

Laser oder Bilder? Boden oder Luft? Vergleichende Untersuchungen zur 3D Rekonstruktion in nicht-urbanen, natürlichen Umgebungen

Ludwig HOEGNER¹, Florian HOFMANN¹, Simon WORBIS¹, Jörg HEBLINSKI¹, Peter WASMEIER¹, Jens CZAJA¹, Michael GREZA², Boris JUTZI²

¹ Hochschule für angewandte Wissenschaften München

² Technische Universität München

Ludwig.Hoegner@hm.edu

Zusammenfassung

Für die 3D Aufnahme stehen heute verschiedene Kombinationen aus Sensoren und Plattformen zur Verfügung. Dabei stellt sich je nach Szenario die Frage, welche Sensoren auf welchen Plattformen für bestimmte Messaufnahme gegebene Anforderungen erfüllen. In diesem Beitrag vergleichen wir anhand mehrerer Testgebiete (Unesco Bodendenkmal Limes in Ruffenhofen - Bayern, Versuchsgut der Technischen Universität München in Eichenau) die 3D Rekonstruktion von (1) Mobile Mapping Laserscanning, (2) UAV-getragenen Kamerasystem, (3) UAV-getragenen Laserscanning, (4) Flugzeug-Laserscanning. Um Rahmen der Untersuchungen werden Aufwand bei der Aufnahme und Qualität der 3D Rekonstruktion anhand Punktdichte und Genauigkeit betrachtet. Das Ziel dieser Untersuchung ist eine Abschätzung, für welche Aufgaben welche Sensorik am wirtschaftlichsten einsetzbar ist, um je nach Anwendungsfall geforderte Genauigkeiten zu erfüllen. Im Gegensatz zu urbanen Szenen, in denen häufig planare Flächen vorkommen, konzentriert sich die Untersuchung auf natürliche Umgebungen, in denen komplexere Geometrien und Verdeckungen durch Vegetation und Ungenauigkeiten durch bodennahen Bewuchs auftreten.

1 Motivation

Bei der Aufnahme von Objekten stehen in der Geodäsie heute eine Vielzahl an Sensoren und Plattformen zur Verfügung. Die Auswahl hängt dabei meist vom Szenario jedoch auch vom Arbeitsaufwand ab. Für verschiedene Projekte an der Hochschule München und der Technischen Universität München (TUM) wurden jeweils unterschiedliche Aufnahmeverfahren eingesetzt, um Szenen zu erfassen. Im Rahmen des Forschungsprojekts AlpSenseRely der TUM wurde in den vergangenen Jahren ein Vergleich terrestrischer photogrammetrischer Punktwolken mit Laserscanner basierten Punktwolken durchgeführt (LUCKS ET AL., 2023). Es zeigte sich, dass das Genauigkeitsniveau der 3D-Koordinaten der photogrammetrischen Punktwolke bei passender Aufnahmegeometrie, sprich Redundanz, mit derjenigen eines Laserscanners mithalten kann. Auch eine Änderungsdetektion und Verfolgung markanter Punkte über mehrere Jahre ist möglich (Abb. 1). Hierbei werden Korrespondenzen in den Bildern gesucht und anschließend die aus diesen Pixeln erzeugten 3D-Punkte der beiden Epochen miteinander verknüpft.

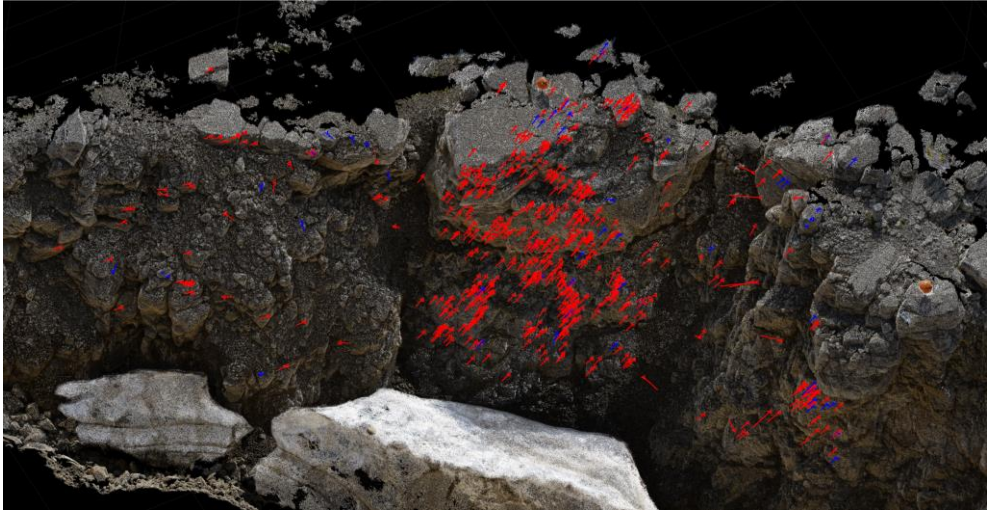


Abb. 1: Bewegungsvektoren in photogrammetrischen Punktwolken zwischen zwei Epochen am Gipfel des Hochvogel in den Allgäuer Alpen (LUCKS ET AL., 2023).

Die in diesem Projekt untersuchten Objekte sind massive Felsen. Die Schwierigkeit besteht darin, markante, stabile Punkte in der Felsstruktur zu finden, was deutlich komplexer ist als Fassaden- oder Fensterecken von Gebäuden im urbanen Umfeld. Nicht untersucht wurde hingegen: Wie verhält es sich mit Vegetation? Wie verhält es sich bei unterschiedlichen Blickwinkeln z.B. bei Kombination von terrestrischen und fliegenden Systemen?

Hierzu hat die Hochschule München teils in Kooperation mit der Technischen Universität München ein paar Versuchsszenarien durchgespielt. Hierfür wurde ein Versuchsgut Roggenstein mit verschiedenen Sensoren erfasst. Der Schwerpunkt ist die Frage, inwiefern Sichtbarkeitslücken aus Mobile-Mapping-Kampagnen mittels Drohnenaufnahmen geschlossen und die Szene ergänzt werden kann. Dabei geht es sowohl um die Einfärbung der Punktwolke des MLS-Systems als auch um die Ergänzung beispielsweise von Dächern. Im zweiten Szenario geht es um die Dokumentation von Bodendenkmälern, hier speziell im Rahmen einer Kooperation der Hochschule München mit dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege, für das einzelne Abschnitte des LIMES für die Unesco erfasst werden sollten. Dabei geht es um die unterschiedliche Bestimmung des Geländes zwischen Tachymetrie, terrestrischem Laserscanning und UAV-Bildflügen.

Die Ergebnisse dieser Messkampagnen werden im Folgenden vorgestellt und diskutiert.

2 Messkampagne Versuchsgut Roggenstein

Die hier vorgestellten Auswertungen sind im Rahmen einer gemeinsam von Hochschule München und 3D Mapping Solutions betreuten Abschlussarbeit entstanden (HOFMANN, 2024).

2.1 Datenerfassung

Für die Datenerfassung wurde ein Gebiet ermittelt, auf dem sowohl das Messfahrzeug gut fahren können als auch die Befliegung mit einer Drohne möglich ist. Die Aufnahme mit den verschiedenen Messsystemen sollte zudem möglichst zeitgleich erfolgen. Die Befahrung und Befliegung fanden deshalb auf dem Versuchsgut Roggenstein der TUM statt. Die Drohnenbefliegung wurde durch die TUM durchgeführt, die MLS-Befahrung durch die Firma 3D Mapping Solutions. Bei der Befahrung kommt das sogenannte MoSES (Mobiles-Straßen-Erfassungs-System), ein Fahrzeug getragenes Multisensorsystem, zum Einsatz. Bei MoSES handelt es sich um ein kinematisches Multisensor-System zur Erfassung von Fahrbahnoberflächen. Die Datenerfassung erfolgt mit zwei Profilsclannern und mehreren Industrie-Messkameras. Für die Bestimmung der Fahrtrajektorie ist eine IMU-Einheit kombiniert mit einem GNSS-Empfänger verbaut. Für die Befliegung wurde die Drohne der TUM verwendet, eine DJI M3 Enterprise.

Für die Luftbildverarbeitung und die Registrierung mit den Laserscans, aber auch die Erzeugung der 3D-Modelle, wurde die Software Metashape von Agisoft verwendet. Die Qualitätsvergleiche sind mit dem Programm CloudCompare angefertigt worden. In einem Python Editor wurden nützliche Hilfsskripte zur Datenkonvertierung verfasst. Die Software zur Auswertung der 3D-Mapping Scanner Daten ist eine Inhouse-Lösung von 3D-Mapping Solutions.

2.2 Georeferenzierung und Koregistrierung

Die Kombination von MLS-Scans und UAV-Bildern wird in mehreren Varianten durchgeführt und diese verglichen:

- (1) Der Bildblock der Drohne wird über Passpunkte mittels harter Lagerung referenziert. Hierdurch ist jedes Einzelbild auf die Passpunkte hin optimiert. Diese Konfiguration ist gut für einen kleinen Fehler in Bezug auf die MLS-Punktwolke. Sie gilt als ausreichend genau referenziert.
- (2) Der Bildblock wird als freie Ausgleichung nur über Verknüpfungspunkte erzeugt. Diese Verknüpfungspunkte werden in den Bildern manuell ausgewählt, sodass sich entsprechende Punkte auch in der MLS-Punktwolke finden lassen. Nach erfolgter Ausgleichung des Bildblocks werden die geschätzten 3D Koordinaten dieser Verknüpfungspunkte verwendet, um die MLS Punktwolke auf den Bildblock zu registrieren.
- (3) Bei dieser Variante werden die Bilder der Drohne direkt auf den MLS-Datensatz registriert. Es werden im Scan markante Punkte, z. B. die Zieltafeln der Passpunkte, aber auch Ecken von Bordsteinen, als Verknüpfungspunkte ausgewählt und anschließend in den Bildern verwendet. Damit findet, anders als in Variante (1), die Optimierung nicht auf die eingemessenen Passpunktkoordinaten statt, sondern auf die Koordinaten der Passpunkte aus dem MLS-Scan.
- (4) Bei dieser Variante werden die Bilder der Drohne und die Bilder des MobileMapping-Systems in einem gemeinsamen Bildblock verarbeitet. Mit den daraus resultierenden ausgeglichenen Kamerapositionen soll die Trajektorie des Scanners verbessert und so auch die MLS-Punktwolke zum gemeinsamen Bildblock registriert werden.

2.3 Datenfusion

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit stellt die Fusion der unterschiedlichen Datensätze dar. Da aus den gesamten Daten am Schluss ein 3D-Mesh generiert werden soll, sind hier verschiedene Ansätze möglich. Grundsätzlich können zum einen die Punktwolken miteinander kombiniert werden, zum anderen aber auch die einzelnen 3D-Meshes verschmolzen werden.

Bei der Kombination der photogrammetrischen und MLS-Punktwolke zeigt sich direkt das Hauptproblem. Während die Dichte und Genauigkeit der photogrammetrischen Punktwolke hauptsächlich von der Texturierung der Oberflächen abhängt, korreliert die Dichte der MLS-Punktwolke mit dem Abstand zum Fahrzeug. Der nahe Straßenbereich ist in der MLS-Punktwolke dichter und genauer erfasst als in der photogrammetrischen Punktwolke, die in diesem Bereich hauptsächlich Rauschen einbringt. Diese Herausforderung wird angegangen indem beide Punktwolken vorab klassifiziert werden. Der Straßenraum wird dann nur von der MLS-Punktwolke verwendet. Alternativ werden aus den Punktwolken zunächst Meshes erzeugt. Auch diese Meshes können verschmolzen werden. Dabei zeigt sich im Straßenraum dasselbe Problem wie bei der Fusion der Punktwolken. Zusätzlich sind Artefakte im Bereich von Vegetation sichtbar.

Ein 2D Profils Scanner wie er beim MoSES verwendet wird, hat keine integrierte Kamera und kann keine kolorierte Punktwolke liefern. Für die Einfärbung aus den im System verbauten Kameras gibt es ein von 3D Mapping Solutions entwickeltes Softwaretool. Da die Kameras in einem festen Aufnahmewinkel montiert sind, ist der Abdeckungsbereich der Bilder nicht immer gleich mit dem Abdeckungsbereich des Scanners. Einige Teile der Punktwolke können also nicht eingefärbt werden und bleiben daher schwarz. In anderen Teilen sind die Bilder, aufgrund der ständig wechselnden Lichtverhältnisse, entweder über- oder unterbelichtet. Es kann auch die Sonne in einzelnen Bildern mit aufgenommen werden, da die Kameras fast in horizontaler Ausrichtung montiert sind. Bei den Drohnenbildern sind die Belichtungsverhältnisse nahezu für jedes Bild gleich. In Metashape gibt es die Möglichkeit, Punktwolken anhand von Orthofotos oder den einzelnen Drohnenbildern, einzufärben. So kann auch die bereits registrierte MLS-Punktwolke mit den Bildern der Drohne nachträglich eingefärbt werden.

Bei der Einfärbung aus den Einzelbildern der UAV-Befliegung wird die Punktwolke in die Einzelbilder projiziert. Für Punkte, die in mehreren Bildern sichtbar sind, wird der mittlere Farbwert verwendet. Durch die zentralperspektivische Abbildung werden nicht nur Bodenpunkte, sondern auch eine Reihe an Fassadenpunkten auf diese Art eingefärbt. Dieses Verfahren setzt eine genaue Koregistrierung von MLS-Punktwolke und UAV-Bildern voraus. Wird für die Einfärbung das Orthophoto gewählt, werden die Punkte lediglich nach deren Lage und dem zugehörigen Farbwert des Orthofotos eingefärbt. Fassaden erhalten hier keine Farbwerte. Diese Einfärbung kann auch mit amtlichen Orthophotos als Vorabschritt genutzt werden, bevor die Einzelbildeinfärbung verwendet wird.

Abbildung 2 zeigt die Gegenüberstellung der Einfärbung der MLS-Punktwolke einmal aus den Kameras des Mobile Mapping Systems (links) und aus den koregistrierten UAV-Luftbildern (rechts). Bereiche, in denen das MLS-System keine Punkte erfasst hat, sind weiß gehalten. MLS-Punkte, die nicht in Bildern enthalten waren und daher nicht eingefärbt werden konnten, sind ebenfalls weiß. Man erkennt, dass mit dem MLS die Metallunterseite des Vordachs (rechts oben in den Bildern) aufgenommen wird. Diese Unterseite des Vordaches

ist aber aus den UAV-Bildern nicht zu sehen. Links unten ist zu erkennen, dass nur ein Teil des Weges im linken Bild erfasst wird. Hier sind zwar Laserpunkte vorhanden, aber auf Grund der Fahrtrichtung wurde dieser Teil des Bodens nicht von den Kameras des Fahrzeugs erfasst. Im rechten Bild hingegen kann dieser Bereich eingefärbt werden. Man erkennt generell den Unterschied in der Farbqualität zwischen den Industriekameras auf dem Fahrzeug und der Kamera im UAV, die aufgrund der konstanteren Belichtungsverhältnisse und der höheren Auflösung eine deutlich bessere Farbwiedergabe hat. Auffällig sind die Bereiche des Kiesplatzes in der Mitte, die in beiden Bildern keine Punkte zeigen. Hier befanden sich zum Aufnahmezeitpunkt Wasserpfützen. Das MLS-System hat keine Punkte erfasst, weil die Laserstrahlen nicht zum Sensor reflektiert wird.

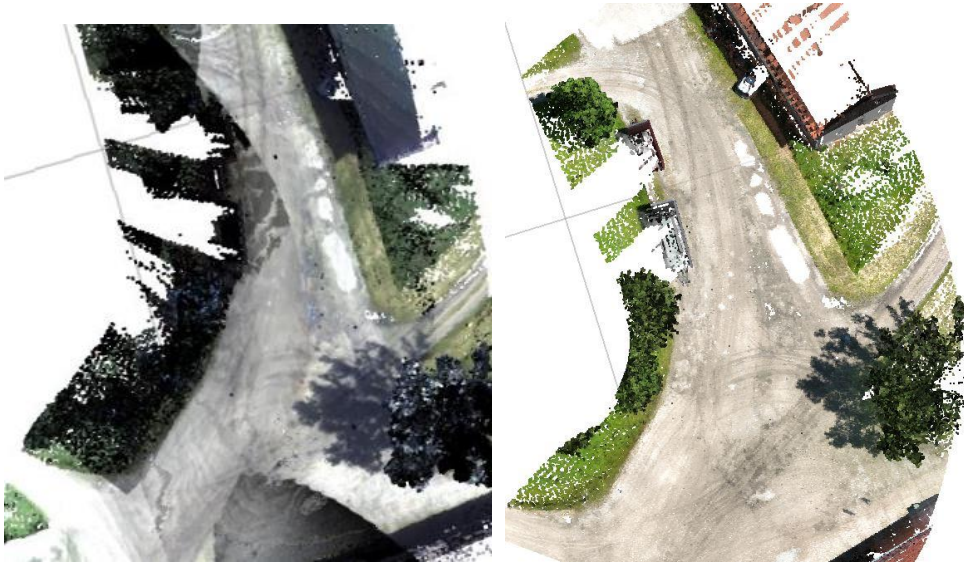


Abb. 2: Punktwolke des MLS Systems eingefärbt mit Kamera des Mobile Mapping Systems (links) und UAV-Bildern (rechts).

In den UAV-Bildern sind diese Pfützen natürlich zu sehen. Wie oben beschrieben ist die photogrammetrische Punktwolke im Bereich des Weges ungenauer als die MLS-Punktwolke. Ergänzt man nun die MLS-Punktwolke in Bereichen ohne Punkte um Punkte aus der photogrammetrischen Punktwolke, so können einige Lücken geschlossen werden, z.B. die Flächen der Pfützen (Abb. 3).



Abb. 3: Ausschnitt des Kiesplatzes mit Pfütze. Man erkennt die aus der photogrammetrischen Punktwolke ergänzten Punkte auf der Wasseroberfläche.

3 Messkampagne Römische Arena an der Hammerschmiede bei Dambach

Die Projektaufgabe bestand hier in der Erfassung des Bodendenkmals einer römischen Arena, die sich durch eine kreisförmige Bodenerhebung im Bewuchs abzeichnet. Das Ziel war zu untersuchen, wie das Bodendenkmal durch ALS-Befliegungen und UAV-Bildbefliegungen erfasst wird.

3.1 Datenerfassung

Im Gebiet der Arena haben insgesamt fünf Gruppen eine tachymetrische Geländeaufnahme durchgeführt und daraus ein digitales Geländemodell abgeleitet. Dabei lag die Anzahl der verwendeten Punkte zwischen 1100 und 2400 auf maximal 3000 m². Als Ergebnis sind drei unterschiedliche Geländemodelle ableitbar, da die Gruppen 1 und 2 sowie 3 und 4 Ihre Aufnahme gemeinsam durchgeführt haben. Grundlage der tachymetrischen Aufnahme sind Passpunkte im amtlichen System, welche mit SAPOS-Genauigkeit (ca. 2 cm in Lage, 3 cm in Höhe) bestimmt werden können. Beeinträchtigt wurde die Aufnahme vor Ort durch die teilweise sehr schlechten Sichten und die große Menge an Bewuchs im Bereich der Arena. Ein Vergleich der einzelnen Geländemodelle gibt daher einen Hinweis auf die Wiederholgenauigkeit einer terrestrischen Geländeaufnahme unter den gegebenen Bedingungen und damit auf die erwartbare Qualität einer Einzelaufnahme.

Ein Vergleich von zwei Geländemodellen in Abbildung 4 zeigt die Abweichungen im Bereich von $\pm 0,5$ m; größere Abweichungen kommen durch Interpolationseffekte verursacht insbesondere an den Rändern vor, wenn die Gebiete unterschiedlich groß sind – dies ist jedoch kein Hinweis auf abweichende Geländeformen. Die mittlere Abweichung zwischen den drei Geländemodellen liegt bei ca. 1 cm (mit unterschiedlichem Vorzeichen), was sehr gut der Aufnahme- und Interpolationsqualität entspricht. Die Standardabweichung der Differenzen liegen bei 8 cm bzw. 9 cm, woraus sich die Streuung der einzelnen Oberflächeninterpolationen ableiten lassen. Man kann also davon ausgehen, dass bei ausreichend dichter terrestrischer Geländeaufnahme die mittlere Abweichung der daraus erstellten Geländemodelle im

Bereich der Aufnahmegenaugigkeit liegt (1 -2 cm). An einer beliebigen Stelle im Aufnahmebereich sind jedoch lokal größere Abweichungen möglich, wobei 95% aller Abweichungen im Bereich ± 18 cm liegen. Die Ursache hierfür ist zum einen in der unterschiedlichen Auswahl der Geländepunkte zu suchen, welche bei der linearen Interpolation zu den Nachbarpunkten lokale Abweichungen zur Folge haben kann; zum anderen in der Definition der Oberfläche selbst (Bewuchs, Bodendecker etc.).

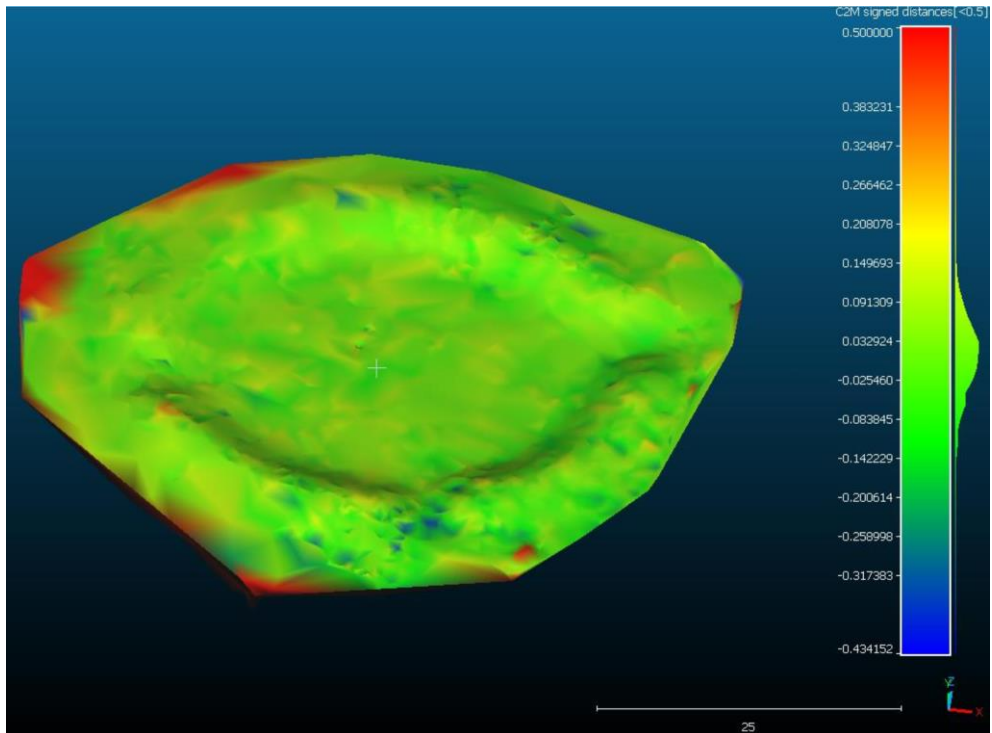


Abb. 4: Abweichungen der Geländemodelle der Gruppe 1+2 und 3+4. Größere Abweichungen bestehen nur an den Rändern auf Grund der unterschiedlichen Abmessungen der Aufnahmegebiete.

Die Arena ist außerdem mit einer DJI M3 Drohne befliegen worden. Die Flughöhe betrug dabei 50 m, was zu einer Bodenpixelgröße von 13 mm führte. Während einer Flugdauer von nur 5 Minuten wurden insgesamt 375 Einzelbilder erfasst und schließlich eine gesamte Punktwolke mit ca. 280 Mio. Einzelpunkten berechnet (Abb. 5). Die Auswertung wurde mit dem kommerziellen Softwareprodukt Agisoft Metashape durchgeführt; die Klassifikation der Punkte auf der Geländeoberfläche erfolgte mittels Trimble RealWorks. Letztlich sind nach einer Klassifikation etwa 116 Mio. Punkte auf die Geländeoberfläche entfallen. Diese ist wegen der Sichtabschattungen mit Lücken versehen, welche durch Interpolation geschlossen werden können. Um die Punktwolke auswertbar zu machen, wurde sie auf einen mittleren Punktabstand von 2,5 cm reduziert, so dass knapp 7 Mio. Punkte für das DGM übrig blieben (Abb. 5)

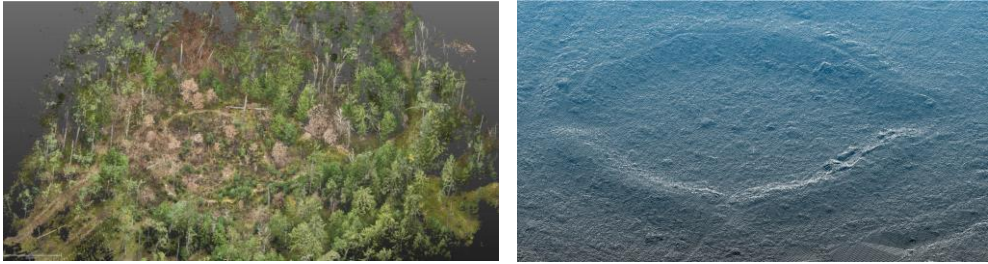


Abb. 5: Punktwolke der Arena aus photogrammetrischer Befliegung. Links: vollständige Punktwolke. Rechts: Arena-Ausschnitt der UAV-Befliegung nach Interpolation der DGM-Lücken.

3.2 Auswertung

Als Referenz wird eine der qualitativ gleichwertigen tachymetrischen Aufnahmen verwendet. Verglichen wird diese mit ALS-Befliegungsdaten des LDBV und dem DGM aus der eigenen photogrammetrischen Punktwolke. Vom Bayerischen Landesamt für Breitband, Digitalisierung und Vermessung (LDBV) können über die Open Data-Initiative ebenfalls flugzeuggetragene Scandaten des Gebiets um die Arena bezogen werden. Die verfügbaren Lasersdaten sind klassifiziert und können nach den Bodenpunkten gefiltert werden. Durch den dichten Bewuchs weisen die frei verfügbaren Daten einige Lücken auf, wo bei der Befliegung keine Messimpulse bis zum Boden durchgedrungen sind. Diese Bereiche müssen für eine Auswertung mittels Interpolation geschlossen werden (wie es z. B. auch bei der Erstellung des ebenfalls amtlicherseits erhältlichen 1m-DGM geschieht). Das Abweichungsbild in Abbildung 6 zeigt etliche Stellen, bei denen die Oberfläche aus den Befliegungsdaten über der tachymetrisch bestimmten Oberfläche liegt (rote Bereiche). Hier ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass es sich um Reste von Vegetation oder Objekte auf dem Boden (Baumstümpfe etc.) handelt. Die mittlere Abweichung liegt bei gut +11 cm, die Standardabweichung der Differenzen bei 8,8 cm.

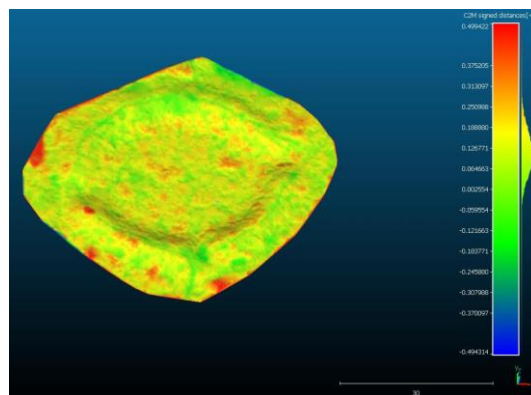


Abb. 6: Differenzen des DGM aus ALS-Daten und der Tachymeter-Referenz.

Die Abweichungen des DGMs aus der Photogrammetrie werden gegenüber derselben tachymetrischen Referenz dargestellt (Abb. 7). Die mittlere Abweichung liegt bei +8,2 cm und ist damit direkt vergleichbar mit den bereits identifizierten Abweichungswerten unterschiedlicher Scan-Aufnahmen. Die Standardabweichung ist mit etwa 7 cm etwas geringer als bei den flugzeuggetragenen Scanverfahren, was vor allem an der tagesaktuellen Aufnahme und damit der vergleichbaren Vor-Ort-Situation liegt. Ein weiterer Unterschied zwischen einer photogrammetrischen und einer Scan-Lösung, dass beim Scan mit dem First-/Last pulse-Verfahren die Messungen die Vegetation teilweise durchdringen und deswegen einfacher als Bodenpunkte identifiziert werden können. Dies führt teilweise aber durch Mischeffekte im Signal zu erhöhtem Rauschen der Bodenpunkte. In der photogrammetrischen Punktwolke treten solche Effekte nicht auf. Allerdings sind nicht einsehbare Bereiche in der Folge gar nicht als Bodenpunkte abbildbar bzw. es kann zu anderen Fehlzusordnungen kommen; was in der Folge zu kleineren Interpolationsabweichungen (blaue Flecken in Abb. 7, ca. 1 dm unter Gelände) führen kann.

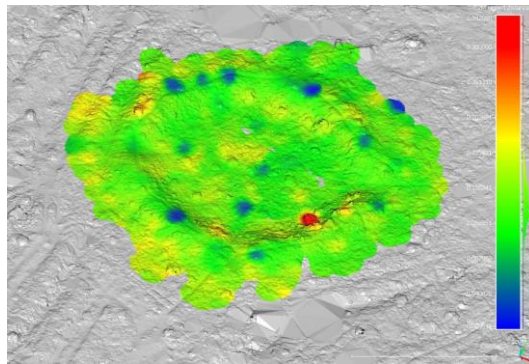


Abb. 7: Differenz des photogrammetrischen DGMs und der Tachymeter-Referenz

4 Schlussfolgerungen

Auf Basis der durchgeführten Messungen und der Vergleiche der daraus abgeleiteten Oberflächenmodelle lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Die Wiederholgenauigkeit der terrestrischen Aufnahme (mittels Tachymeter und GNSS) liegt im Bereich von wenigen cm in der Höhe und entspricht damit der grundsätzlichen Definitionsgenauigkeit von Oberflächenpunkten. Dies kann bei allen Vergleichen von Punktwolken erzeugenden Verfahren als "Grundniveau" für eine Referenzierung herangezogen werden.
- Die ALS-Daten des LDBV liegen systematisch zu hoch, was an der Bodenbedeckung liegt. Offset und Genauigkeit entsprechen denjenigen des 1m-DGM bzw. einer vergleichbaren terrestrischen Laserscanner-Aufnahme. Die Punktwolken des LDBV sind lokal von hoher Dichte und können damit auch kleinere Strukturen abbilden, weisen aber gerade in Waldbereichen größere Lücken auf.

- Eigenständige photogrammetrische Befliegungen liefern ebenfalls ein dichtes Oberflächenmodell, wobei auch hier durch Sichthindernisse (Bewuchs) induzierte Lücken vorkommen. Die Genauigkeit ist etwas höher als bei ALS-Befliegungen (was sich v. a. aufgrund der geringeren Flughöhe ergibt); größere Abweichungen ergeben sich auswertebedingt an lokalen Stellen. Auch eine aus Bilddaten abgeleitete Punktwolke weist regelmäßig einen positiven Höhenversatz auf.

In teil- und stark bewaldeten Gebieten liefert kein Messverfahren vollständige Resultate, z.B. zur zuverlässigen Detektion von Höhenveränderungen im Bereich weniger cm.

Für diese Anforderung ist die Tachymetrie das geeignetste Verfahren, erweist sich jedoch auch als am aufwändigsten und wirtschaftlich problematischsten. Insbesondere großräumige Gebiete können nicht mit der notwendigen Punktdichte erfasst werden. Die Tachymetrie ist damit als lokale Ergänzung bei dort besonders hohen Anforderungen in Erwägung zu ziehen.

Großräumige Oberflächenmodell-Erzeugungen sollten auf bestehende amtliche Scan- oder DGM-Daten zurückgreifen oder mittels einer eigenen Drohnenbefliegung durchgeführt werden. Bei all diesen Verfahren ist zu berücksichtigen, dass diese, je nach Untergrund, einen positiven Offset von ca. 1 dm erzeugen (d. h. das ausgewertete Gelände liegt systematisch zu hoch). Zumindest im Rahmen der Drohnenbefliegung kann hier mit luftbild-sichtbaren Passmarken gearbeitet werden.

Aus den durchgeführten Vergleichen lässt sich als Daumenregel ableiten, dass mittels Tachymetrie lokale Höhenänderungen < 10 cm identifiziert werden können, während für Scan- und Befliegungsdaten dieser Wert besser auf < 25 cm hochgesetzt wird.

Literatur

- HOFMANN, F. (2024): Datenfusion verschiedener Mobile-Mapping-Systeme. Bachelorarbeit, Hochschule München für angewandte Wissenschaften, München.
- LUCKS, L., RAFFL, L., HOEGNER, L., HOLST, C., STILLA, U. (2023): Bestimmung von dichten 3D-Vektoren für die markerlose Überwachung von Massenbewegungen im Hochgebirge mit punktwolken-basierten Methoden. In: WEINOLD, T (Hrsg.): 22. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2023. Innsbruck.