wert gibt also an, um wie viele Prozentpunkte der berechnete Schattenanteil höher oder niedriger ist, als der tatsächliche prozentuale Schattenanteil. Es wurde festgestellt, dass der Schattenanteil mit allen DOMs, bis auf das SfM-DOM, unterschätzt wird. Nur geringfügig unterschätzt wird der Schattenanteil vom ALS-1-DOM sowie vom ALS-5-NEAR-DOM.

In Tabelle 15 sind alle Ergebnisse sowie Vor- und Nachteile insbesondere auch hinsichtlich der Verfügbarkeiten der DOMs noch einmal gegenübergestellt.

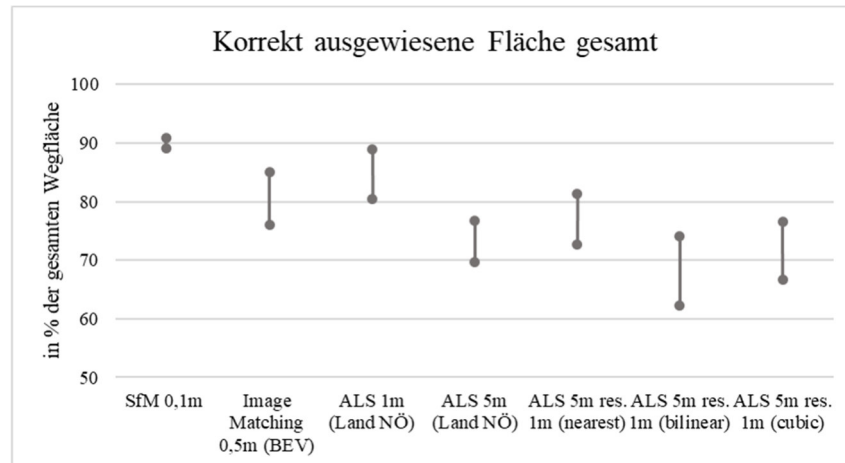


Abbildung 50: Minimal- und Maximalwerte der korrekt ausgewiesenen Fläche gesamt in Prozent der gesamten Wegfläche (eigene Abbildung)

Tab. 15: Zusammenfassung und Gegenüberstellung der Ergebnisse und Verfügbarkeiten (Stand Sept. 2023) der verschiedenen DOMs

SfM 0,1m	- Schattenmenge wird durchschnittlich nur minimal überschätzt - Schattenflächen können sehr genau modelliert werden, auch bei wenig dichter Vegetation	- aufwendige Datenerfassung mit UAV - sehr lange Rechenzeiten
Image Matching 0,5m (BEV)	- Schattenmenge wird insbesondere bei wenig dichter Vegetation unterschätzt - Anteil an korrekt ausgewiesener Fläche mit 80% zufriedenstellend	- flächendeckend vorhanden - festgelegter Aktualisierungszyklus - kostenpflichtige Bestellung - längere Rechenzeiten
ALS 1m (Land NÖ)	zufriedenstellende Ergebnisse in allen Aspekten	- kostenlose Bestellung - kein festgelegter Aktualisierungszyklus
ALS 5m (Land NÖ)	Schattenmenge wird klar unterschätzt	- kostenloser Download - kein festgelegter Aktualisierungszyklus - kurze Rechenzeiten
ALS 5m res. 1m (nearest)	berechneter Schattenanteil stimmt sehr genau mit tatsächlicher Schattenmenge überein	- kostenloser Download - kein festgelegter Aktualisierungszyklus - Resampling erforderlich
ALS 5m res. 1m (bilinear)	Schattenanteil wird stark unterschätzt	- kostenloser Download - kein festgelegter Aktualisierungszyklus - Resampling erforderlich
ALS 5m res. 1m (cubic)	Schattenanteil wird stark unterschätzt	- kostenloser Download - kein festgelegter Aktualisierungszyklus - Resampling erforderlich
ALS 10m (Land NÖ)	Zu niedrige Auflösung, Schattensimulation nicht durchführbar	

6 Diskussion

Vergleicht man die Ergebnisse aus der Schattensimulation im GIS, kann festgestellt werden, dass mit dem SfM-DOM aus eigener UAV-Befliegung die besten Ergebnisse erzielt werden, sowohl beim Vergleich der berechneten Schattenfläche entlang des Radweges als auch beim Abgleich der Sichtbarkeitsgrafiken der Verifikationspunkte. So konnte bei allen drei Abschnitten für rund 90 % der Wegfläche korrekt bestimmt werden, welche Teile des Weges im Schatten liegen und welche von der Sonne beschienen werden. Insbesondere für Abschnitt 1 konnte mit dem SfM-DOM dabei der Anteil der Schattenfläche an der gesamten Wegfläche sehr genau bestimmt werden und der berechnete Schattenanteil entsprach bis auf wenige Prozentpunkte genau dem Anteil der digitalisierten Schattenfläche. Für Abschnitt 2 und 3, welche eine weniger dichte Vegetation aufweisen als Abschnitt 1, wurde der Anteil der Schattenfläche etwas überschätzt, was jedoch nichts am insgesamt besten Ergebnis ändert.

Von den bereits verfügbaren DOMs konnten mit dem ALS-1-DOM des Landes Niederösterreich hinsichtlich der korrekt berechneten Wegfläche die besten Ergebnisse erzielt werden. Betrachtet man den berechneten Schattenanteil, so lag dieser sowohl in Abschnitt 1 als auch in Abschnitt 3 nur wenige Prozentpunkte unter dem Anteil der digitalisierten Schattenfläche. Für Abschnitt 2 wurde der Schattenanteil vergleichsweise recht deutlich unterschätzt, wodurch auch der Anteil an der insgesamt korrekt ausgewiesenen Wegfläche etwas niedriger ausfällt. Ein ähnliches Bild hinsichtlich der Unterschiede zwischen den Abschnitten zeigt sich bei der Auswertung der Sichtbarkeitsgrafiken. Für Abschnitt 1 konnten mit 15 von 17 Punkten gleich viele Punkte richtig bestimmt werden, wie mit dem SfM-DOM, während das ALS-1-DOM im Abschnitt 2 hinsichtlich richtig ausgewiesener Punkte geringfügig schlechter abschnitt.

Vergleicht man das mit 5 m aufgelöste ALS-DOM des Landes NÖ mit den Resampling-Varianten desselben, so ist erkennbar, dass das Resampling auf 1 m Auflösung nur dann zu besseren Ergebnissen führt, wenn das Resampling mit dem *nearest neighbor* Verfahren durchgeführt wird. Insgesamt konnten mit dem ALS-5-NEAR-DOM für 70 bis 80 % der Wegfläche korrekt bestimmt werden, welche Teile im Schatten liegen und welche nicht. Betrachtet man die berechneten Schattenanteil an der gesamten Wegfläche, also die Schattenmenge, konnte mit dem ALS-5-NEAR-DOM sogar das zweitbeste Ergebnis erzielt werden. Interessant ist auch, dass bei Abschnitt 2 mit der geringsten Vegetationsdichte der Abstand zwischen dem originalen ALS-5-DOM und den Resampling-Varianten ALS-5-BI-DOM und ALS-5-CU-DOM am größten ist. Das ALS-5-BI-DOM erzielte dabei in jeder Analyse schlechtere Ergebnisse als das ALS-5-CU-DOM.

Der Vergleich zwischen den DOMs hinsichtlich des berechneten Schattenanteils zeigt, dass der Anteil mit allen DOMs mit Ausnahme des SfM-DOMs in unterschiedlichem Ausmaß unterschätzt wird. Insgesamt ist der Unterschied des berechneten Schattenanteils zwischen dem SfM-DOM und den anderen DOMs bei weniger dichter Vegetation höher als bei sehr dichter, hoher Vegetation. Grund hierfür ist, dass bei hoher Vegetation kleine

Schattenwürfe von Büschen und hohen Gräsern beispielsweise, die in den ALS-DOMs bzw. dem IMG-DOM nicht hinreichend repräsentiert werden, hier weniger ins Gewicht fallen.

Zurückzuführen ist das sehr genaue Ergebnis des SfM-DOMs insbesondere auf die verglichen mit den anderen DOMs sehr hohe räumliche Auflösung, die bei UAV-SfM durch die niedrige Flughöhe erreicht wird. Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die Aktualität des Datensatzes. Die Bilder, mit welchen sowohl das DOM als auch das Orthomosaik zur späteren Verifizierung der Ergebnisse erstellt wurden, stammen aus der gleichen Befliegung.

Besonders interessant ist ein Vergleich zwischen den Ergebnissen des ALS-1-DOMs des Landes NÖ und des IMG-DOMs vom BEV. Obwohl das IMG-DOM mit 0,5 m höher aufgelöst ist, sind die Ergebnisse in allen Analysen schlechter als mit dem ALS-1-DOM und der Schattenanteil an der gesamten Wegfläche wird teilweise deutlich unterschätzt. Dazu kommt, dass die Datenaufnahme für das IMG-DOM im Sommer erfolgte, wo die Vegetation am Höchststand ist. Das lässt vermuten, dass insbesondere die Vegetation im IMG-DOM präziser modelliert werden kann und dementsprechend auch in der Schattenanalyse bessere Ergebnisse erzielt werden können. Dennoch liegt der Anteil der korrekt ausgewiesenen Wegfläche in allen Abschnitten unabhängig der Dichte der Vegetation mehrere Prozentpunkte unter dem Anteil, der mit ALS-1-DOM erzielt werden konnte.

Grund hierfür könnte einerseits die unterschiedliche Erfassungsmethode und andererseits die Aktualität der Datensätze sein. Während das IMG-DOM aus den Bildern der Luftbildbefliegung im Sommer 2018 generiert wurde, wurde die Befliegung für das ALS-1-DOM zwischen Februar und März 2020 durchgeführt. Damit ist der zeitliche Abstand zwischen Datenaufnahme für die Generierung des DOMs und der Aufnahme der UAV-Bilder zur Verifizierung der Ergebnisse beim ALS-1-DOM geringer als beim IMG-DOM. Dass das ALS-DOM des Landes Niederösterreich für das Untersuchungsgebiet aktueller ist, ist aber Zufall. Während der dreijährige Aktualisierungszyklus für die Luftbildbefliegung für Österreich gesetzlich vorgeschrieben ist, gibt es keine Regelung für ALS-Befliegungen. Der ALS-Datensatz des Landes NÖ beinhaltet daher auch Abschnitte, welche zuletzt 2006 aktualisiert wurden. In der Regel ist also davon auszugehen, dass aus der Luftbildbefliegung generierte DOMs der Vermessungsverwaltung aktueller sind, was auch von Ackermann et al. (2020) als Vorteil von Oberflächenmodellen aus Luftbildern gegenüber ALS-Messungen angemerkt wird. Ob ein Vergleich der beiden Modelle in einer anderen Region Niederösterreichs zu anderen Ergebnissen geführt hätte, kann daher nicht eindeutig beurteilt werden.

Dieser Vergleich zeigt jedenfalls, dass höher aufgelöste DOMs nicht automatisch zu besseren Ergebnissen in der Schattenmodellierung führen und die räumliche Auflösung nicht der einzig ausschlaggebende Qualitätsaspekt ist, den es zu beachten gibt. Das IMG-DOM, welches die zweithöchste Auflösung nach dem SfM-DOM aufweist, konnte demnach nicht die zweitbesten Ergebnisse in der Modellierung erzielen. Auch mit dem ALS-5-NEAR-DOM konnten teilweise bessere Ergebnisse erzielt werden.

Ein detaillierter Vergleich der Erfassungsmethoden wie etwa in Widyaningrum und Gorte (2017) ist im Zuge dieser Arbeit jedoch nicht möglich, da die Daten zur Generierung der Modelle nicht zeitgleich aufgenommen wurden.

Die Analyse hat aber jedenfalls gezeigt, dass mit dem hochaufgelösten DOM auf Grundlage von UAV-SfM die Beschattung in einem GIS sehr genau modelliert werden kann. Diese Aussage deckt sich mit den Ergebnissen von Žižlavská et al. (2021), die in ihrer Untersuchung die Eignung von UAV-SfM als Grundlage für Schattenmodellierungen entlang von Radfahrwegen bereits zeigen konnten. In einem anderen (räumlichen) Kontext konnten auch Dugdale et al. (2019) für die Beschattung entlang von Flüssen sowie Yokozawa et al. (2018) für die Beschattung von PV-Anlagen feststellen, dass mittels UAV-Befliegung und SfM generierte Oberflächenmodelle akkurate Ergebnisse liefern.

Im Zuge der eigenen Datenaufnahme im Untersuchungsgebiet konnte jedoch auch festgestellt werden, dass die Kombination aus UAV-Befliegung und SfM verglichen mit flugzeuggestützten Verfahren zwar insgesamt durchaus eine kostengünstige Möglichkeit zur Generierung von DOMs darstellt, diese Methode für den Anwendungsfall der Schattenmodellierung entlang von Radfahrwegen jedoch nur eingeschränkt sinnvoll ist. Neben den rechtlichen Einschränkungen bei der Befliegung spielt der zeitliche Aufwand eine große Rolle. Die Befliegung längerer Abschnitte ist insbesondere aufgrund des Einmessens der GCPs sehr zeitaufwendig. Eine akkurate Georeferenzierung ist allerdings erforderlich, um sinnvolle Ergebnisse zu erzielen. Eine Möglichkeit wäre hier die Verwendung eines RTK-fähigen UAS, wodurch eine Positionsbestimmung im Zentimeterbereich auch ohne GCPs erreicht wird. Dennoch bietet die Datenerfassung vom bemannten Flugzeug aus grundsätzlich den besten Kompromiss aus räumlicher Abdeckung und Bodenauflösung (Carrivick et al. 2016). Neben der Befliegung selbst ist auch die Verarbeitung der Bilder mittels SfM aufgrund der erforderlichen Bildredundanzen sehr speicher- und zeitintensiv.

Obwohl die besten Ergebnisse mit dem SfM-DOM erzielt wurden, muss außerdem beachtet werden, dass hier auch der Schatten von höheren Gräsern beispielsweise berücksichtigt wurde. Diese Schattenflächen sind jedoch für den Anwendungsfall nicht relevant und ein solcher Detailgrad möglicherweise unerwünscht.

Auch mit den verfügbaren DOMs konnte zumindest teilweise eine genaue Schattenmodellierung durchgeführt werden. Eine Ausnahme bildet hier das mit 10 m aufgelöste ALS-DOM. Unabhängig der Erfassungsmethode und des Aufnahmezeitpunkts wurde im Zuge der Analyse festgestellt, dass eine räumliche Auflösung von 10 m nicht ausreicht und eine Modellierung des Schattens damit nicht möglich ist.

Mit dem ALS-1-DOM konnte für das Untersuchungsgebiet jedenfalls eine insgesamt ausreichende Genauigkeit in allen Aspekten erzielt werden. Auch mit dem IMG-DOM konnte ein überwiegender Teil der Wegfläche korrekt als sonnig oder schattig ausgewiesen werden, insgesamt wurde der Schattenanteil an der gesamten Wegfläche allerdings insbesondere bei weniger dichter Vegetation um einige Prozentpunkte unterschätzt. Wird das ALS-5-DOM herangezogen, so wird ein Resampling mit der *nearest neighbor*

Methode auf 1 m Auflösung empfohlen. Insbesondere die Schattenmenge konnte damit sehr akkurat ermittelt werden.

Für die Interpretation der Ergebnisse sei auf einige Limitierungen hingewiesen, die sich aus dem methodischen Vorgehen ergeben.

Als erster Punkt gilt zu bedenken, dass die drei untersuchten Streckenabschnitte trotz etwas unterschiedlicher Vegetationsmuster entlang des Radweges relativ homogen sind und sich außerdem in einer relativ flachen, von sanften Hügeln geprägten Landschaft befinden. Der Schattenwurf wird also hauptsächlich durch die Vegetation am Wegrand verursacht und Reliefunterschiede spielen bei der Beschattung der Wegfläche kaum eine Rolle. Anders würde sich die Ausgangslage in gebirgigen Regionen darstellen, wo der Einfluss des Reliefs auf die Beschattung deutlich höher ist. Die Ergebnisse sind auf andere Regionen mit hohen Reliefunterschieden also nur bedingt übertragbar.

Des Weiteren wurde nicht evaluiert, wie gut künstliche Objekte wie etwa Gebäude in den DOMs repräsentiert werden und wie genau der Schattenwurf von Gebäuden mit den verschiedenen DOMs modelliert werden kann. Der Fokus der Untersuchung lag auf unbebauten Gebieten und dem Schatten, der durch Vegetation entlang der Route verursacht wird. Der Anteil der untersuchten Radroute, der direkt durch Siedlungsgebiet führt, ist außerdem vernachlässigbar gering.

Der zweite Punkt, der zu beachten ist, betrifft die Wahl des Algorithmus zur Schattensimulation. Es wurde keine Evaluierung des Solar Radiation Algorithmus von ArcGIS Pro durchgeführt. Dementsprechend kann nicht garantiert werden, dass bei Verwendung eines anderen GIS-Tools aufbauend auf einem anderen Algorithmus die gleichen Ergebnisse erzielt werden. Schon der optische Vergleich zwischen der modellierten Schattenfläche auf Grundlage des SFM-DOMs und der am Orthomosaik sichtbaren Schattenfläche lässt aber darauf schließen, dass der Algorithmus bei hinreichend genauen Eingangsdaten eine sehr genaue Modellierung des Schattens ermöglicht und die Unterschiede in den Ergebnissen tatsächlich auf den unterschiedlichen Eigenschaften der DOMs zurückzuführen sind.

Die Schattensimulation im GIS auf Basis eines Raster-DOM ermöglicht allerdings keine Berücksichtigung von partiellem Schatten, der zum Beispiel entsteht, wenn Sonnenstrahlen teilweise durch das Blätterdach dringen. Alle Objekte auf der Erdoberfläche werden im DOM bzw. im *Solar Radiation* Tool als für Sonnenlicht undurchlässige Hindernisse behandelt, was auch Žižlavská et al. (2021) für ihre Untersuchung anmerken. Der unter realen Bedingungen entstehende partielle Schatten wird daher als durchgängige, lückenlose Schattenfläche ausgewiesen. Eine theoretische Möglichkeit, diesem Nachteil zumindest etwas entgegenzuwirken, wäre eine Adaptierung der für die Berechnung der Sonnenstrahlung berechneten Sichtbarkeitsfelder. Sofern es sich bei den Objekten, welche den Himmel begrenzen, um (Laub)Bäume bzw. Vegetation generell handelt, könnte hier anstatt der grundsätzlich „undurchlässigen Begrenzungsfläche“ im Sichtfeld ein Alphakanal ergänzt werden. Je nach Jahreszeit und damit je nach Belaubung der Vegetation könnte ein anderes Transparenzlevel festgelegt

werden. Aktuell ist das im *Solar Radiation Tool* allerdings nicht möglich. Beim manuellen Digitalisieren der tatsächlichen Schattenflächen wurde partieller Schatten daher ebenfalls als durchgängige Fläche digitalisiert.

Der dritte Punkt betrifft die Tatsache, dass sowohl Berechnung als auch Verifizierung auf Grundlage des Schattens auf der Erdoberfläche erfolgten und nicht auf einer für Radfahrer:innen relevanten Höhe. Das heißt, dass auch Schattenflächen am Weg aufgrund kleiner Sträucher oder hoher Gräser beispielsweise einbezogen wurden, obwohl sich Radfahrer:innen an diesen Stellen dennoch mit beinahe dem gesamten Körper in der Sonne befinden. Grund hierfür ist die Schwierigkeit der Verifizierung von Schatten über der Erdoberfläche. Eine Verifizierung auf Grundlage des Orthomosaiks und damit eine Quantifizierung der berechneten Schattenfläche ist so nicht durchführbar. Theoretisch wäre es aber möglich, für den Radweg einen bestimmten Offset im Oberflächenmodell zu addieren und im Anschluss die Analyse durchzuführen. Es kann angenommen werden, dass die Ergebnisse dabei die gleiche Genauigkeit aufweisen wie bei der Berechnung auf der Erdoberfläche.

Trotz dieser Limitierungen kann die vorliegende Arbeit durchaus einen ersten Anhaltspunkt hinsichtlich der Eignung verschiedener DOMs für die Schattenmodellierung und den erwartbaren Genauigkeiten bieten. Mit der Untersuchung konnte auch gezeigt werden, dass auf Grundlage eines DOMs im 2,5D-Rasterformat in Kombination mit einem GIS-basierten Sonnenstrahlungs-Tool Schatten – abhängig von der Qualität der Eingangsdaten – sehr akkurat modelliert werden kann. In einigen Studien wurde auf die Einschränkungen in der Modellierung von Sonnenstrahlung mit nicht-dreidimensionalen Daten hingewiesen, vor allem da vertikale Fassaden und komplexe Geometrien nicht ausreichend repräsentiert werden können, insbesondere wenn Sonneneinstrahlung und Schatten auf Gebäudeebene modelliert werden (Liang et al. 2020, Machete et al. 2018). Auch wenn sich die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit nicht auf den urbanen Raum übertragen lassen, wo die Anforderungen aufgrund von tiefen Häuserschluchten beispielsweise anders gestaltet sind, können solche Einschränkungen für den gegebenen Anwendungsfall dieser Arbeit nicht bestätigt werden.

7 Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurden die Anforderungen an Digitale Oberflächenmodelle sowie deren Erfassungsmethoden für eine GIS-basierte Schattensimulation entlang eines Radweges im ländlichen Raum des nördlichen Waldviertels in Niederösterreich untersucht.

Ziel der Arbeit war dabei zunächst, bereits bestehende DOMs für das Untersuchungsgebiet hinsichtlich ihrer Eignung für die Schattensimulation zu evaluieren. Von Seiten der öffentlichen Hand können verschiedene DOMs herangezogen werden, die sich hinsichtlich der Art und des Zeitpunkts der Datenerfassung, der Auflösung sowie ihrer Verfügbarkeit unterscheiden. Für das Untersuchungsgebiet wurden dabei ein DOM des BEV, welches durch Image Matching aus der Luftbildbefliegung generiert wurde, und insgesamt drei DOMs aus einer Airborne Laserscanning Befliegung des Landes Niederösterreich mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen untersucht.

Während die DOMs der Landesvermessung also „klassisch“ aus flugzeuggestützten Erfassungsmethoden stammen, wurde im Zuge der Arbeit auch ein Oberflächenmodell aus eigener UAV-Befliegung und Structure from Motion erzeugt. Die Verwendung von UAVs hat in den letzten beiden Jahrzehnten stark zugenommen und stellt in Kombination mit dem SfM Verfahren eine vergleichsweise kostengünstige Alternative zur Generierung von hochaufgelösten Oberflächenmodellen dar.

Ziel dabei war es herauszufinden, inwiefern durch eine eigene Datenerfassung und Erstellung eines DOMs aus UAV-Befliegung und SfM Verfahren bessere Ergebnisse erreicht werden können. Dafür wurden insgesamt drei Abschnitte mit einer Länge von rund 400 bis 650 m beflogen und in weiterer Folge Oberflächenmodelle dieser Abschnitte mit der SfM-Software Agisoft Metashape erzeugt.

Die Schattensimulation wurde mit dem ArcGIS Pro *Solar Radiation* Toolset von Esri durchgeführt. Die Verifizierung der Ergebnisse erfolgte einerseits mittels aus den Luftbildern der UAV-Befliegung gebildeten Orthomosaiken und andererseits anhand von zufällig generierten Punkten entlang des Weges, welche mittels GNSS eingemessen und deren Beschattung zum jeweiligen Erfassungszeitpunkt dokumentiert wurde.

Hinsichtlich der Anforderungen an die Digitalen Oberflächenmodelle für eine akkurate Schattensimulation konnte festgestellt werden, dass unabhängig der Erfassungsmethode eine räumliche Auflösung von zumindest 5 m erforderlich ist, um eine Schattenmodellierung sinnvoll durchführen zu können. Die Ergebnisse zeigten auch, dass mit einer höheren räumlichen Auflösung nicht automatische bessere Ergebnisse erzielt werden können und auch die Erfassungsmethode und Aktualität des Datensatzes eine Rolle spielen. Es kann jedoch nicht abschließend beurteilt werden, wie stark die einzelnen Faktoren unabhängig voneinander die Ergebnisse beeinflussen.

Die insgesamt besten Ergebnisse konnten mit dem aus eigener Datenerfassung stammenden SfM-DOM erreicht werden. Verglichen mit den unterschiedlichen bereits verfügbaren DOMs ist der Mehrwert einer eigenen Befliegung aber abzuwägen, da die Ergebnisse des SfM-DOMs nur geringfügig besser sind. Insbesondere aufgrund der Gesamtlänge der in dieser Arbeit untersuchten Radroute ist eine Befliegung mit einem sUAS und die Erstellung eines DOMs mittels SfM aus kleinformatigen Luftbildern eigentlich kaum bewältigbar.

Vergleicht man die verfügbaren DOMs, so konnte mit dem ALS-DOM mit 1 m Auflösung (ALS-1-DOM) der Schatten am besten modelliert werden. Auch mit dem IMG-DOM konnte ein überwiegender Teil der Wegfläche korrekt als sonnig oder schattig ausgewiesen werden, wobei der Schattenanteil allerdings insbesondere bei weniger dichter Vegetation um einige Prozentpunkte unterschätzt wurde.

Auch aufgrund der kostenlosen Bereitstellung ist dem ALS-DOM des Landes NÖ im Vergleich zum DOM des BEV für das Untersuchungsgebiet der Vorzug zu geben. Es sollte hierbei jedoch auf die Aktualität des Datensatzes geachtet werden, da die ALS-Befliegung im Gegensatz zur Luftbildbefliegung nicht in einem regelmäßigen Abstand erfolgt und die Datenaufnahme teilweise viele Jahre zurückliegt.

Bei der Verwendung des mit 5 m aufgelösten DOMs konnte mit einem Resampling auf 1 m mit dem *nearest neighbor* Verfahren ebenfalls eine zufriedenstellende Schattenmodellierung durchgeführt werden. Das DOM kann insbesondere dann herangezogen werden, wenn vor allem der Schattenanteil insgesamt relevant ist und die konkrete räumliche Verteilung der Schattenfläche am Radweg eine geringere Rolle spielt.

Weitere Untersuchungen sind jedenfalls notwendig, um den Einfluss der einzelnen Faktoren auf die Genauigkeit der Schattensimulation unabhängig voneinander besser beurteilen zu können. Offen bleibt auch die Frage der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Radwege mit anderen (naturräumlichen) Gegebenheiten, etwa wenn die Route durch gebirgige Regionen führt. Mit dem Versuch, die Forschungslücke für den nicht-urbanen Raum zu schließen, bietet die vorliegende Arbeit dennoch einen ersten Anhaltspunkt hinsichtlich der Eignung verschiedener Oberflächenmodelle für eine GIS-basierte Schattensimulation und der erwartbaren Genauigkeiten.

8 Literaturverzeichnis

Aber, J.; Marzolff, I.; Ries, J.; Aber, S. (2019): Small-Format Aerial Photography and UAS Imagery. Principles, Techniques, and Geoscience Applications: Elsevier.

Ackermann, J.; Adler, P.; Aufreiter, C.; Bauerhansl, C.; Bucher, T.; Franz, S. et al. (2020): Oberflächenmodelle aus Luftbildern für forstliche Anwendungen: Leitfaden AFL 2020: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL (WSL Berichte, 87). Online verfügbar unter <https://elib.dlr.de/133941/>.

AdV - Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (2021): Produkt- und Qualitätsstandard für Digitale Oberflächenmodelle (DOM). Version 1.1.

Amt der NÖ Landesregierung (o. J.): NÖ Geodatenangebot. Online verfügbar unter https://www.noe.gv.at/noe/Karten-Geoinformationen/NOE_Geodaten_Angebot.html, zuletzt aktualisiert am 08.02.2021, zuletzt geprüft am 01.06.2022.

Amt der NÖ Landesregierung (2015): Naturschutzkonzept Niederösterreich. Online verfügbar unter <https://link-springer-com.uaccess.univie.ac.at/content/pdf/10.1007/s12371-017-0219-2.pdf>, zuletzt geprüft am 27.05.2022.

APCC (Hg.) (2018): Österreichischer Special Report Gesundheit, Demographie und Klimawandel (ASR18). Austrian special report 2018 (ASR18) = Austrian special report health, demography and climate change. Austrian Panel on Climate Change. Wien: Österreichische Akademie der Wissenschaften. Online verfügbar unter <http://hdl.handle.net/11159/3518>.

Austro Control (o. J.): Das neue europäische Drohnen-Regulativ. Online verfügbar unter https://www.dronespace.at/eu_regulativ, zuletzt geprüft am 07.12.2021.

Bachiller-Jareno, N.; Hutchins, M. G.; Bowes, M. J.; Charlton, M. B.; Orr, H. G. (2019): A novel application of remote sensing for modelling impacts of tree shading on water quality. In: *Journal of environmental management* 230, S. 33–42. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.09.037.

Beraldin, J.; Blais, F.; Lohr, U. (2011): Laser Scanning Technology. In: George Vosselman und Hans-Gerd Maas (Hg.): Airborne and terrestrial laser scanning. repr. Dunbeath, Boca Raton, Fla.: Whittles; CRC Press.

BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (o. J.a): APOS - Austrian Positioning Service. Online verfügbar unter https://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,1571538&_dad=portal&_schema=PORTAL, zuletzt geprüft am 05.07.2022.

BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (o. J.b): BEV Transformator 3.0. Online verfügbar unter <https://transformator.bev.gv.at/at.gv.bev.transformator/>, zuletzt aktualisiert am 15.05.2023, zuletzt geprüft am 22.05.2023.

BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (o. J.c): Digitales

Oberflächenmodell. Online verfügbar unter

https://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,2875569&_dad=portal&_schema=PORTAL, zuletzt geprüft am 01.06.2022.

BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (2019): BEV - Fernerkundung.

Online verfügbar unter

https://www.bev.gv.at/pls/portal/docs/PAGE/BEV_PORTAL_CONTENT_ALLGEMEIN/0550_SUPPORT/0500_DOWNLOADS/PRODUKTFOLDER/Fernerkundung-Folder.pdf, zuletzt geprüft am 19.05.2023.

BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (2020): Höhenreferenzsysteme.

Online verfügbar unter https://www.bev.gv.at/dam/jcr:bc04f1f3-40ca-4da6-80e8-da038f1c653b/Hoehenreferenzsysteme_2020.pdf, zuletzt geprüft am 19.05.2023.

Bill, R. (2016): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. 6., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Offenbach: Wichmann. Online verfügbar unter

http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783879076086.

Carrivick, J.; Smith, M.; Quincey, D. (2016): Structure from motion in the geosciences. Chichester West Sussex UK, Ames Iowa: Wiley Blackwell.

Chen, J.; Dowman, I.; Li, S.; Li, Z.; Madden, M.; Mills, J. et al. (2016): Information from imagery: ISPRS scientific vision and research agenda. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115, S. 3–21. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.09.008.

Cheung, H. K.W.; Coles, D.; Levermore, G. J. (2016): Urban heat island analysis of Greater Manchester, UK using sky view factor analysis. In: *Building Services Engineering Research and Technology* 37 (1), S. 5–17. DOI: 10.1177/0143624415588890.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (o. J.): Tandem-X. Online verfügbar unter https://www.d-copernicus.de/daten/satelliten/satelliten-details/news/tandem-x/?tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=fd3c044296e5daea68e8ae4e423d77e, zuletzt geprüft am 19.05.2023.

Dugdale, S.; Malcolm, I.; Hannah, D. (2019): Drone-based Structure-from-Motion provides accurate forest canopy data to assess shading effects in river temperature models. In: *The Science of the total environment* 678, S. 326–340. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.229.

ESRI (o. J.a): Area Solar Radiation (Spatial Analyst). Online verfügbar unter <https://pro.arcgis.com/de/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/modeling-solar-radiation.htm>, zuletzt geprüft am 03.05.2022.

ESRI (o. J.b): Resampling (Data Management) - ArcGIS Pro | Dokumentation. Online verfügbar unter <https://pro.arcgis.com/de/pro-app/latest/tool-reference/data-management/resample.htm>, zuletzt aktualisiert am 11.03.2023, zuletzt geprüft am 30.06.2023.

ESRI (o. J.c): Zellengröße bei Raster-Daten - ArcMap | Dokumentation. Online verfügbar unter <https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/cell-size-of-raster-data.htm>, zuletzt aktualisiert am 12.01.2022, zuletzt geprüft am 06.07.2023.

Faka, A.; Kalogeropoulos, K.; Roumelis, S.; Karamolegos, M.; Chalkias, C. (2019): Exposure of the road network to direct sunlight: a spatiotemporal analysis using GIS and spatial video. In: *Annals of GIS* 25 (1), S. 9–17. DOI: 10.1080/19475683.2018.1543206.

Fink, M. H.; Moog, O.; Wimmer, R. (2000): Fließgewässer-Naturräume Österreichs. Wien: Umweltbundesamt (Monographien / Umweltbundesamt, Bd. 128). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/M128.pdf>, zuletzt geprüft am 25.05.2022.

Fogl, M.; Moudrý, V. (2016): Influence of vegetation canopies on solar potential in urban environments. In: *Applied Geography* 66, S. 73–80. DOI: 10.1016/j.apgeog.2015.11.011.

Förster, H. (2017): Sport und Umweltbedingungen. In: Rochus Pokan, Peter Hofmann, Eveline Ledl-Kurkowski, Manfred Wonisch, Holger Förster und Helmut Hörtnagl (Hg.): *Kompandium der Sportmedizin. Physiologie, Innere Medizin und Pädiatrie*. 2. Auflage. Wien: Springer (Springer eBook Collection Medicine), S. 485–494.

Freitas, S.; Catita, C.; Redweik, P.; Brito, M. C. (2015): Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, S. 915–931. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.060.

Fu, P.; Rich, P. (2000): The Solar Analyst 1.0 Manual. Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), USA. Online verfügbar unter <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=063D78F145F3244277FE555E1BBF4AC9?doi=10.1.1.98.1271&rep=rep1&type=pdf>, zuletzt geprüft am 20.03.2023.

Fu, P.; Rich, P. (2002): A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 37 (1-3), S. 25–35. DOI: 10.1016/S0168-1699(02)00115-1.

Gonçalves, G. (2006): Analysis of interpolation errors in urban digital surface models created from lidar data. In: *Proceedings of 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*. Lissabon, Portugal, 5. –7. Juli 2006, S. 160–168.

Heinrich, M. (2017): Fotografische Grundlagen. In: M. Heinrich (Hg.): *Basics Architekturfotografie*. Basel/Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH (Basics Ser), S. 11–18.

Heipke, C. (2017): Photogrammetrie und Fernerkundung – eine Einführung. In: C. Heipke (Hg.): *Photogrammetrie und Fernerkundung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Hirschmüller, H. (2008): Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. In: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 30 (2), S. 328–341. DOI: 10.1109/TPAMI.2007.1166.

- Hofierka, J.; Suri, M. (2002):** The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. In: *Proceedings of the Open source GIS-GRASS users conference 2002*, S. 51–70.
- Hollaus, M.; Mandlbauer, G.; Pfeifer, N.; Mücke, W. (2010):** Land cover dependent derivation of digital surface models from airborne laser scanning data. In: N. Paparoditis, M. Pierrot-Deseilligny, C. Mallet und O. Tournaire (Hg.): *IAPRS*, Vol. XXXVIII, Part 3A. Saint-Mandé, France, 1. - 3. September 2010, S. 221–226.
- Iglhaut, J.; Cabo, C.; Puliti, S.; Piermattei, L.; O'Connor, J.; Rosette, J. (2019):** Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review. In: *Curr Forestry Rep* 5 (3), S. 155–168. DOI: 10.1007/s40725-019-00094-3.
- Ilk, K. H. (2021):** Bezugssysteme. 1. Aufl. 2021. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Grundlagen der Physikalischen und Mathematischen Geodäsie).
- Jäger, E.; Patzschke, S.; Heipke, C. (2020):** Geotopographie und Photogrammetrie. In: K. Kummer, T. Kötter, H. Kutterer und S. Ostrau (Hg.): *Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen 2020*. Berlin: Wichmann.
- Kaluza, T.; Sojka, M.; Wróżyński, R.; Jaskula, J.; Zaborowski, S.; Hämmerling, M. (2020):** Modeling of River Channel Shading as a Factor for Changes in Hydromorphological Conditions of Small Lowland Rivers. In: *Water* 12 (2), S. 527. DOI: 10.3390/w12020527.
- Konecny, G.; Lehmann, G. (2019):** Photogrammetrie. 4. völlig Neubearb. Aufl. Reprint 2019. Berlin, Boston: De Gruyter (De Gruyter Lehrbuch). Online verfügbar unter http://purl.org/coar/access_right/c_16ec.
- Kraus, K. (2004):** Photogrammetrie. Band 1: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. 7., vollständig bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, New York: Walter de Gruyter (De Gruyter Lehrbuch).
- Lange, N. de (2020):** Geoinformatik in Theorie und Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Li, X.; Ratti, C. (2018):** Mapping the spatial distribution of shade provision of street trees in Boston using Google Street View panoramas. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 31, S. 109–119. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.02.013.
- Li, Z.; Zhu, Q.; Gold, C. (2005):** Digital terrain modeling. Principles and methodology. New York: CRC Press.
- Liang, J.; Gong, J.; Li, W.; Ibrahim, A. N. (2014):** A visualization-oriented 3D method for efficient computation of urban solar radiation based on 3D–2D surface mapping. In: *International Journal of Geographical Information Science* 28 (4), S. 780–798. DOI: 10.1080/13658816.2014.880168.
- Liang, J.; Gong, J.; Xie, X.; Sun, J. (2020):** Solar3D: An Open-Source Tool for Estimating Solar Radiation in Urban Environments. In: *IJGI* 9 (9), S. 524. DOI: 10.3390/ijgi9090524.

Liao, J.; Zhou, J.; Yang, W. (2021): Comparing LiDAR and SfM digital surface models for three land cover types. In: *Open Geosciences* 13 (1), S. 497–504. DOI: 10.1515/geo-2020-0257.

Lin, T.-P.; Matzarakis, A.; Hwang, R.-L. (2010): Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. In: *Building and Environment* 45 (1), S. 213–221. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.06.002.

Liu, M.; Bárdossy, A.; Li, J.; Jiang, Y. (2012): GIS-based modelling of topography-induced solar radiation variability in complex terrain for data sparse region. In: *International Journal of Geographical Information Science* 26 (7), S. 1281–1308. DOI: 10.1080/13658816.2011.641969.

Loicq, P.; Moatar, F.; Jullian, Y.; Dugdale, S.; Hannah, D. (2018): Improving representation of riparian vegetation shading in a regional stream temperature model using LiDAR data. In: *The Science of the total environment* 624, S. 480–490. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.129.

Luethy, J. (2007): Entwicklung eines Qualitätsmodells für die Generierung von Digitalen Geländemodellen aus Airborne Laser Scanning. Dissertation. ETH Zürich, Zürich. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/292318222_Entwicklung_eines_Qualitätsmodells_für_die_Generierung_von_Digitalen_Geländemodellen_aus_Airborne_Laser_Scanning#pdf, zuletzt geprüft am 04.07.2023.

Machete, R.; Falcão, A. P.; Gomes, M. G.; Moret Rodrigues, A. (2018): The use of 3D GIS to analyse the influence of urban context on buildings' solar energy potential. In: *Energy and Buildings* 177, S. 290–302. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.07.064.

Magri, L.; Toldo, R. (2017): Bending the Domino Effect in Structure From Motion reconstructions through bundle adjustment. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-2/W6, S. 235–241. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-235-2017.

Martín, A. M.; Domínguez, J.; Amador, J. (2015): Applying LIDAR datasets and GIS based model to evaluate solar potential over roofs: a review. In: *AIMS Energy* 3 (3), S. 326–343. DOI: 10.3934/energy.2015.3.326.

Matyssek, R.; Herppich, W. B. (2019): Experimentelle Pflanzenökologie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Miao, C.; Yu, S.; Hu, Y.; Zhang, H.; He, X.; Chen, W. (2020): Review of methods used to estimate the sky view factor in urban street canyons. In: *Building and Environment* 168, S. 106497. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106497.

Müller, A. (2014): Geometrische Dimension. Lexikon der Kartographie und Geomatik. Online verfügbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/kartographie-geomatik/geometrische-dimension/1794>, zuletzt aktualisiert am 04.12.2014, zuletzt geprüft am 16.08.2022.

- Nanda, V. M. V.; Tateosian, L.; Baran, P. (2020):** GIS-Based Estimation of Seasonal Solar Energy Potential for Parking Lots and Roads. In: 2020 IEEE Green Technologies Conference(GreenTech). Oklahoma City, OK, USA, 01.04.2020 - 03.04.2020: IEEE, S. 136–141.
- Noble, T.; Matthews, N. (2017):** Unmanned Aircraft Systems Data Post Processing. Structure from Motion Photogrammetry. Section 1 – Digital Single-Lens Reflex (DSLR) Imagery. USGS National UAS Project Office.
- O'Connor, J.; Smith, M. J.; James, M. R. (2017):** Cameras and settings for aerial surveys in the geosciences. In: *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 41 (3), S. 325–344. DOI: 10.1177/0309133317703092.
- Over, J.-S. R.; Ritchie, A. C.; Kranenburg, C. J.; Brown, J. A.; Buscombe, D. D.; Noble, T. et al. (2021):** Processing coastal imagery with Agisoft Metashape Professional Edition, version 1.6—Structure from motion workflow documentation: US Geological Survey (Open-File Report).
- Pfeifer, N.; Mandlbürger, G.; Glira, P. (2017):** Laserscanning. In: C. Heipke (Hg.): Photogrammetrie und Fernerkundung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Pix4d (o. J.):** Pix4D Documentation. Image acquisition. Online verfügbar unter <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115002471546-Image-acquisition>, zuletzt geprüft am 07.12.2021.
- Polo, J.; García, R. (2023):** Solar Potential Uncertainty in Building Rooftops as a Function of Digital Surface Model Accuracy. In: *Remote Sensing* 15 (3), S. 567. DOI: 10.3390/rs15030567.
- Remondino, F.; Barazzetti, L.; Nex, F.; Scaioni, M.; Sarazzi, D. (2011):** UAV Photogrammetry for mapping and 3D modeling – Current status and future perspectives. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XXXVIII-1/C22, S. 25–31. DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011.
- Rich, P. M.; Dubayah, R.; Hetrick, W. A.; Saving, S. C. (1994):** Using Viewshed Models to Calculate Intercepted Solar Radiation: Applications in Ecology. In: *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*, S. 524–529.
- Roedel, W.; Wagner, T. (2017):** Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Schneider, S.; Eichinger, M.; Anderson, L.; Leer, S. (2022):** Klimawandel und Gesundheit – klimabedingte Gesundheitsrisiken im deutschen Sport. In: *Prävention und Gesundheitsförderung* (3), S. 275–282. DOI: 10.1007/s11553-021-00876-3.
- Sefercik, U.; Tanrikulu, F.; Atalay, C. (2019):** Photogrammetric 3D Modelling Potential Comparison of SFM-Based New Generation Image Matching Software. In: *The 40th Asian Conference on Remote Sensing, Korea*, S. 1–8. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/340778408_Photogrammetric_3D_Modelling_Potential_Comparison_of_SFM-Based_New_Generation_Image_Matching_Software.

Tinkham, W. T.; Swayze, N. C. (2021): Influence of Agisoft Metashape Parameters on UAS Structure from Motion Individual Tree Detection from Canopy Height Models. In: *Forests* 12 (2), S. 250. DOI: 10.3390/f12020250.

Toth, C.; Jutzi, B. (2017): Plattformen und Sensoren für die Fernerkundung und deren Geopositionierung. In: C. Heipke (Hg.): *Photogrammetrie und Fernerkundung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Umweltbundesamt (2023): Vegetationsperiode. Online verfügbar unter <https://www.klimawandelanpassung.at/kwa-allgemein/kwa-aenderung/kwa-beobacht-vegetationsperiode>, zuletzt geprüft am 08.04.2023.

van Cauwenberg, J.; Bourdeaudhuij, I. de; Clarys, P.; Geus, B. de; Deforche, B. (2019): E-bikes among older adults: benefits, disadvantages, usage and crash characteristics. In: *Transportation* 46 (6), S. 2151–2172. DOI: 10.1007/s11116-018-9919-y.

Verein Zukunftsraum Thayaland (o. J.): Streckenübersicht - Radweg Thayarunde. Online verfügbar unter <https://www.thayarunde.eu/>, zuletzt geprüft am 23.05.2022.

Wehr, A.; Lohr, U. (1999): Airborne laser scanning—an introduction and overview. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 (2-3), S. 68–82. DOI: 10.1016/S0924-2716(99)00011-8.

Westoby, M. J.; Brasington, J.; Glasser, N. F.; Hambrey, M. J.; Reynolds, J. M. (2012): ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. In: *Geomorphology* 179, S. 300–314. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.

Widyaningrum, E.; Gorte, B. G. H. (2017): Comprehensive comparison of two image-based point clouds from aerial photos with airborne lidar for large-scale mapping. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-2/W7, S. 557–565. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W7-557-2017.

Yokozawa, K.; Fuchino, G.; Shiot, A.; Mitani, Y. (2018): Solar radiation analysis on GIS considering influence of weather condition and partial shadow analyzed by high-resolution digital surface model. In: *IJSGCE*, S. 48–53. DOI: 10.12720/sgce.8.1.48-53.

Yu, Q.; Ji, W.; Pu, R.; Landry, S.; Acheampong, M.; O’Neil-Dunne, J. et al. (2020): A preliminary exploration of the cooling effect of tree shade in urban landscapes. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 92, S. 1–13. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102161.

Zhou, Q. (2016): Digital Elevation Model and Digital Surface Model. In: D. Richardson, N. Castree, M. Goodchild, A. Kobayashi, W. Liu und R. A. Marston (Hg.): *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*. Oxford, UK: John Wiley & Sons, Ltd, S. 1–17.

Žižlavská, N.; Mikita, T.; Patočka, Z. (2021): The Effects of Roadside Woody Vegetation on the Surface Temperature of Cycle Paths. In: *Land* 10 (5), S. 483. DOI: 10.3390/land10050483.

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