

## 3D Rekonstruktion von Biberdämmen zur Simulation des Wasserrückhaltes an Fließgewässern

LISA KNOPP<sup>1</sup>, KONRAD EDER<sup>1</sup>, LUDWIG HOEGNER<sup>1</sup> & UWE STILLA<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Der nachfolgende Beitrag untersucht die Leistungsfähigkeit der Photogrammetrie zur 3D-Rekonstruktion von Biberdämmen und beschreibt einen geeigneten Ablauf für die Datenerfassung und Prozessierung. Als Datengrundlage dienen Multikopter-Aufnahmen sowie terrestrische Aufnahmen des Biberreviers Glonn/Erdweg, die im Frühjahr 2016 erstellt wurden. Im Zuge der photogrammetrischen Auswertung werden zunächst Kameraorientierung, Punktverdichtung, Orthophoto und ein Digitales Geländemodell berechnet. Daraus werden schließlich projektrelevante Informationen, wie die Höhen der Wasserniveaus, die Lage der Uferlinien sowie die Dammsform extrahiert. Die erreichten Genauigkeiten werden anhand verschiedener Qualitätskriterien beurteilt und liegen im Bereich weniger Zentimeter.*

### 1 Einleitung

Hochwasserkatastrophen wie 2016 in Niederbayern zeigen, wie aktuell das Thema Hochwasserschutz ist und wie wichtig es bleibt, sich mit Möglichkeiten des Wasserrückhaltes auseinanderzusetzen. Genau dies ist das Ziel des 2015 gestarteten Projekts „Prozessbasierte Modellierung natürlicher sowie dezentraler Hochwasserrückhaltmaßnahmen zur Analyse der ereignis- und gebietsabhängigen Wirksamkeit“ des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz (DISSE 2016). Dabei werden nicht nur klassische Maßnahmen betrachtet, wie beispielsweise Rückhaltebecken, sondern auch „natürliche“ Retentionsmaßnahmen, wie Auenvegetation und Biberdämme.

Die Hochschule Weihenstephan-Triesdorf startete 2015 ein gesondertes Projekt, in dem insbesondere die Wirkung des Bibers auf den natürlichen Wasserrückhalt untersucht wird (ZAHNER 2015). Hierfür erfolgt zunächst eine Systematisierung und Typisierung der Biberdämme, bei der Geometrie (Lage, Dammhöhe, Durchmesser, etc.) und weitere technische Daten, wie z.B. Holzart und Durchlässigkeit, erfasst werden. Ausgehend von dieser Datengrundlage wird anschließend das Hochwasserverhalten von Biberdämmen hinsichtlich Stabilität, Dauerhaftigkeit und Statik untersucht. Hochwassersimulationen zeigen schließlich die Auswirkungen auf die Gewässerstruktur und Gewässerentwicklung. Um die Forschungen auf einer breiten Datengrundlage fundieren zu können, sollen mindestens 30 Biberdämme in Bayern erfasst werden.

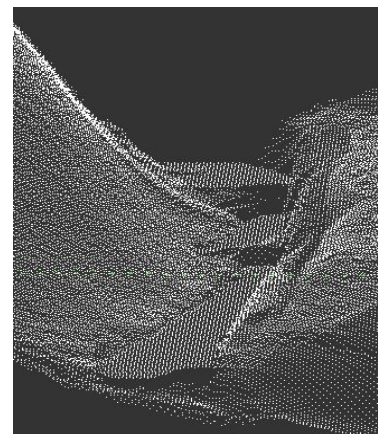


Abb. 1: Punktwolke des Staubereichs (überhöhte Ansicht)

---

<sup>1</sup> Technische Universität München, Photogrammetrie und Fernerkundung, Arcisstr. 21, 80333 München, E-Mail: [lisa.knopp, ludwig.hoegner, stilla]@tum.de, konrad.eder@bv.tum.de

Die bisherigen Verfahren zur Erfassung von Biberdämmen beruhen hauptsächlich auf Messungen mit Maßband und Nivellement (RUOFF 2015). Da dies jedoch sehr zeitaufwendig ist und lediglich einzelne Querprofile liefert, soll mit Hilfe der Photogrammetrie eine neue Verarbeitungskette für eine großflächige und detaillierte Erfassung entwickelt werden, um so geometrische Daten der Staubeiche, inklusive deren Dämme und Uferbereiche, zu gewinnen. Diese Daten können dann in Form einer 3D-Punktwolke in entsprechende hydrologische Auswertesoftware integriert werden und dienen gemeinsam mit weiteren Umgebungsparametern als Grundlage für Hochwassersimulationen.

## 2 Datenerfassung

Als Untersuchungsgebiet für die Erarbeitung einer geeigneten Methodik wurde das Biberrevier Glonn / Erdweg im Nordwesten Münchens ausgewählt. Das Revier ist durch seine kaskadenartige Struktur sehr repräsentativ: Getrennt durch vier große Dämme erstreckt sich das Gebiet entlang von ca. 350 m über fünf Haupt-Wasserniveaus. Über ein Betonrohr mit 40 cm Durchmesser kann das Wasser am Ende des Gebiets abfließen. Abb. 2 zeigt das Projektgebiet. Dargestellt sind die vier großen Dämme (blaue und weiße Linien) inkl. Hauptdamm, die unterschiedlichen Wasserniveaus (mit 1 bis 5 nummeriert) sowie der Abfluss.

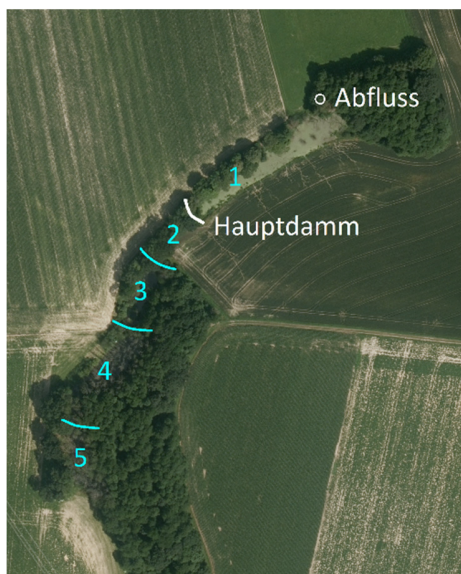


Abb. 2: Übersicht des Biberreviers Glonn / Erdweg

Da viele Biberreviere nur schwer zugänglich sind, wird zunächst versucht das Gebiet ausschließlich durch Luftbildaufnahmen zu erfassen. Für den späteren Übergang in Landeskoordinaten werden entlang des Projektgebiets Passpunkte angeordnet und mit einem GPS-Empfänger eingemessen. Zur Vermarkung werden vor allem rund zugeschnittene Styroporplatten verwendet, da diese leicht zu transportieren sind und ohne weiteres Zubehör mit einem Plastikdübel am Boden befestigt werden können. Zusätzlich wird in jedem Niveau eine Wassermarke für die Höhenbestimmung ausgelegt. Realisiert werden diese durch auf dem Wasser schwimmende Styroporplatten, die im Uferbereich mit einer Leine befestigt werden.

Im vorgestellten Gebiet erfolgte die Aufnahme mit Hilfe eines Multikopters und wurde in zwei unterschiedlichen Flughöhen in klassischer Blockgeometrie durchgeführt.

Die erste Aufnahme erfolgte Ende Februar bei einer

Flughöhe von ca. 50 m und starker Bewölkung. Die spätere Auswertung zeigte jedoch, dass sich die Bilder aus dieser Flughöhe auf Grund des hohen Waldanteils nicht eignen, um ausreichend eindeutige, homologe Punkte zu identifizieren. Die Befliegung wurde daher im Mai bei einer Flughöhe von ca. 100 m wiederholt. Zudem wurden einige Aufnahmen der Dämme vom Boden aus durchgeführt.

### 3 Photogrammetrische Auswertung

#### 3.1 Erzeugung photogrammetrischer Produkte

Das Datenmaterial wurde zunächst ausführlich analysiert und in unterschiedlicher Software verarbeitet. Dabei wurde sowohl die manuelle, also auch die semi-automatische und automatische Verknüpfungspunktsuche angewandt. Als optimal erwies sich ein semi-automatisches Vorgehen, das im Folgenden näher erläutert wird.

Es werden zunächst drei Passpunkte manuell in den Bildern eingemessen, so dass eine vorläufige Kameraorientierung berechnet und die Szene als 3D-Punktwolke dargestellt werden kann (siehe Abb. 3). Die Markierung der übrigen Passpunkte erfolgt anschließend direkt in der Punktwolke. Sobald ein Passpunkt in je drei Bildern markiert ist, kann die Messung in den übrigen Bildern automatisch über Farbkorrelation und die bisher geschätzte Position erfolgen.

Werden nicht ausreichend Verknüpfungspunkte zwischen den Bildern gefunden, werden die Bilder gegebenenfalls in mehreren Blöcken prozessiert. Um dies zu vermeiden, müssen manuelle Verknüpfungspunkte hinzugefügt werden. Hierfür eignen sich vor allem die ausgelegten Marken, aber ebenso andere markante Stellen, wie vom Biber angenagte Bäume oder Astgabelungen.

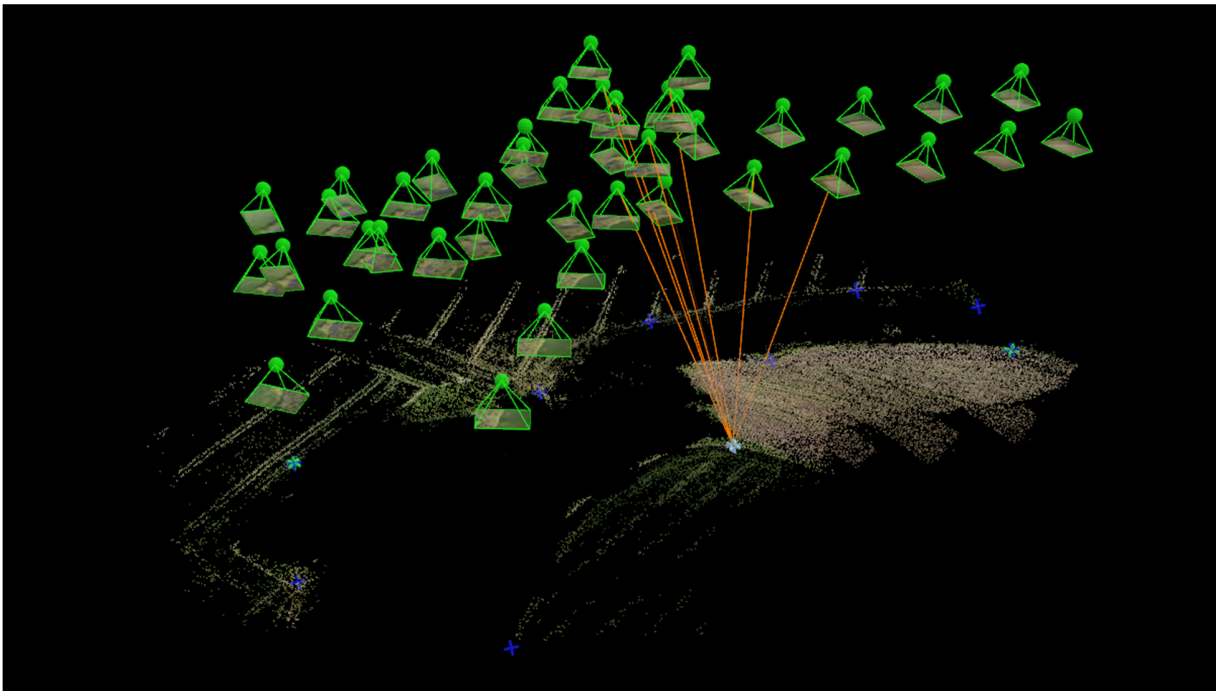


Abb. 3: 3D-Punktwolke nach Berechnung der Kameraorientierung

Nach einer automatischen Punktverdichtung werden anschließend ein Digitales Geländemodell (DGM) und ein Orthophoto generiert. Das Orthophoto wird optimiert, indem Saumlinien im Bereich der Dämme und Uferlinien vermieden und stattdessen in für die weitere Bearbeitung irrelevante Bereiche gelegt werden, wie beispielsweise Wald oder die Gewässermitteln. Das DGM wird zu einem späteren Zeitpunkt zusätzlich editiert (siehe Kap. 3.3).

### 3.2 Extraktion projektrelevanter Informationen

Ausgehend von den bisherigen Produkten können nun verschiedene für die o. g. Projekte relevante Informationen über das Biberrevier gewonnen werden. Hierzu zählen die Höhen der Wasserniveaus, die Uferlinien sowie die Dammform.

Zunächst erfolgt die Bestimmung der Wasserhöhen. Diese dienen bei Hochwassersimulationen zur Überprüfung des hydrologischen Modells: Die nach der Simulation erreichten Wasserhöhen des Staubereichs können mit den Gemessenen verglichen werden und erlauben so Rückschlüsse darauf, ob das Modell die Realität ausreichend widerspiegelt. Für die Messung der Höhengniveaus werden zunächst Referenzpunkte an der Wasseroberfläche ausgewählt und in den Bildern eingemessen. Hierzu dienen die bei der Befliegung ausgelegten Wassermarken, ebenso wie Wasserränder an Baumstämmen und sonstige aus dem Wasser auftauchende Gegenstände (hier z.B. ein Gartenstuhl). Sind alle Referenzpunkte gemessen, wird die Punktwolke optimiert, so dass Koordinaten für die neuen Referenzpunkte berechnet werden. Um eine ausreichende Genauigkeit zu erhalten, werden pro Wasserniveau mehrere Referenzpunkte gemessen und deren Höhenwerte anschließend gemittelt.

Ebenfalls von Interesse für die o. g. Projekte sind die Uferlinien, da diese die Staubereiche abgrenzen. Diese werden auf Grundlage des zuvor berechneten Orthophoto digitalisiert und als Vektordatei abgespeichert. Abb. 4 zeigt das Orthophoto mit den eingezeichneten Uferlinien (weiß) sowie den geschätzten Dammkronen (rot).

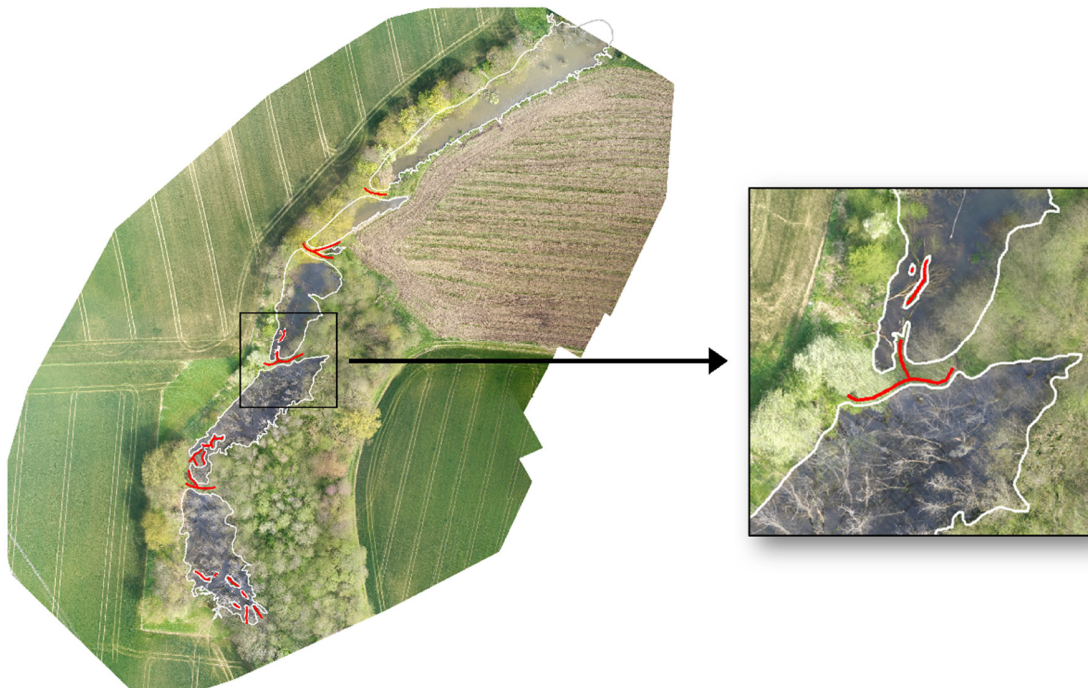


Abb. 4: Orthophoto mit digitalisierten Uferlinien und geschätzten Dammkronen

Von besonderer Bedeutung ist zudem die Form des Dammes, da sie entscheidend für das Verhalten bei Hochwasser und somit relevant für die entsprechenden Simulationen ist. Aus dem Orthophoto kann bereits die ungefähre Lage des Dammes abgegrenzt werden, Höheninformationen können



bisher jedoch nicht extrahiert werden. Grund hierfür ist, dass im Zuge der photogrammetrischen Auswertung im Bereich der Dämme nicht ausreichend Verknüpfungspunkte gefunden wurden und somit keine Punktwolke der Dämme vorliegt. Entsprechend stellen auch die daraus generierten DGM-Werte den Damm nicht ausreichend dar. Die Bilder werden daher gemeinsam mit den bereits berechneten Parametern in eine andere Auswertesoftware importiert. Dort können die Bilder im Stereomodus übereinandergelegt und so der Höhenverlauf der Dammkrone abgegriffen werden. Leider zeigt sich bei Kontrollmessungen, dass es in den Höhenwerten zu großen Abweichungen in dieser Software kommt. Eine absolute Bestimmung der Dammform ist somit nicht möglich. Auch relative Messungen sind nicht möglich, da die Messmarken im vorliegenden Maßstab nicht genau genug aufgesetzt werden können.

Die Verwendung von zusätzlichen terrestrischen Aufnahmen ist folglich zwingend notwendig. Versuche mit den Bodenaufnahmen zeigen, dass dadurch nach der Prozessierung sogar einzelne Hölzer deutlich zu erkennen sind und diese als 3D-Objekte modelliert werden können. Uferlinien und Dammkronen können in diesem Fall direkt in der Punktwolke digitalisiert werden (siehe orange Polylinie in Abb. 5), und enthalten somit nicht nur Lage-, sondern auch Höheninformation. Ebenso können terrestrische Aufnahmen für die Bestimmung der Wasserhöhe von Vorteil sein. Durch die bessere Auflösung sind zusätzliche Strukturen, wie beispielsweise kleine Blätter, auf der Wasserfläche zu erkennen. Diese wiederum eignen sich ausgezeichnet als Referenzpunkte für die Bestimmung der Wasserhöhe.

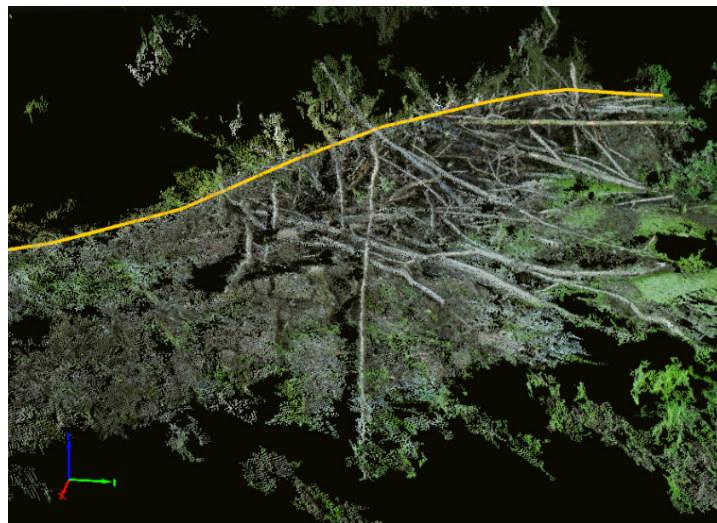


Abb. 5: Texturierte Punktwolke eines Biberdamms. Mit einer 3D Polylinie (orange) wird die Dammkrone digitalisiert.

### 3.3 Visualisierung

Bevor das DGM visualisiert werden kann, müssen noch einige manuelle Korrekturen durchgeführt werden: Wegen des starken Bewuchses im Bereich der Uferzone enthält das DGM Bäume und Sträucher, die entfernt werden müssen. Damit keine Löcher entstehen, wird der Datensatz mit dem amtlichen DGM (Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, München) kombiniert und der Verlauf anschließend geglättet. Zudem kann die Wasseroberfläche auf Grund mangelnder Verknüpfungspunkte nicht korrekt dargestellt werden. Die Wasserniveaus werden daher unter Zuhilfenahme der extrahierten Uferlinien und berechneten Höhen auf das korrekte Niveau gesetzt. Abb. 1 zeigt einen Ausschnitt der finalen Punktwolke, in dem die untersten drei Wasserniveaus (1-3) in überhöhter Ansicht dargestellt sind. Eine ebenfalls sehr anschauliche Darstellung liefert die Berechnung eines Reliefs.

## 4 Diskussion der Ergebnisse

Die erstellten Produkte dienen als Grundlage für die Simulation von Hochwasserszenarien in den Bibergebieten. Die Daten sollten daher eine Genauigkeit im Zentimeterbereich erreichen.

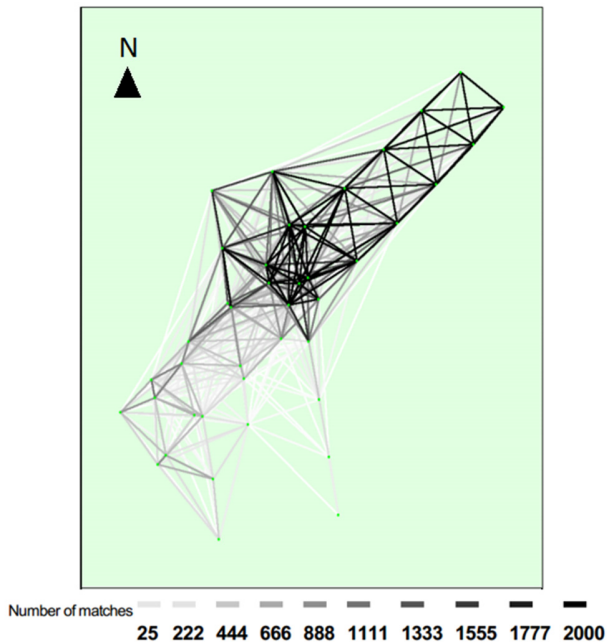


Abb. 6: Stärke des Matchings. Je dunkler die Linien sind, desto besser ist das Matching

Grundlegend hierfür sind geeignete Bilder, die prägnante Strukturen zeigen und ausreichend Überlappung aufweisen. Nur so können genügend 3D-Verknüpfungspunkte durch Matching generiert werden. Für eine hohe Qualität sollten mindestens 1.000 Verknüpfungspunkte pro Bild generiert werden (PIX4D 2016). Abb. 6 zeigt eine Aufsicht der Kamerapositionen und visualisiert die Qualität der Verknüpfung zwischen den Bildern. Je dunkler die Linie zwischen zwei Kamerapositionen, desto mehr verknüpfte 2D-Merkmalpunkte liegen vor und desto besser ist das Matching. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Verknüpfung in den nördlichen, nicht bewachsenen Bereichen des Reviers sehr gute Qualität hat, hingegen in den höher liegenden, stark bewachsenen Bereichen eine sehr geringe Qualität.

Als Maß für die Genauigkeit der Georeferenzierung dient das quadratische Mittel (RMS). Im vorliegenden Projekt erreicht dies 1,1 cm und ist damit in etwa halb so groß wie die durchschnittliche Bodenpixelgröße von 2,13 cm. Für spätere Hochwassersimulationen ist insbesondere die relative Genauigkeit der Punktwolke relevant. Als Faustformel kann dabei von der ein- bis dreifachen Bodenpixelgröße ausgegangen werden (PIX4D 2016). Dies entspricht einer relativen Genauigkeit von ca. 2-6 cm. Für bessere Genauigkeiten ist eine Verkleinerung der Bodenpixelgröße nötig. Terrestrische Aufnahmen sind in diesem Fall vorteilhaft.

Die Auflösung von DGM und Orthophoto sind ebenfalls abhängig von der Bodenpixelgröße und den zugrunde liegenden 3D-Punkten. Ausgehend vom o.g. RMS liefert eine Digitalisierung im Orthophoto somit eine Lagegenauigkeit von mehreren Zentimetern bis Dezimetern. Durch eine 3D-Digitalisierung innerhalb der Punktwolke kann das Ergebnis gegenüber dem Orthophoto deutlich verbessert werden. Die Qualität des DGMs wird zudem maßgeblich dadurch beeinflusst, dass Bruchkanten fehlen und in den Uferbereichen kaum Stützpunkte vorliegen.

Die Bestimmung der Absoluthöhen der Wasserniveaus stellt den kritischsten Aspekt bei der Erstellung der finalen Punktwolke dar. In den freiliegenden Staubereichen 1 bis 3 (siehe Abb. 2) liegt die Genauigkeit der gemessenen Höhen bei Werten von 2 bis 7 cm bei Niveauunterschieden von ca. 0,5 – 1 m. In den stark bewaldeten Bereichen 4 und 5 erreicht jedoch die Standardabweichung teilweise bis zu 40 cm. Die Ergebnisse der Niveaus 4 und 5 sind für hydrologische Simulationen daher zu ungenau.

Auf Grund des natürlichen Umfelds der Biberdämme kommt es bei der Erfassung vermehrt zu Schwierigkeiten, die gemeinsam mit Lösungsansätzen im Folgenden erläutert werden.

Die größte Herausforderung stellt die Verdeckung durch Vegetation dar. Die Dämme liegen meist in bewaldeten Gebieten, sodass diese auf den Aufnahmen häufig durch Bäume verdeckt sind. Zudem sind die Dämme selbst oft mit hohen Gräsern und Sträuchern bewachsen, was die Bestimmung der Dammform erschwert. Die Aufnahmen sollten daher in den Wintermonaten November bis März erfolgen, in denen der Bewuchs noch nicht sehr ausgeprägt ist. Zusätzlich zur Blockbefliegung sollten Bodenaufnahmen aus unterschiedlichen Perspektiven vorgenommen werden, um eine freie Sicht auf Dämme und Uferlinien zu ermöglichen.

Das Biberrevier besteht in der Regel nicht nur aus einem Hauptdamm, sondern aus einer Gruppe mehrerer Dämme. Das Gebiet Glonn / Erdweg beinhaltet beispielsweise neben den vier großen Dämmen noch zahlreiche kleinere Dämme, die sich jeweils nur über einen Teil der Gewässerbreite erstrecken. Solche Strukturen erschweren die Bestimmung der Wasserhöhen und führen zu großen Standardabweichungen. Ausgehend von Luftbildern ist es zudem äußerst schwer zu beurteilen, ob es sich bereits um einen Damm handelt oder nur um belanglos im Wasser liegendes Gehölz bzw. eine weiter ins Wasser reichende Grasfläche. Eine genaue Dokumentation während der Aufnahmen vor Ort ist daher vorteilhaft.

Die Verdeckung durch Vegetation spielt auch bei der Wahl geeigneter Passpunkte eine Rolle. Diese sollten in der Nähe des zu untersuchenden Gebiets gut verteilt sein, damit es nicht zu Verdrehungen des Systems kommt. Zudem dürfen die Passpunkte auch nicht auf einer Raumgerade liegen, da dadurch das Normalgleichungssystem bei der Bündelblockausgleichung singulär wird. Insbesondere bei langgezogenen Bibergebieten sollte daher darauf geachtet werden, die Passpunkte auf beiden Uferseiten zu verteilen, um so schlecht konditionierte Gleichungssysteme zu vermeiden.

Die Messung der Referenzpunkte auf der Wasseroberfläche stellt grundsätzlich eine Herausforderung dar. Die Wassermarken bieten die einfachste Möglichkeit die Wasserhöhe zu messen. Jedoch sollte bei der Befliegung darauf geachtet werden, dass die Marken während der Befliegung nicht ihre Lage ändern (z.B. auf Grund von Wind). Weitere Referenzpunkte zu finden ist oftmals sehr schwierig. Bäume und andere Objekte, die aus dem Wasser ragen, scheinen gut geeignet. Jedoch ist oft schwer festzustellen, an welcher Stelle das Objekt das Wasser verlässt. Dunkle Flecken im Wasser sind ebenfalls nur unter Vorbehalt zu verwenden, denn es könnte sich dabei um Blätter oder andere Partikel auf der Wasseroberfläche handeln, aber auch um unter Wasser liegende Steine. Bei der Aufnahme des Gebiets sollte daher eine möglichst große Anzahl an Wassermarken eingesetzt werden, insbesondere in stark bewaldeten Bereichen.

Auch Überlappung und Flughöhe spielen eine wichtige Rolle, da diese entscheidend für die Durchführung der Bündelblockausgleichung sind. Die Distanz zur Geländeoberfläche sollte so gewählt werden, dass der Anteil prägnanter Strukturen groß genug ist. Besonders in Waldgebieten sind bei Aufnahmen aus zu geringem Abstand Strukturen oftmals nur unzureichend erkennbar. Bei einer Aufnahme aus größerer Distanz werden diese deutlicher, was die Verknüpfungspunktsuche erleichtert, jedoch gleichzeitig die Auflösung verschlechtert. Für bewaldete Gebiete empfehlen sich eine Überlappung von 60 % und eine Flughöhe zwischen 70 und 100 m bei Verwendung der Kamera Nex-7 mit 19 mm Festbrennweite. Bei offenem Gelände kann die Flughöhe reduziert werden.

Zuletzt darf bei allen Ergebnissen und Genauigkeiten nicht vergessen werden, dass sich die Biberdämme und Wasserniveaus durch die natürliche Aktivität des Bibers und Niederschläge in ständigem Wandeln befinden. Alle Aufnahmen sollten daher zur gleichen Zeit vorgenommen werden, um so eine in sich konsistente Abbildung zu gewährleisten.

## 5 Fazit & Ausblick

Zusammenfassend eignen sich die Methoden der Photogrammetrie gut für die 3D-Rekonstruktion von Biberdämmen. Aufnahmen aus der Luft und vom Boden erlauben es, auch nicht begehbare Dämme genau zu vermessen. Der zeitliche Aufwand ist deutlich geringer und die erzielte Punktdichte wesentlich höher als bei den bisherigen Verfahren mit Maßbandmessungen.

Aus den Messungen können neben der 3D-Punktwolke weitere wichtige Produkte extrahiert werden. Dazu zählen das Orthophoto, das als Grundlage für die Klassifizierung der Lebensraumtypen dienen kann, die Uferlinien, die Höhenniveaus in den einsehbaren Bereichen sowie die Lageabgrenzungen der Dämme. Die Genauigkeit der finalen Punktwolke liegt im Bereich weniger Zentimeter, was ein wichtiges Ergebnis für die hydrologischen Simulationen ist. Mit der bisherigen Arbeit wurde lediglich der Bereich des Dammes über Wasser rekonstruiert. Doch auch für die Bereiche unter Wasser kann die Photogrammetrie Lösungsansätze liefern: In Bereichen klaren und stillen Wassers können mittels Photo-Bathymetrie die Objektkoordinaten der Gewässersohle berechnet werden (MAAS 2015). Zusätzlich zu den passiven Kameraaufnahmen können auch aktive Lasersysteme dazu genutzt werden, um bei klarem Wasser Bodenbereiche sichtbar zu machen. Einen Mehrgewinn könnten zudem Thermalaufnahmen liefern, da mit ihrer Hilfe Temperaturunterschiede zwischen Totholz und fließendem Wasser visualisiert und somit Durchflüsse innerhalb des Biberdamms detektiert werden könnten.

## 6 Literaturverzeichnis

- DISSE, M., 2016: ProNaHo: Prozessbasierte Modellierung Natürlicher sowie Dezentraler Hochwasserrückhaltemaßnahmen zur Analyse der ereignis- und gebietsabhängigen Wirksamkeit (ProNaHo). <https://www.hydrologie.bgu.tum.de/index.php?id=176&L=0>, letzter Zugriff am 15.06.2016)
- MAAS, H.-G., 2015: On the Accuracy Potential in Underwater/Multimedia Photogrammetry. *Sensors* 2015, **15**(8), 18140-18152
- PIX4D, 2016: Pix4Dmapper Software Manual. <https://support.pix4d.com/hc/en-us#gsc.tab=0>, letzter Zugriff am 07.07.2016.
- RUOFF, K., 2015: Auswirkungen von Biberdämmen auf die Strukturvielfalt und Durchgängigkeit von Fließgewässern im östlichen Main-Kinzig-Kreis. Masterarbeit, Johann Wolfgang Goethe-Universität, Institut für Ökologie, Evolution und Diversität, Fachbereich Biowissenschaften, Frankfurt am Main.
- ZAHNER, V., 2015: Die Wirkung des Europäischen Bibers (*Castor fiber*) auf den natürlichen Wasserrückhalt an ausgewählten Fließgewässern Bayerns. Projektbeschreibung Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Fakultät für Wald und Forstwirtschaft, Weihenstephan.