

Vergleich verschiedener Unterwasser-Photogrammetrie-Inspektionsmethoden zur Bewertung von unterwasserliegenden Stahlwasserbauwerken

MICHAEL GRÖMER¹ & GOTTFRIED MANDLBURGER²

Zusammenfassung: Die Wartung von Wasserkraftwerken ist mit kostspieligen Inspektionen verbunden. Vor diesem Hintergrund ist die Entwicklung einer neuen Methodik für die Unterwasserinspektion mit Kamerasystemen das Ziel dieser Forschung. Als Studienobjekt wurde ein Unterwasser-Stahlwasserbauwerk eines Laufwasserkraftwerks gewählt. Das Objekt wurde während einer Entleerung mit zwei terrestrischen Laserscannern (RIEGL VZ-400i und Z+F 5010C) im trockenen Zustand vermessen. Zusätzlich wurden an der Sperre Zielmarken angebracht und mit einer Totalstation (Leica TS16) präzise vermessen. Dadurch wurde ein Referenzmodell erstellt, das als exakte geometrische Grundlage für die Beurteilung der in einem zweiten Schritt erstellten photogrammetrischen Modelle dient. Im nächsten Schritt wurde das Objekt im unter Wasser liegenden Zustand aufgenommen. Die Erfassung erfolgte mit einer GoPro Hero Black 7 Kamera von zwei unterschiedlichen Trägerplattformen aus, einer Teleskopstange und einem ferngesteuerten Tauchroboter. Aus diesen Aufnahmen wurden 3D-Modelle erstellt und mit den Referenzdaten verglichen. Es hat sich dabei herausgestellt, dass die Soll-Ist-Abweichungen ohne Verwendung von Passpunkten im Bereich mehrerer Dezimeter liegt und nach deren Einbeziehung in die Bündelblockausgleichung auf wenige cm verringert werden konnte. Die verwendete Trägerplattform hatte einen Effekt auf die erzielte Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion, aus den Tauchroboteraufnahmen konnte ein genaueres Modell erstellt werden.

1 Einleitung

Relevante unter Wasser liegende Teile von Wasserkraftwerken werden derzeit in empirisch ermittelten Intervallen einerseits im trockengelegten Zustand und andererseits auch durch Taucher inspiziert. Aufgrund der Tiefe und aus Sicherheitsgründen ist das Tauchen nicht immer möglich oder ratsam. Sowohl Tauchgänge als auch die Entleerung von unterwasserliegenden Anlagenteilen sind zeit- und kostenaufwendig. Außerdem stellen Taucheinsätze immer ein Risiko für die Taucher selbst dar. Unterwasserfahrzeuge, so genannte Remotely Operated Vehicles (ROV), die mit speziellen Inspektionsgeräten ausgestattet sind, könnten in Zukunft einen entscheidenden Beitrag zu effizienteren, sichereren und qualitativ verbesserten Inspektionen in der Wasserkraft leisten (CAPOCCI et al. 2017, GROEMER et al. 2022). Tauchroboter für visuelle Inspektionen oder Vermessungsaufgaben sind im Offshore-Bereich, z.B. in der Gas- und Ölindustrie oder in der Unterwasserarchäologie, bereits etabliert (CHEMISKY et al. 2021). Auf Unterwasserinspektion spezialisierte Unternehmen bieten Trägerplattformen (z.B. ROV, Crawler), Photogrammetrie-Lösungen oder Sonarsysteme und fallweise auch Unterwasser-Lasersysteme an (MAI, C. et al.

¹ VERBUND Hydro Power GmbH & TU Wien, Bereich Unterwasserinspektion, E-Werkstraße 31, 8121 Deutschfeistritz, Austria, E-Mail: michael.groemer@verbund.com

² TU Wien, Department of Geodesy and Geoinformation, Research Group Photogrammetry, Wiedner Hauptstr. 8-10, 1040 Vienna, Austria, E-Mail: gottfried.mandlburger@geo.tuwien.ac.at

2016). In der Wasserkraft sind solche Technologien noch relativ neu und werden zunehmend für visuelle Inspektionen, aber noch nicht für weitergehende Vermessungsaufgaben eingesetzt. Grund dafür sind unter anderem vor allem die teilweise schwierigen Bedingungen. Vor allem bei Flusskraftwerken sind hier als erschwerende Parameter der hohe Schwebstoffanteil (Trübung) sowie die Strömung zu nennen.

VERBUND arbeitet bereits seit 2018 im Rahmen des Innovations- und Digitalisierungsprogramms "Digitales Wasserkraftwerk" intensiv an der Entwicklung innovativer Methoden zur digital gestützten Unterwasserinspektion. Mit unterschiedlich ausgestatteten ROVs, einer eigens entwickelten Teleskopkamera und einem hochauflösenden Echtzeitsonar stehen mehrere Technologien im Fokus, die im Rahmen der Aktivitäten für die Wasserkraft erprobt und weiterentwickelt wurden und werden. Unter Verwendung verschiedener Trägerplattform/Messsystem-Kombinationen wurden zahlreiche Tests an Wasserkraftwerken durchgeführt. Der Schwerpunkt der F&E-Aktivitäten liegt auf Stereo-Photogrammetrie und auch auf Laservermessung.

Diese neuen Unterwasser-Inspektionsmethoden mit Tauchroboter und Teleskopkamera sind bei VERBUND für verschiedene Routinearbeiten im Bereich der Inspektion von Wasserkraftanlagen mittlerweile etablierte Technik. Für Inspektionsaufgaben mit höherer Anforderung an die Genauigkeit ist es notwendig, die Genauigkeit von 3D Modellen zu ermitteln, die aus Unterwasser-Aufnahmen erstellt wurden. Ein weiterer Fokus der aktuellen Forschung liegt darüber hinaus auf der Reduktion potenzieller Fehlerquellen. In diesem Zusammenhang berichtet der vorliegende Artikel über die Erfahrungen mit Unterwasserinspektion basierend auf Stereophotogrammetrie in der Wasserkraft. Im Mittelpunkt stehen dabei die Fragen, welchen Einfluss (i) die eingesetzten Trägerplattformen (Teleskopstange, ROV) bzw. (ii) Auswertungsansätze (Structure-from-Motion vs. Bündelblockausgleichung mit Passpunkten) auf die Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion haben. Der weitere Artikel ist wie folgt gegliedert: In Abschnitt 2 sind das Untersuchungsgebiet, die verwendeten Datensätze inklusive der Referenzmessungen beschrieben. In Abschnitt 3 präsentieren wir die Auswertemethoden. Die erzielten Ergebnisse werden in Abschnitt 4 vorgestellt und kritisch diskutiert. Der Artikel schließt mit einer Zusammenfassung sowie einem Ausblick auf künftige Arbeiten.

2 Datensätze und Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet ist ein Bereich des Oberwasserkanals des Laufwasserkraftwerks Peggau an der Mur (Steiermark, Österreich). Die Position des Kraftwerks ist in Abb. 1 dargestellt. Als spezifisches Studienobjekt wurde die Obertafel des Grundablasses inspiziert, ein unter Wasser liegendes Stahlwasserbauwerk, das in Abb. 3 dargestellt ist.

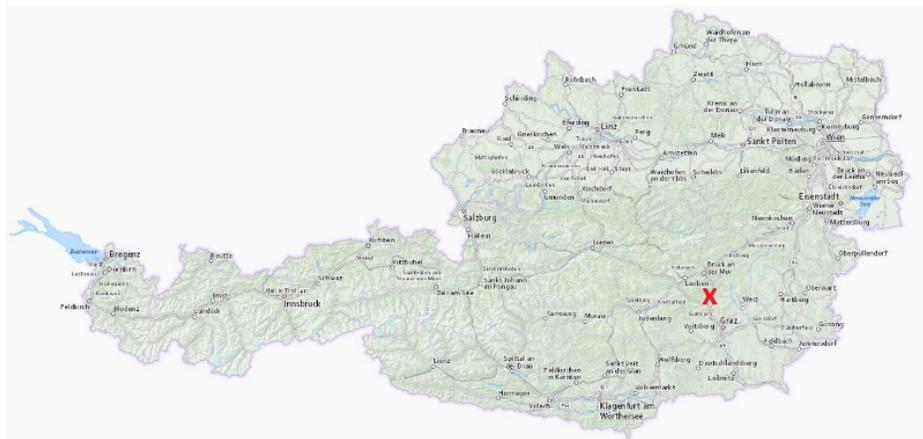


Abb. 1: Das Laufkraftwerk befindet sich in der Steiermark, nördlich von Graz und ist auf der Abbildung mit einem roten x markiert (N 47°12'; E 15°21'; WGS84). Quelle: <https://basemap.at/>

Die Referenzaufnahmen der Obertafel wurden mit zwei terrestrischen Laserscannern (*RIEGL VZ-400i*, Zoller+Fröhlich 5010C) erstellt (Abb. 2c und Abb. 3). Die Unterwasseraufnahmen wurden mit einer GoPro Hero Black 7 Kamera aufgezeichnet, kombiniert mit diffuser LED Beleuchtung. Die Kamera wurde auf zwei Trägerplattformen montiert. Diese sind in Abb. 2a und b ersichtlich und werden im Abschnitt 3.1 Inspektionsmethoden genauer erläutert.

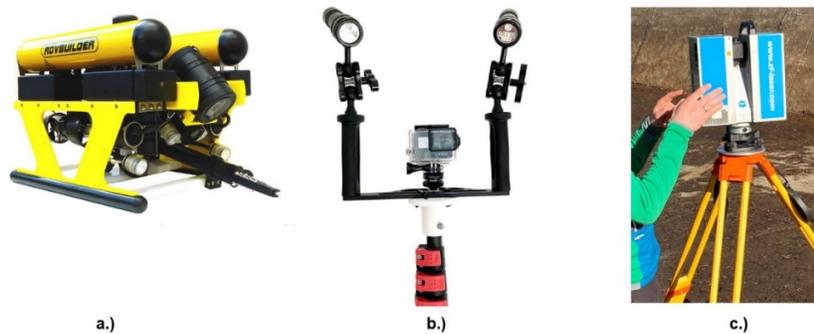


Abb. 2: (a) Tauchroboter, der für die Aufnahme verwendet wurde, (b) GoPro Kamera montiert an der selbst entwickelten Teleskopstange, (c) Zoller + Fröhlich Laserscanner als Basis für das 3D-Referenzmodell.

In Abb. 3 ist der *RIEGL VZ-400i* Laserscanner vor der vermessenen Obertafel abgebildet. Zu erkennen sind auch drei der aufgeklebten Zielmarken, welche mit der Leica TS16 Totalstation eingemessen wurden.



Abb. 3: Laserscan der Obertafel als Referenzmodell, durchgeführt während einer Trockenlegung des Kanals.

3 Methoden

3.1 Inspektionsmethoden

Bei VERBUND wurden verschiedene Inspektionsmöglichkeiten erprobt und weiterentwickelt, um für die unterschiedlichen Inspektionssituationen eine Vielzahl von Werkzeugen zur Auswahl zu haben. So unterscheidet sich beispielsweise der Einsatz in einem Laufwasserkraftwerk deutlich von dem in einem Pumpspeicherkraftwerk. In diesen beiden Kategorien kann sich die Inspektionssituation vor allem in Bezug auf Trübung, Strömung, Wassertiefe und die zu inspizierenden Anlagenteile unterscheiden. Die zu untersuchenden Objekte haben unterschiedliche Formen und Größen, selbst bei der Inspektion von großen Strukturen wie einem 100 Quadratmeter großen Rechen muss man eine hohe Genauigkeit einhalten und sicherstellen, dass jeder Teil während der Inspektion erfasst wird.

Das Bewegen der Ausrüstung in einem bestimmten Muster, Abstandshalter und spezielle Kameraeinstellungen zusammen mit diffuser Beleuchtung haben sich als hilfreich erwiesen, um die Videoqualität zu verbessern. Die bereits getesteten bzw. verfügbaren Sensoren sind Kameras, Lasersysteme und sonarbasierte Technologie. Je nach Objekt, Genauigkeit, Trübung und Prüftiefe hat jeder Sensor seine Vor- und Nachteile, daher ist die Wahl des richtigen Sensors entscheidend. Um den Sensor zum Objekt zu bringen und ihn in einem bestimmten Muster zu bewegen, wird eine Trägerplattform benötigt. Hier haben sich Tauchroboter, Raupenfahrzeuge, Boote oder eine Teleskopstange als nützlich erwiesen. Mit der Teleskopstange lassen sich Inspektionen besonders gut in Fließgewässern moderater Größe durchführen. ROVs oder Crawler sind mit einer Fernsteuerung ausgerüstet, mit der es möglich ist, bis zu 300 Metern und darüber hinaus zu tauchen.

Mit Hilfe von Unterwasser-Stereophotogrammetrie können aus den aufgenommenen Bildern bzw. Videoframes detaillierte 3D-Modelle erstellt werden. 3D-Modelle verbessern die Inspektionssituation drastisch, da man bei der Betrachtung eines aufgezeichneten Videos von sich

wiederholenden Strukturen leicht die Orientierung verlieren kann. Außerdem muss man aufgrund der Wassertrübung die Kamera oftmals sehr nahe an das zu inspizierende Objekt bringen, was die Auswertung ohne 3D-Modelle schwierig bzw. teilweise unmöglich macht.

Die Tafel wurde mit einer GoPro Hero 7 black Kamera in den folgenden Methoden aufgenommen:

- i. in untergetauchtem Zustand, wobei die Kamera (im Unterwassergehäuse) an einer Teleskopstange befestigt war, und
- ii. in untergetauchtem Zustand mit einem Tauchroboter, an dem die Kamera (in einem Unterwassergehäuse) seitlich montiert wurde.

Der Tauchroboter und die Teleskopkamera sind in Abb. 2 zu sehen.

3.2 Auswertungsmethoden

Der Workflow für die Auswertung und den Vergleich zum Referenzmodell ist in Abb. 4 dargestellt. Für die Erstellung der 3D-Modelle wurde die Structure-from-Motion (SfM) Software Agisoft Metashape verwendet (AGISOFT 2022). Der Vergleich zum Referenzmodell erfolgte im Programm CloudCompare (CLOUDCOMPARE 2022). Als Datengrundlage für das Referenzmodell wurde das Lasermodell des Zoller + Fröhlich terrestrischen Laserscanners verwendet.

Bei Unterwasseraufnahmen ist eine hohe Überlappung der Aufnahmen notwendig, da einige erschwerende Faktoren wie das Fehlen von GNSS Daten für die Bildposition und verminderte Bildqualität durch Wassertrübung hinzukommen.

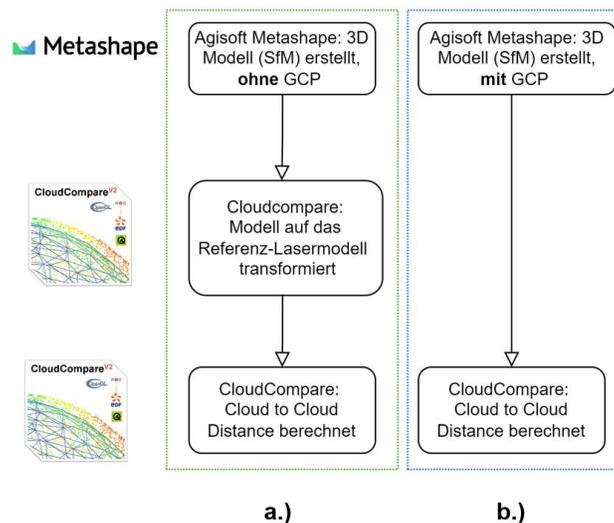


Abb. 4: Die Daten wurden auf zwei Wegen bearbeitet; (a) ohne die Verwendung von Passpunkten (Ground Control Points, GCP) mit anschließender Transformation auf 4 Passmarken; (b) unter Verwendung von Passpunkten in der Bündelblockausgleichung ohne nachfolgende Transformation

Zuerst wurde der in Abb. 4a dargestellte Workflow verwendet, um die 3D-Modelle zu erstellen und zu vergleichen. Die Ergebnisse sind in Abb. 5 und 6 dargestellt und werden in Kapitel 4 diskutiert. Um die Punktwolken für den Vergleich zu referenzieren, wurde die absolute Orientierung des 3D-Modells aus Workflow 4a durch eine Transformation auf vier am Blockrand

befindliche Passpunkte hergestellt. Dabei wurde eine 4x4 Transformationsmatrix verwendet, mit einem variablen Maßstab des Modells.

Beim Workflow, der in Abb. 4b dargestellt ist, ist keine Transformation nötig, da das Modell durch die Passpunkte während der Bündelblockausgleichung in Metashape bereits absolut orientiert wurde. Wie in Kapitel 4 diskutiert wird, sind im Workflow 4a globale, systematische Fehler zu erkennen. Durch die Verwendung von Passpunkten wird versucht, diese während der Auswertung zu reduzieren.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Inspektionsmethoden

Nachdem die 3D-Modelle der zwei verschiedenen Trägerplattformen vorlagen, wurden diese jeweils mit dem Referenz-LasermodeLL verglichen. Es wurde speziell die flächenhafte Modellfehlerverteilung anhand der Cloud-to-Cloud-Distanz (CLOUDCOMPARE 2023) zwischen den einzelnen photogrammetrischen Modellen und dem Laserscanning-Referenzmodell bewertet. Für die beiden photogrammetrischen Blöcke, der mit dem ROV (Abb. 5) und mit der Teleskopstange als Trägerplattform (Abb. 6) erstellt wurden, sind globale Blockverformungen im Dezimeter-Bereich zu beobachten.

Wie in den Abbildungen sichtbar ist, sind die 3D-Modelle kugelförmig konkav gewölbt, wobei dieser Fehler beim 3D-Modell der Teleskopkamera noch stärker auftritt. Bei dem Tauchroboter beträgt der maximale Abstand des 3D-Modells zur Referenz 12 cm, bei der Teleskopkamera 22 cm.

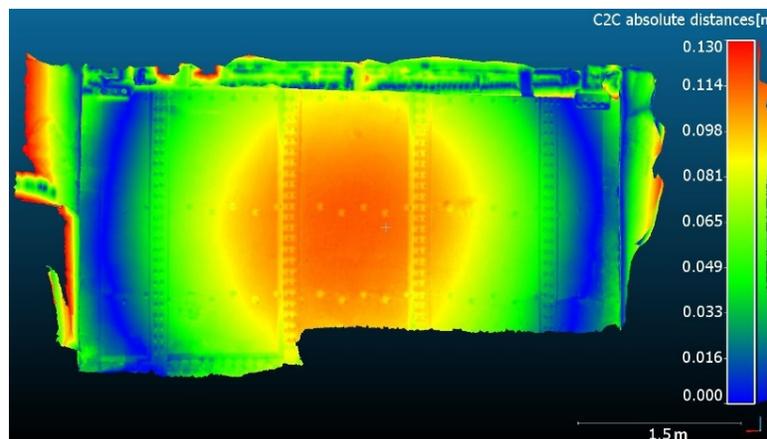


Abb. 5: Vergleich zwischen photogrammetrischen Block (ROV) und Laserscanning-Referenzmodell (ohne Verwendung von Passpunkten).

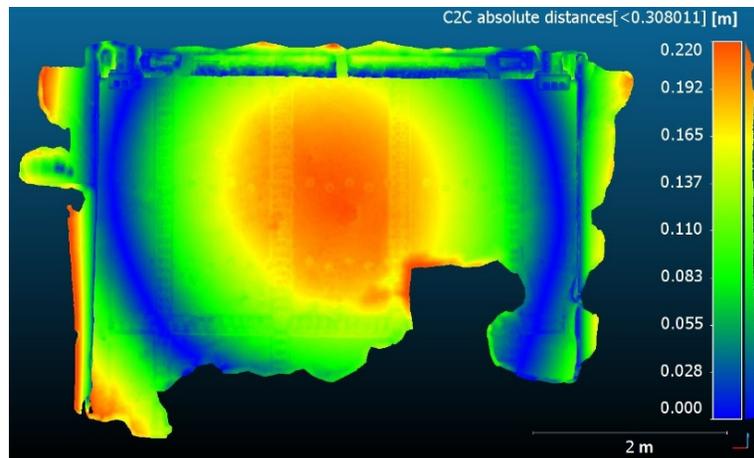


Abb. 6: Vergleich zwischen photogrammetrischem Block (Teleskopkamera) , und dem Laserscanning-Referenzmodell (ohne Verwendung von Passpunkten).

Um diese globalen Blockverformungen zu reduzieren und die konkave Wölbung zu minimieren wurden die mit der Totalstation eingemessenen Passpunkte verwendet und in der Bündelblockausgleichung zur absoluten Orientierung verwendet, um Aufwölbungen zu verhindern. Dafür wurden in einem ersten Schritt sechs gleichmäßig verteilte Passpunkte mit einem zusätzlichen Marker in der Mitte der Platte verwendet. Die Positionen der Marker sind in Abb. 7 dargestellt.

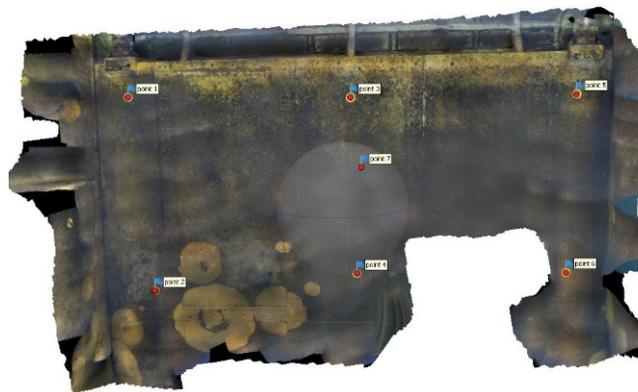


Abb. 7: Positionen der 7 Passpunkte (6x terrestrisch eingemessen + 1x aus Referenzmodell ermittelt) als Basis für absolute Modellorientierung in einer Bündelblockausgleichung.

Die Verwendung von Passpunkten führt zu einer deutlichen Reduktion der globalen Abweichungen. Wie in Abb. 8 abgebildet, sind in diesem Fall die Abweichung zum Referenzmodell im Bereich der Passpunkte weitgehend unter 2 cm. Größere Abweichungen von bis zu 5 cm kommen lediglich am äußersten Modellrand vor.

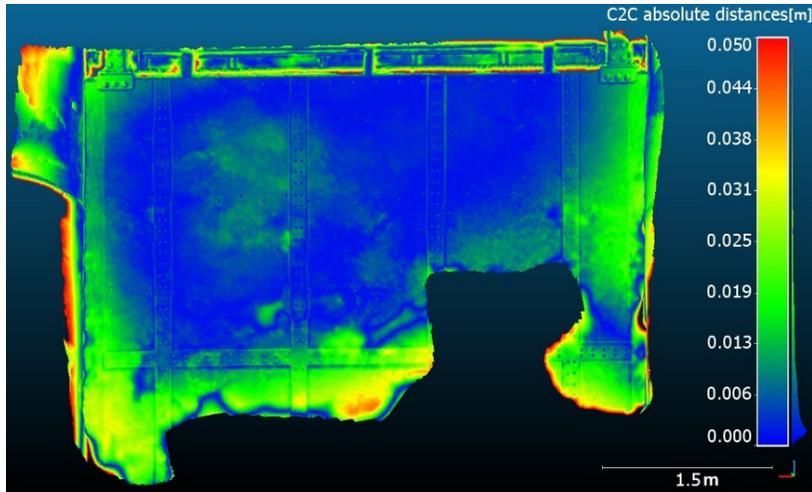


Abb. 8: Vergleich zwischen photogrammetrischem Block (Teleskopkamera) und Laserscanning-Referenzmodell (mit Verwendung von Passpunkten).

Tab. 1: Gegenüberstellung der Abstandparameter der verschiedenen Modelle

	Tauchroboter ohne Passpunkte (Abb. 5)	Teleskopstange ohne Passpunkte (Abb. 6)	Teleskopstange mit Passpunkten (Abb. 8)
Minimaler Abstand	0 m	0 m	0
Maximaler Abstand	0.195 m	0.308 m	0.276 m
Mittlerer Abstand	0.051 m	0.089 m	0.01 m
Standardabw. (σ)	0.067 m	0.083 m	0.035 m

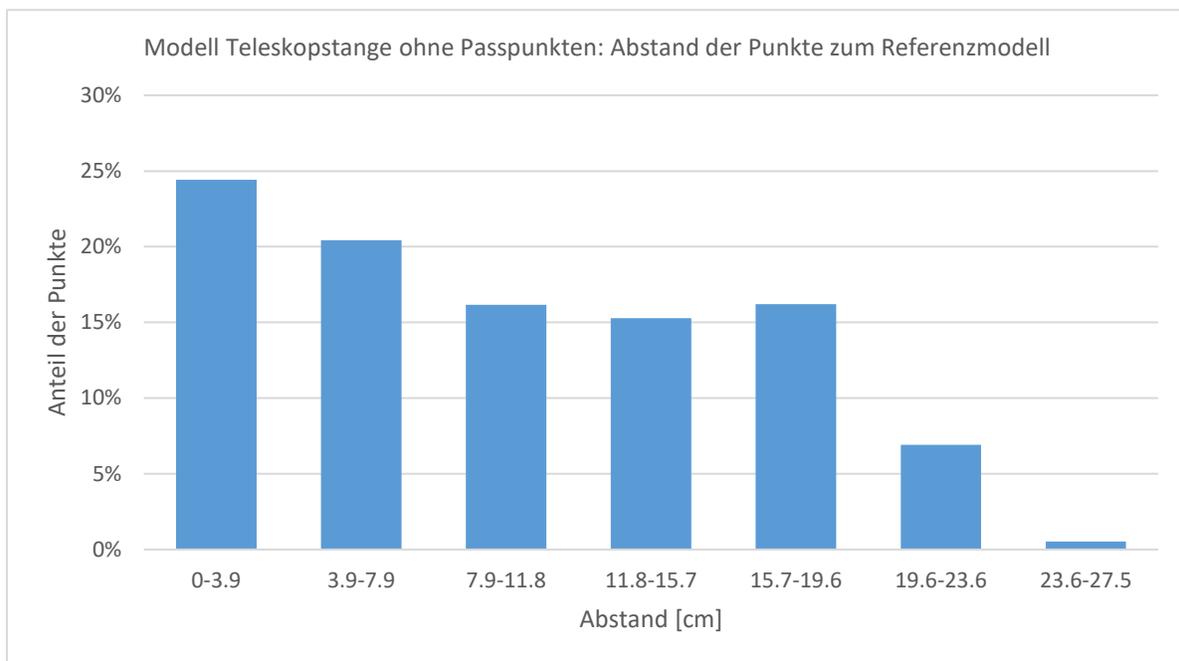


Abb. 9: Histogramm mit den geschätzten Abständen zum Referenzmodell für das 3D-Modell Teleskopstange ohne Passpunkte (Abb. 6)

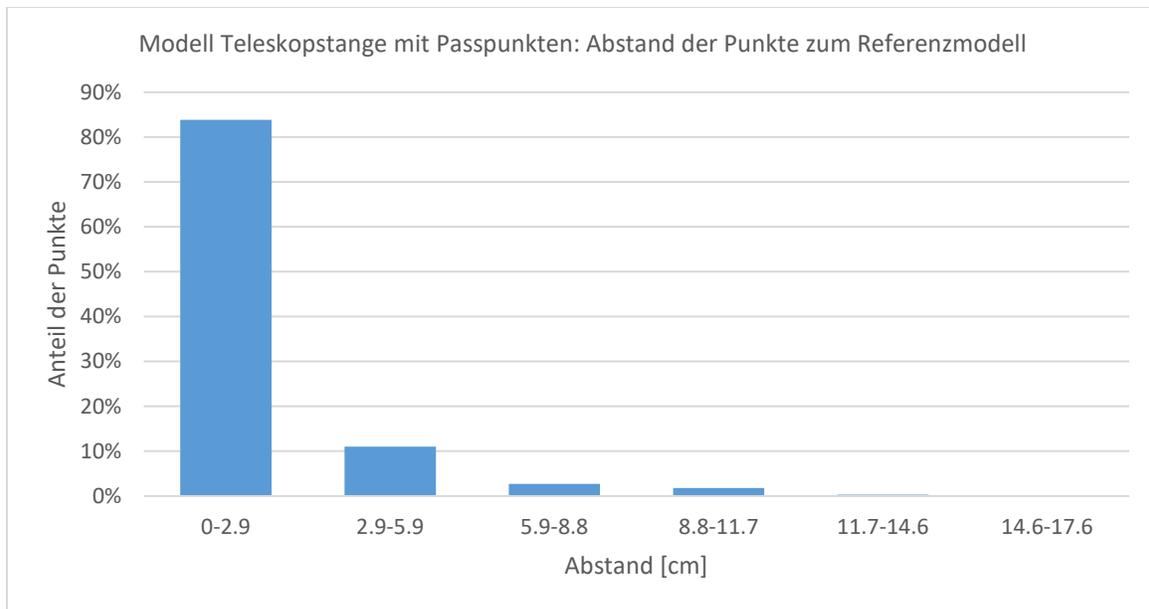


Abb. 10: Histogramm mit den geschätzten Abständen zum Referenzmodell für das 3D Modell Teleskopstange mit Passpunkten (Abb. 8)

4.2 Diskussion

Bei der Aufwölbung der Obertafel, wie sie in Abb. 5 und Abb. 6 zu sehen ist, muss es sich um einen Fehler im 3D-Modell handeln. Das kann insofern mit Sicherheit gesagt werden, da der Wasserdruck von dieser Seite auf die Tafel wirkt und zu einer Verformung in die entgegengesetzte Richtung führen würde. Aus statischen Gründen ist hier allerdings nur eine unwesentliche Veränderung anzunehmen. Wenn es lediglich um Visualisierung geht bzw. die Anforderungen an die Genauigkeit und Repräsentationsgüte moderat sind, genügt die Einpassung über vier identische Punkte, wie sie in Abb. 4, Workflow a dargestellt ist. Bei höheren Anforderungen an die geometrische Genauigkeit des rekonstruierten Objekts ist eine Passpunkt-basierte Bündelblockausgleichung unerlässlich (Abb. 4, Workflow b). Aus Tabelle 1 ist ersichtlich, dass sich durch die Hinzunahme von Passpunkten in der photogrammetrischen Auswertung die Fehlermaße deutlich reduzieren. Insbesondere der mittlere Abstand verbessert sich durch die Verwendung von Passpunkten von 8.9 cm auf unter 1 cm. Der maximale Abstand bleibt hoch, da die Ränder des Modells nicht durch Passpunkte korrigiert wurden. Dieses Detail kann in zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden.

In Abb. 9 und in Abb. 10 ist dargestellt, wie groß die Abstände zum Referenzmodell für das Modell Teleskopkamera ohne bzw. mit Passpunkten ist. Hier ist in Abb. 10 klar erkennbar, dass sich der Abstand für den Großteil der Punkte deutlich reduziert hat.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Bei einem Laufwasserkraftwerk in der Steiermark wurde im entleerten Zustand die Obertafel des Grundablasses vermessen und ein exaktes Referenzmodell erstellt. Dieses wurde verwendet, um die im zweiten Schritt aus Unterwasseraufnahmen erstellten photogrammetrischen 3D-Modelle zu

vergleichen. Dank der rasanten Entwicklung von Photogrammetrie-Software in den letzten Jahren sind innovative Analysen und die Erstellung von 3D-Modellen mit relativ geringem Aufwand und Kosten möglich (REMONDINO et al. 2014). Es hat sich gezeigt, dass die Modelle eine konkave Wölbung aufweisen. Durch die Verwendung von Passpunkten im Zuge der Bündelblockausgleichung konnten die Abweichungen vom Referenzmodell deutlich reduziert und in den cm-Bereich gebracht werden.

Im nächsten Schritt sind weitere Untersuchungen notwendig, wie viele Passpunkte notwendig sind, um Blockaufwölbungen weiter zu reduzieren. Vor allem im Hinblick auf die Untersuchung von größeren unter Wasser liegenden Bauwerken wie bspw. Talsperren ist dieser Punkt von Bedeutung. Zukünftige Untersuchungen zielen darauf ab, eine Prüfmethode zu entwickeln, die die Prüfung von getauchten Stahlwasserbaukomponenten mit einer spezifizierten Genauigkeit von < 1 cm ermöglicht.

6 Literaturverzeichnis

- AGISOFT METASHAPE PROFESSIONAL (Version 1.8.3) (Software) (2022). Retrieved from <http://www.agisoft.com/downloads/installer/>
- CAPOCCI, R., DOOLY, G., OMERDIC, E., COLEMAN, J., NEWE, T. & TOAL, D., 2017: Inspection-class remotely operated vehicles—a review. *Journal of Marine Science and Engineering*, **5**(1), <https://www.mdpi.com/2077-1312/5/1/13>.
- CHEMISKY, B., MENNA, F., NOCERINO, E. & DRAP, P., 2021: Underwater Survey for Oil and Gas Industry: A Review of Close Range Optical Methods. *Remote Sensing*, **13**(14). <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/14/2789>.
- CLOUDCOMPARE (version 2.12) (GPL software) (2022). Retrieved from <http://www.cloudcompare.org/>
- GROEMER, M. & ARTMANN, M., 2022: Digitally assisted underwater inspections for hydropower. *Hydropower & Dams*, **29**(5).
- MAI, C., PEDERSEN, S., HANSEN, L., JEPSEN, K. L. & YANG, Z., 2016: Subsea infrastructure inspection: A review study. *IEEE International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS)*, 71-76.
- REMONDINO, F., SPERA, M. G., NOCERINO, E., MENNA, F. & NEX, F., 2014: State of the art in high density image matching. *The Photogrammetric Record*, **29**(146), 144-166.