

Methodenvergleich zur Ermittlung von Sedimenthorizonten mittels komplementären Messsystemen

Sebastian Dürr¹, Michael Kögel¹, Niklas Müller¹, Dirk Carstensen¹, Annett Scholz²

¹Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TH Nürnberg, Nürnberg, Deutschland

²Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (LTV), Pirna, Deutschland

Für die Erfassung von Sohlgeometrien in Talsperren existieren unterschiedliche komplementäre Messsysteme. Die komplexen Verfahren wurden an zwei Talsperren unterschiedlicher Talsperrenklassen angewendet und verglichen. Dabei spielte, neben der Festlegung von Grenzen für die Anwendbarkeit, vor allem die Abgrenzung des notwendigen Datenumfanges im Spannungsfeld von Verarbeitbarkeit und ausreichender Datenpräzision eine zentrale Rolle. In Erweiterung dessen wurde ein Messkonzept entwickelt, um die Aufnahme sowie die Verarbeitung der Daten zu vereinheitlichen. Weiterhin wurde das Ziel verfolgt, die Datenaufnahme einer praxisnahen Lösung zuzuführen. Dieses sollte, trotz der unterschiedlichen Datengrundlagen und ggf. Untersuchungsziele, einen standardisierten Ablauf für Sohlaufnahmen an Talsperren ermöglichen.

1. Projektanstoß

Damit die Funktionen der Stauanlagen und Gewässer dauerhaft sichergestellt werden können, ist es u. a. erforderlich, ein gezieltes Management der Feststoffe in den Stauräumen und Flussgebieten zu betreiben. Die Planung und Umsetzung von Sedimentberäumungen an Talsperren erfolgen dabei in einem Spannungsfeld zwischen wirtschaftlichen Möglichkeiten, den Grundsätzen des Bodenschutzes, dem Abfall- und Immissionsschutzrecht sowie dem Wasserrecht, den Zielen des Natur- und Artenschutzes und den technischen Erfordernissen. Aufgrund regionaler Besonderheiten, den damit einhergehenden spezifischen Schadstoffgehalten und Eigenschaften des Sediments und den unterschiedlichen Möglichkeiten der Verwertung ist jede Maßnahme grundsätzlich als Einzelfall zu betrachten. Für die Handelnden innerhalb der LTV und bei beteiligten Behörden und Auftragnehmern ist es dennoch von Vorteil, wenn Teilaspekte des Planungsprozesses systematisiert werden können. Dies betrifft insbesondere die Erfassung der Volumina und der Eigenschaften (bodenmechanisch und chemisch) der abgelagerten Sedimente als Basisinformation für die Bewertung von Möglichkeiten der Entsorgung.

2. Fragestellung

Im Rahmen des „Pilotprojekts Stauraumverlandung“ sollten zunächst Stauanlagen hinsichtlich des abgelagerten Sedimentvolumens untersucht werden. Ziel war es dabei zum einen, Methoden der Volumenermittlung der abgelagerten Feststoffe (Sediment, organische Auflagen etc.) zu testen. Das Volumen der abgelagerten Stoffe ist eine wichtige Ausgangsgröße für die Ausschreibung von Beräumungsmaßnahmen und bestimmt wesentlich die dafür aufzuwendenden Kosten. Es sollte Klarheit darüber geschaffen werden, welche Untersuchungen und Auswertungen bei der künftigen Planung von Feststoffberäumungen anzustellen sind, um einfach, schnell und kostengünstig das Volumen der abgelagerten Stoffe bestimmen zu können. Dabei sollten auch in der LTV vor-

handene oder durch den Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN) bereitgestellte raumbezogene Daten einbezogen werden.

Im Rahmen des Pilotprojektes wurden die ersten Untersuchungen an der Talsperre Baderitz durchgeführt (Carstensen et al., 2022), wobei Erkenntnisse im Zusammenhang mit der Analyse von „kleinen“ Talsperren (Talsperrenklasse 2 nach DIN 19700-11) abgeleitet werden sollten. Aufbauend auf diesen Ergebnissen und zur Erweiterung der gesammelten Erkenntnisse wurde die Talsperre Pirk als „größere“ Talsperre (Talsperrenklasse 1 nach DIN 19700-11) untersucht und betrachtet (Carstensen et al., 2023). Bei Letzterer war nur die Hauptsperre Teil des Untersuchungsprogrammes.

Die Untersuchungen umfassten die Befliegung der Uferbereiche mittels Drohne – „unmanned aerial vehicle – UAV“ und Auswertungen mittels Structure from Motion Verfahren (SfM), die Aufnahme der Bathymetrie mittels „unmanned surface vehicle – USV“, die Erfassung von Sedimentschichtungen mittels Sedimentecholot „sub bottom profiler – SBP“ und die Entnahme von ungestörten Bodenproben mittels Sedimentcorer.

Im Folgenden werden aufgrund der größeren Relevanz in der Hauptsache die Ergebnisse an der Talsperre Pirk vorgestellt.

3. Messmethodik und Messtechnik

3.1. Messvorhaben

Für die Aufnahme der Bathymetrie wurden verschiedene Messverfahren angewendet. Um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit zu erhalten, wurde mittels der USV Software (Neptus) ein Messraster geplant und anschließend sowohl mittels USV als auch SBP die Talsperre befahren. Beide Systeme erheben die Daten mittels Echolotung. Zur besseren Handhabung wurde das Gewässer in Bereiche eingeteilt und ein Messraster aus parallelen Bahnen darübergerlegt. Diese Bahnen (sogenannte rows maneuver) hatten zueinander einen Abstand von 10 m (TS Baderitz) bzw. 25 m (TS Pirk). Die un-

terschiedlichen Abstände resultieren aus der Ausdehnung des Gewässers im Hinblick auf die spätere Möglichkeit zur Handhabung der Daten. Es wurden zusätzliche freie, ufernahe Befahrungen durchgeführt, um einerseits einen möglichst geschlossenen Bereich zu erhalten und andererseits Vergleichsdaten für die Anbindung zu den photogrammetrischen Aufnahmen zu erzeugen.

Um eine Unterscheidung der aufgenommenen Schichten zu vereinfachen, wird die erfasste Sohlgeometrie (also die oberste Schicht) als Sedimentauflage (SeA) und die tiefste festgestellte Schicht als anstehender Boden (AB) bezeichnet.

In Vorbereitung der Messeinsätze wurden die vorhandenen Daten (historische Pläne, bereits durchgeführte (Teil-)Vermessungen, Bestandsunterlagen) gesichtet, plausibilisiert und dann, wenn mehrere Datensätze vorhanden waren, der geeignetste als Referenz festgelegt. Dies diente dem Zweck, eine Zu- oder Abnahme der Sedimentauflage ermitteln zu können.

Für die Planung der Messeinsätze war vor allem die Wahl des Zeitraumes innerhalb eines Jahres von Bedeutung. Für die Befliegung ist ein möglichst niedriger Wasserstand von Vorteil, da hierdurch zeitweise überstaute Gewässerbereiche aufgenommen werden können. Diese Daten eignen sich dann zur Plausibilisierung der Höhen beim Zusammenführen der Messdaten. Des Weiteren eignen sich Zeiträume mit geringer Vegetation besser für Aufnahmen mittels SfM. Für die Aufnahme mittels USV/SBP sind hohe Wasserstände von Vorteil. Hierdurch wird der Totbereich in den Wasserwechselzonen, welcher aufgrund der notwendigen Mindestwassertiefen der Messgeräte (50 cm) entsteht, minimiert.

3.2. Messtechnik

Globale Positionierung

Durch die Verwendung eines globalen Navigationssatellitensystems (engl. global navigation satellite system, GNSS), wie beispielsweise dem Global Positioning System (GPS), ist es möglich, die mit einem Messgerät aufgenommenen Daten zu georeferenzieren und somit global umfassenden Koordinatensystemen zuzuordnen. Um die Positionsgenauigkeit dieser Daten zu erhöhen, können ergänzende Satellitenpositionierungsdienste verwendet werden. Der Satellitenpositionierungsdienst der Deutschen Landesvermessung (SAPOS) ermöglicht mit einem Echtzeit-Positionierungs-Service (Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service, HEPS) und durch Anwendung des Echtzeitkinematik-Verfahrens (engl. real time kinematic, RTK) die präzise Positionsbestimmung mit einer Lagegenauigkeit von 1-2 cm und einer Höhengenaugkeit von 2-3 cm (SAPOS, 2015). Die GNSS-Korrekturdatenströme werden per NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) über das mobile Datennetzwerk an das Messgerät gesendet. Diese Art der Positionsbestimmung findet mittlerweile bei diversen Messgeräten sowohl im Bereich der terrestrischen (Mancini und Salvini, 2020), der bathymetrischen

(Böder et al., 2010), als auch in der hybriden Datenerfassung (Kutschera et al., 2018), Anwendung.

GPS-Rover - Leica GNSS-Rover

Zur Georeferenzierung und Absteckung einzelner Punkte im Bereich der Talsperren wurde ein Leica GS18I-GNSS-RTK-Rover eingesetzt, welcher ebenfalls an den SAPOS-Dienst angebunden war. Mit diesem Rover wurden Schachbrettmarker (engl. ground control points, GCP) im Untersuchungsgebiet eingemessen, welche zur Stationierung der Photogrammetrie-Datensätze verwendet wurden. Das Gerät wurde außerdem dazu verwendet, über den NMEA 0183-Kommunikationsstandard (National Marine Electronics Association) die Messdaten des Sedimentecholotes zu georeferenzieren. Zudem wurden die Wasserspiegellagen und die Probenahmepositionen aufgenommen.

Luftdrohne - UAV

Zur Ergänzung der bathymetrischen Vermessungsdaten mit georeferenzierten Uferlinien und zur Plausibilisierung der USV-Vermessungsdaten anhand von Digitalen Geländemodellen (DGM) wurde das unmittelbar an den Stausee angrenzende Gelände photogrammetrisch durch Luftbilddaufnahmen erfasst.

Zur Aufnahme wurde ein unbemanntes Luftfahrzeug des Typs DJI Phantom 4 RTK verwendet (vgl. Abbildung 1). Ähnlich wie das USV war das Gerät an den RTK-Dienst und an SAPOS angebunden, weshalb die GPS-Positionierung der Drohne sowie das aus den Luftbilddaufnahmen generierte 3-D-Modell eine annähernd identische Genauigkeit aufweisen. Bei dem bereits erwähnten Structure from Motion Verfahren werden die Höheninformationen aus den zweidimensionalen Bilddaufnahmen ermittelt.

Die Luftdrohne wurde außerdem zur Fotodokumentation konzeptrelevanter Gegebenheiten im unmittelbar angrenzenden Bereich der Stauseen sowie von schwer zugänglichen Bereichen verwendet.



Abbildung 1: DJI Phantom 4 RTK Drohne beim Einsatz an der Talsperre Pirk

Die Photogrammetrie beschreibt allgemein die Methodik, welche durch das Überlagern mehrerer Fotoaufnahmen eines Objektes oder eines Gebietes, die aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen wurden, die

Bestimmung der räumlichen Lage und der dreidimensionalen Form ermöglicht. Ziel ist es, durch die Auswertung der Aufnahmen Höhen- und Lageinformationen über das jeweilige Betrachtungsgebiet zu gewinnen. Im Gegensatz dazu steht das Verfahren der Bildaufnahme, wobei die dreidimensionale Geometrie eines Körpers in eine zweidimensionale Abbildung überführt wird.

Zur Ableitung der Geländestruktur eines aus Luftbildaufnahmen resultierenden photogrammetrischen Datensatzes gibt es unterschiedliche Herangehensweisen. Das im Zuge der Datenverarbeitung entstehende digitale Oberflächenmodell (digitales Oberflächenmodell, DOM) stellt die Erdoberfläche unter Einbezug aller sich dort befindlichen natürlichen (Vegetation) und künstlichen (Infrastruktur) Objekte dar. Durch unterschiedliche Prozesse lässt sich daraus ein digitales Geländemodell (digitales Geländemodell, DGM) ableiten, welches ausschließlich die Geländeinformationen widerspiegelt. Letzteres ist beispielsweise meist die Grundlage für hydrodynamisch-numerische Untersuchungen (Langhammer, Bernsteinová und Miřijovský, 2017 und findet auch in diversen anderen Fachbereichen Anwendung. Eine zielführende Methodik zur Interpolation eines DGM aus einem DOM stellt die Cloth-Simulation nach Zhang et al. (2016) dar. Dabei wird ein digitales „Tuch“ generiert, welches an die Unterseite des vertikal gespiegelten Datensatzes angenähert wird. Auf diese Weise wird lediglich die Geländestruktur abgebildet und etwaige Bebauungen sowie Vegetation können gefiltert werden. Diese Methode wurde zur Filterung der Datensätze aus dem SfM-Verfahren angewendet.

Das Vorhandensein von Vegetation und saisonalen Effekten zur Analyse von Geländeänderungen, sowohl zwischen Datensätzen aus zeitlich nah beieinanderliegenden als auch zeitlich weit auseinanderliegenden Datenaufnahmen, erschwert die ordnungsgemäße Kategorisierung von Distanzunterschieden erheblich. Witterungsbeeinflusst können kurzfristig Bewegungen der Vegetation (Blätter, Äste) bereits während einer einzelnen Datenaufnahme entstehen, wodurch Fehler im SfM-Prozess entstehen können. Langfristig betrachtet können zusätzlich saisonale Effekte (Vegetationswachstum und -schwund, Schneeeauflage) auftreten (Qin, Tian und Reinartz, 2016). Derlei Veränderungen sind meist nicht Bestandteil der gewünschten Veränderungsanalyse, können aber mitunter zu deutlichen Distanzunterschieden zwischen multitemporalen Datensätzen führen.

Autonomes Messfahrzeug - USV

Im Rahmen der Untersuchungen wurde die Bathymetrie des Stausees flächig aufgenommen. Die Aufnahme erfolgte durch vordefinierte Fahrtrouten mit einem autonomen Messfahrzeug USV (SONOBOT des Herstellers Evologics). Entlang dieser Routen wurden die Messungen im Abstand von 1 m durchgeführt. Die Messfrequenz lag hierbei im hochfrequenten Bereich bei

100 kHz. Die Abbildung 2 stellt beispielhaft die geplanten Fahrtrouten in einem Abschnitt des Stausees der Talsperre Pirk dar.



Abbildung 2: USV (SONOBOT) (linkes Bild) des IWWN beim Messeinsatz und beispielhafte Darstellung der Fahrtrouten des USV (rechtes Bild) zur flächigen Aufnahme der Bathymetrie des Stausees der Talsperre Pirk. (Quelle: open sea map/Software Neptus)

Das USV war während der Untersuchungen an den SAPOS-Dienst angebunden. Die im Preprocessing vordefinierten Routen konnten durch die genaue Positionierung präzise und autonom befahren werden.

Durch die Kombination aus GPS-gestützter Vermessung und autonomem Betrieb kann grundsätzlich eine Langzeiterfassung von Gewässersohlen, ein sogenanntes Monitoring, durchgeführt werden. Vordefinierte Fahrtrouten, welche zu einem Zeitpunkt A erfasst wurden, können zu einem späteren Zeitpunkt B erneut befahren werden. Der Vergleich eines Untersuchungsgebietes zwischen zeitlich variierenden Aufnahmen gibt dann Aufschluss über strukturelle Veränderungen des Reliefs.

Sedimentecholot - Sub bottom profiler (SBP)

Ergänzend zur Bathymetrie des Stausees wurde die Sedimentschichtung mit einem Sedimentecholot SES 2000 Compact (engl. sub bottom profiler, SBP) des Herstellers Innomar untersucht. Dabei wurden mittels zwei unterschiedlicher Schallfrequenzen verschiedene Tiefenpenetrationen ermöglicht, wodurch Schichtungen und Schichtgrenzen erfasst werden konnten. Die Aufnahmen erfolgten ebenfalls in Form abgefahrener paralleler Bahnen und orientierte sich an den Fahrtrouten des USV. Dadurch besitzen die jeweiligen Messdaten ein hohes Vergleichspotenzial. Die Referenzierung erfolgte mittels externem GPS-Rover (Leica GNSS-Rover), welcher mittels RTK an den SAPOS Dienst angebunden war.

Bei der messtechnischen Erfassung mittels SBP gibt es mehrere entscheidende Parameter, welche für die Messfahrten konfiguriert werden müssen. Die Frequenz legt fest, in welcher Periode die Signale ausgesendet werden. Die hohen Frequenzen, welche besonders zur Erfassung der Grenzschicht Wasserkörper-Gewässersohle geeignet sind, sind standartmäßig auf 100 kHz eingestellt. Die niedrigen Frequenzen können bei einer Bandbreite zwischen 4 – 15 kHz individuell eingestellt werden. Dabei können die niedrigeren Frequenzen (4 – 10 kHz) für eine stärkere Penetration genutzt werden (beim vorliegenden SBP nach Innomar Technologie

GmbH (2009) bis zu 40 m Eindringtiefe), während die höheren (10 – 15 kHz) eine genauere Auflösung der Tiefenpenetration bewirken. Für die Untersuchungen, bei welchen aufgrund der zu erwartenden Sedimentschichtmächtigkeiten von einem Eindringen im Bereich weniger Meter ausgegangen wurde, wurde letzteres angestrebt, um eine möglichst präzise Tiefenschätzung für die einzelnen Schichten zu ermöglichen. Bei den Untersuchungen wurden 12 kHz verwendet. Die Anzahl an ausgesendeten Pulsen (je höher die Anzahl an Pulsen desto mehr Energie wird abgestrahlt) sollte so gering wie möglich gehalten werden. Mittels dieser Einstellung kann die SNR (Signal-to-Noise Ratio) manipuliert und so auf die Umgebungsgeräusche angepasst werden. Durch die Auswahl des betrachteten Tiefenbereiches kann der Darstellungsbereich begrenzt und so die Verarbeitung vereinfacht werden. Die Schallgeschwindigkeit im Wasser muss für die jeweiligen Gewässer konfiguriert werden. Dies kann entweder in Situ gemessen werden oder anhand der Salinität, Wassertemperatur und geschätzter Wassertiefen berechnet werden.



Abbildung 3: Sub-Bottom Profiler (SBP) SES 2000 Kompakt Das Gerät wurde beim Messeinsatz mit einem Trimaran neben dem Messboot hergezogen. Die Positionsbestimmung erfolgte durch Kopplung mit einem Leica GS18 I GPS Rover, welcher über dem SBP positioniert wurde

Ungestörte Proben – Uwitec Corer

Zusätzlich zu den Vermessungsdaten wurden wasserseitig Bodenproben mit einem Unterwassercorer der Firma Uwitec geborgen. Es handelt sich dabei um ein rein mechanisches Rammgerät, welches die Beprobung ermöglicht. Die verwendeten Rohre bestanden aus Plexiglas mit einem Innendurchmesser von 86 mm. Die Länge der Rohre kann variabel gewählt werden. Die Absenkgeschwindigkeit des Corers sollte unter Berücksichtigung der Materialien und der zu gewinnenden Probe ca. 1 m/s betragen. Zur Erhöhung der Sinkstabilität befindet sich am oberen Ende des verwendeten Rohres eine Strömungsklappe. Diese lässt das Wasser während des Sinkens durch das Rohr strömen und verschließt sich sobald das Rammgerät am Grund zum Stehen kommt bzw. wieder gehoben wird. Zur Erhöhung der Eindringtiefe verfügt der Corer über eine Schlagvorrichtung. Dabei wird mit einem Fallgewicht (7 kg) das Rohr in den Boden eingetrieben. Um die Probenqualität zu erhöhen wurde ein sogenannter Ballfänger verwendet. Dieser wurde beim Ziehen des Kerns unter der Öffnung positioniert,

wodurch das Rohr abgedichtet wurde und die Probe nicht durchmischen konnte. Nach dem Gewinnen der Proben wurden diese gekürzt und luftdicht verschlossen. Der Transport erfolgte stehend in einem speziellen Behälter.

Die Beprobungsstellen wurden anhand der ausgewerteten Vermessungsdaten ausgewählt. Dabei wurde der Fokus sowohl auf Bereiche mit besonders großen Sedimentablagerungen oder Positionen von besonderem Interesse (z. B. Zuflussbereiche) gewählt. Ebenfalls aus den Vermessungsdaten wurde, zusammen mit dem Referenzzustand, die zu erwartende Sedimentmächtigkeit bestimmt, um diese als Zieltiefe für die Beprobung anzupeilen.

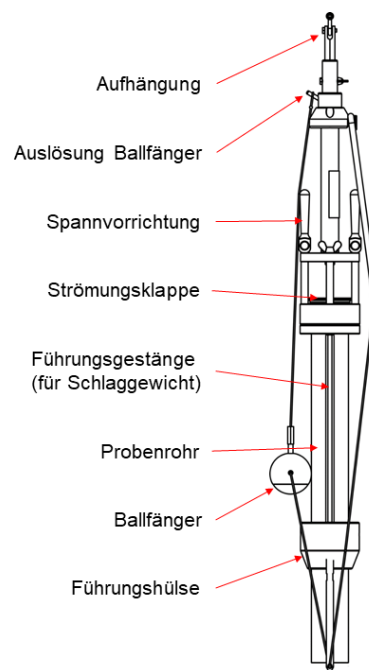


Abbildung 4: Systemskizze Uwitec Corer USC 09000 (ohne Schlaggewicht). (Quelle: UWITEC (2023), modifiziert)

4. Messergebnisse und Auswertung

Die Befliegungen/Befahrungen an der Talsperre Badertitz fanden im Dezember 2020 bis April 2021 statt. An der Talsperre Pirk wurden die Untersuchungen zwischen Oktober 2022 und April 2023 vorgenommen.

Die photogrammetrische Aufnahme der Uferbereiche war stets zeiteffizient realisierbar. Mit den insgesamt 26 eingemessenen GCP an der Talsperre Pirk konnte die Georeferenzierung des Datensatzes verfeinert und nachgewiesen werden. Diese wurden während der Aufnahme gleichmäßig um den Stausee verteilt. Im Südosten war dies aufgrund einer bestehenden Bahnlinie und starkem Bewuchs nicht möglich (Abbildung 6).

Insgesamt wurden 8.079 Fotoaufnahmen zur photogrammetrischen Rekonstruktion mit dem Structure from Motion Verfahren (SfM) erstellt. Softwarebasiert wurde damit eine Punktwolke mit ca. 1,5x10⁹ Punkten errechnet. Im Datensatz wurden die berechneten

Punkte im Bereich der Wasserzone manuell entfernt, da grundsätzlich für Wasserbereiche, insbesondere bei unkontrollierten Bedingungen, keine aussagekräftigen Messwerte durch das SfM-Verfahren generiert werden können. Durch die Anbindung an den SAPOS-Dienst erfolgte die Georeferenzierung der Punktwolke bereits anhand der in den Fotoaufnahmen gespeicherten Lage- und Ausrichtungsinformationen. Abbildung 6 zeigt den Photogrammetrie-Datensatz als texturiertes und gekacheltes Oberflächenmodell sowie die Lage der eingemessenen GCP.

Die Aufnahme der Bathymetrie mittels USV war grundsätzlich möglich. Die Datendichte war entsprechend der gewählten Bahnabstände zielführend. In einigen, durch Sedimentablagerungen geprägten Bereichen konnte aufgrund auftretender diffuser Reflexionen keine eindeutige Bestimmung der Sohle erfolgen. Aufgrund der Funktionsweise der aktuellen Auswertesoftware war eine Filterung der Daten nur schwer zu realisieren.

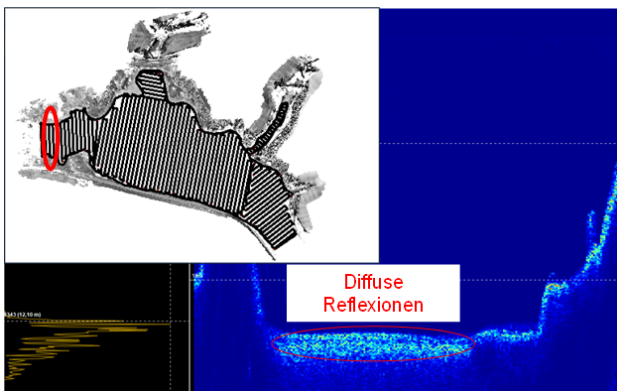


Abbildung 5: Auszug aus dem Auswertungsprogramm des USV – Sonobots (Software Neptus) zur Darstellung der diffusen Reflexionen

Mittels des Sedimentecholotes konnten sowohl die Gewässersohle als auch die darunterliegende Schichtung bestimmt werden. Auch hier folgte die Datendichte den vorgewählten Bahnabständen. Die Auswertung der Daten erfolgte mittels der Auswertesoftware ISE 2.9.5 unter Verwendung von standardisierter Einstellungen. Im ersten Schritt wurde die Gewässersohle ermittelt. Dazu wurde eine vorhandene Funktion mit einheitlicher Sensitivität (50%) angewendet. Die nächste darunterliegende Schicht wurde mittels eines Puffers (zur Sedimentauflage) mit festgelegten Einstellungen (5 cm Abstand und Sensitivity 70%) abgetastet. Bei beiden Arbeitsschritten war es im Anschluss notwendig, die automatisch erstellten Schichten zu überarbeiten. Dazu zählte das Entfernen von Peaks und die Anpassung von unplausiblen lokalen Versprüngen. Im Zuge der Bearbeitung wurde festgestellt, dass oberhalb der SeA-Schicht in vielen Abschnitten eine weitere Schichtung erkennbar war. Diese wurde in einem zusätzlichen Arbeitsschritt (analog zu der Ermittlung der AB Schicht) erfasst. Die Zusammensetzung konnte aufgrund der Datenlage nicht exakt definiert werden. In der weiteren Bearbeitung

wurde diese Schicht als Schwebstoffauflage (SwA) bezeichnet. Diese Auswertung der Daten stellte einen beträchtlichen Mehraufwand dar und ergab einen gewissen Spielraum der Ergebnisinterpretation.

Die stichpunktartige Aufnahme der Sedimentschichtung mittels Sedimentcorer ermöglichte die präziseste Untersuchung. Hierbei gibt es dennoch Fehlereinflüsse infolge der Kompression beim Einschlagen des Zylinders sowie beim Entnehmen der Probe (Last, 2002). Diese müssen soweit möglich minimiert und die Ergebnisse entsprechend kritisch hinterfragt werden.

Bei der geplanten Auswertung sämtlicher Untersuchungen an den genannten Talsperren wurden bei dieser Methode Unterschiede gemacht. Während die Proben der TS Baderitz im Labor (mittels Natrium Polyacrylat) stabilisiert, im Anschluss aufgetrennt und der Schichtaufbau betrachtet wurde, sind bei den Proben der TS Pirk die Feucht- und Trockendichte bestimmt worden. Eine Bestimmung der Schichten fand hier nur anhand der intakten Zylinderproben statt.

In den ufernahen Bereichen wurden die Ergebnisse des UAV und des USV miteinander verglichen. Die Bereiche sind in Abbildung 6 farblich dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass in den meisten Bereichen eine gute Übereinstimmung (grün markiert) festgestellt werden konnte. Nur im südöstlichen Bereich der Talsperre sind großräumig blaue Bereiche erkennbar. Dies ist, wie bereits erwähnt, auf das Fehlen von GCP in diesem Bereich zurückzuführen.

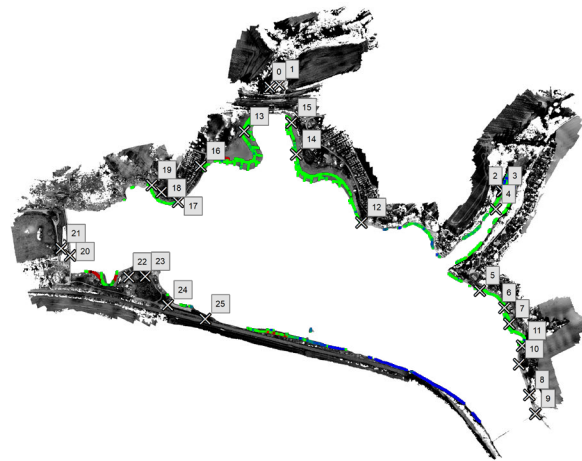


Abbildung 6: Höhendifferenz zwischen Messdaten USV (2023) und SfM (2022) mit Lokalisierung der GCP im Untersuchungsgebiet (rot SfM höher, grün gleich, blau SfM niedriger), nummerierte Kreuze kennzeichnen die Lage der GCP

Die Vergleiche zwischen den Ergebnissen des USV und des SBP zeigen, dass die ermittelte Ausdehnung der Sedimentauflandungen (Abbildung 7) annähernd identisch ist. Beim USV ist Mächtigkeit der Auflandungen minimal größer (intensivere Rotfärbung).

In Abbildung 8 ist die statistische Auswertung der Distanzbestimmung der USV-SeA im Vergleich mit den SBP-SeA-Daten aus dem Jahr 2023 dargestellt. Die mittlere

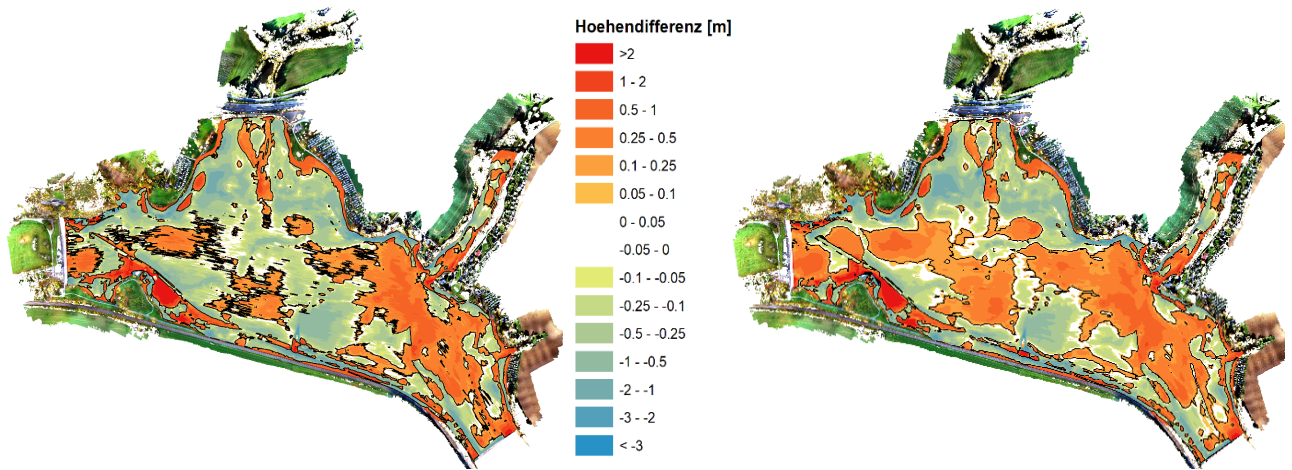


Abbildung 7: Höhendifferenzen zwischen USV-Sea-Daten (2023) links bzw. SBP-Sea-Daten (2023) rechts und Referenzdaten 1940. Ein positiver Wert indiziert eine Höhenzunahme im Gelände, ein negativer Wert eine Abnahme

Abweichung beim Distanzvergleich zwischen USV und SBP-Sea wurde zu 0,05 m errechnet. Die geringe Differenz zeigt grundsätzlich eine gute Vergleichbarkeit zwischen den Datensätzen und speziell die hohe Anzahl der Messpunkte mit annähernd 0 m Distanzunterschied. Der Scheitelwert der grauen Werte bei $x=0$ m zeigt, dass lokal die gleiche Schichtgrenze abgebildet wurde. Die relativ hohe Standardabweichung von 0,289 m indiziert allerdings auch, dass in vielen Bereichen die Echolotsignale unterschiedlich tief in die Gewässersohle eingedrungen sind, wodurch hohe Distanzwerte zwischen USV und SBP-Sea errechnet wurden.

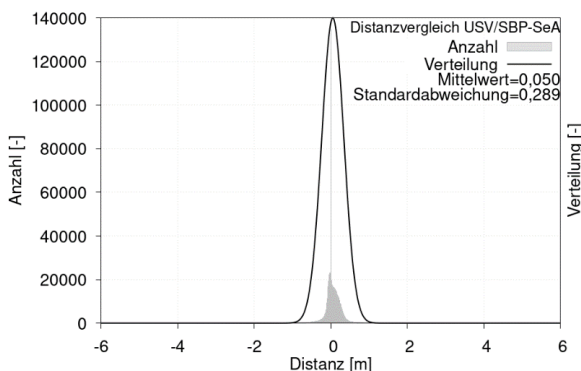


Abbildung 8: Normalverteilungen der Distanzbestimmung zwischen den USV-Sea und den SBP-Sea-Daten im Jahr 2023

Die Ergebnisse der mittels Sedimentcorer beprobten Sedimentmächtigkeiten im Vergleich zu den mittels SBP erfassten Schichtmächtigkeiten an der Talsperre Pirk lassen keine genaue Übereinstimmung erkennen. Die Untersuchungen an der Talsperre Baderitz ergaben hierfür eine deutlich größere Übereinstimmung. Ob diese Unterschiede infolge der Mantelwirkung an der Innenseite des Proberohres oder eine allgemein schlechtere Übereinstimmung vorhanden war, kann im Nachgang nicht mehr bestimmt werden.

5. Konzeptentwicklung

Um die oben bereits beschriebenen Erkenntnisse in eine praktische Anwendung zu überführen, wurden im Zuge des Pilotprojektes die einzelnen Arbeitsschritte bereits

in Prozessabläufen gebündelt. Aus diesen Abläufen wurde dann ein Konzept zur Durchführung von Untersuchungen an Talsperren erstellt. Dabei wurde als Software Microsoft Visio in Kombination mit dem Plug In „VisioPdfTip“ zum Einbinden dynamischer Darstellungen von Anmerkungen verwendet. Als eine Anforderung an die Software war vor allem die einfache Benutzung bei der späteren Anwendung des Dokuments definiert. Dies sollte ohne eine Festlegung auf ein spezielles Programm möglich sein und auch als gedruckte Version extrahiert werden können. Dazu kann bei Visio eine PDF Datei mit Verlinkungen und Anmerkungen erstellt werden. Diese kann auch als offline erzeugt werden. Hierbei werden die Anmerkungen als nummerierte Hinweise auf einem separaten Datenblatt aufgelistet.

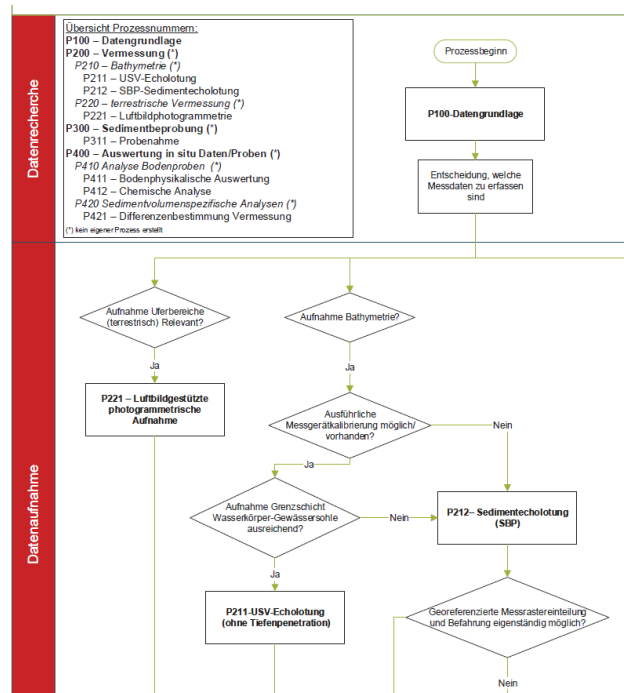


Abbildung 9: Auszug Konzept mit Prozessliste (oben links)

Die möglichen Prozesse wurden aufgelistet und mittels Abfragen und Verlinkungen miteinander verbunden. Dabei wurden die Nummerierungen der Prozesse bewusst

offen gestaltet, um eine spätere Erweiterung zu ermöglichen. In den Prozessen sollten alle notwendigen und optionalen Arbeitsschritte aufgeführt werden. Eine Verlinkung zu externen Dokumenten und Quellen ermöglichen bei Bedarf einen tieferen Einblick in die entsprechenden Grundlagen.

Des Weiteren wurde jeder Prozess mit einer Markierung (dreistufig von hoch bis gering) für das „Interpretationspotential“ versehen. Damit sollte kenntlich gemacht werden, ob im Zuge des Arbeitsschrittes unterschiedliche Ergebnisse entstehen können.

6. Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die unterschiedlichen Messmethoden von Sedimenthorizonten jeweils Vorteile und Grenzen haben. Es lässt sich deshalb nicht pauschal die „beste Messmethode“ zur Ermittlung einer Stauraumverlandung benennen. Allerdings ist für die Aufnahme mittels SBP aufgrund des Mehrwertes an Informationen und der Möglichkeit, die Daten im Nachgang mittels der Auswertesoftware zu begutachten und bei Bedarf die Auswertung anzupassen, ein deutlicher Vorteil gegenüber dem USV auszumachen. Dies setzt allerdings voraus, dass für das Sedimentecholot mittels eines externen GPS Rovers eine präzise Positionierung der Messpunkte ermöglicht wird. Darüber hinaus gibt es noch Forschungsbedarf, wie die Auswertung der Sedimentecholotdaten automatisiert werden kann, um diesen Mehraufwand des Systems zu minimieren.

Wird die Verwendung eines USV angestrebt, ist eine aufwändige Kalibrierung vor der Durchführung der Messfahrten notwendig. Des Weiteren sollten in Testfahrten die Plausibilität der Daten geprüft werden. Eine Ermittlung der Sedimentschichtungen mittels Sedimentkernen ist aufwändig, ist aber unter Umständen eine Möglich-

keit die Schichtungen relativ genau zu erfassen. Außerdem entsteht ein deutlicher Mehrwert, weil auch Informationen über die Zusammensetzung der einzelnen Bodenschichten ermöglicht werden. Eine sorgfältige Verwertung der Probenzylinder ist dabei unerlässlich. Es ist zielführend, erst durch eines der oben beschriebenen Verfahren die Ausprägung der Sedimentablagerungen und deren Mächtigkeit zu bestimmen. Die Erstellung eines DGM's für den Uferbereich mittels UAV ist eine zielführende Methode, um zusätzlich noch Bereiche der näheren Umgebung von Talsperren und damit auch Quellen des Feststoffeintrages mit abzubilden. Allerdings sind hier ebenfalls komplexe Auswertemethoden notwendig, um plausible Ergebnisse zu erhalten.

Die oben genannten Punkte verdeutlichen nochmals, weshalb ein Untersuchungskonzept für die Bestimmung des Feststoffeintrages, der Sedimentablagerungen sowie des Feststoffmanagements an Talsperren sinnvoll ist. Mit dem vorgestellten Konzept wurde ein Grundstein geschaffen, welcher es der LTV ermöglicht, die Sedimenteinträge auf das Stauraumvolumen strukturiert zu untersuchen. Allerdings sind hierbei noch nicht alle Punkte vollumfänglich abgeschlossen. So ist es noch möglich, weitere Verfahren (Erfassung Wassertiefe mittels Airborne Laserscanning, Bestimmung Sedimentigenschaften mittels Freifall-Penetrometer oder akustischen Systemen) zu testen und bei Bedarf zu integrieren.

Kontakt Daten

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft Nürnberg
Kesslerplatz 12
90489 Nürnberg
Sebastian Dürr
Sebastian.duerr@th-nuernberg.de

Literaturverzeichnis

- [1] Böder, V. et al. (2010) Scannen unter und über Wasser durch Sensorintegration von GNSS/IMU, Echolot und terrestrischem Laserscanner., Schriftenreihe des DVW, Band 63, Wißner-Verlag, Augsburg, pp. 193-212.
- [2] Carstensen, D. et al. (2022) Pilotprojekt zur Erfassung von Sedimentmengen und Schadstoffgehalten von abgelagerten Sedimenten am Beispiel der Talsperre Baderitz. Forschungsbericht 2021-08. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft.
- [3] Carstensen, D. et al. (2023) Pilotprojekt zur Erfassung von Sedimentmengen und Schadstoffgehalten von abgelagerten Sedimenten am Beispiel der Talsperre Pirk.. Forschungsbericht 2023-11. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft.
- [4] INNOMAR Technologie GMBH, (2009) SES-2000 User's Guide, (V2.8).
- [5] Kutschera, G. et al, (2018) Monitoring kleiner und mittlerer Fließgewässer mittels bemannter und unbemannter Wasserfahrzeuge – Ergebnisse des Projektes RiverView [online]. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung / BfG – Jahrgang: 62.2018,6 - ISSN 1439-1783. Verfügbar unter: doi:10.5675/HyWa_2018.6_5
- [6] Langhammer, J., Bernsteinová, J. und Mirijovsky, J. (2017) Building a High-Precision 2D Hydrodynamic Flood Model Using UAV Photogrammetry and Sensor Network Monitoring [online]. Water, 9(11), 861. Water. Verfügbar unter: doi:10.3390/w9110861
- [7] Last, W., John P. (Hg.) (2002): Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers (Developments in Paleoenvironmental Research).

- [8] Mancini, F. und Salvini R., (2020) Applications of Photogrammetry for Environmental Research [online]. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISBN 9783039281817. Verfügbar unter: <https://directory.doab-ooks.org/handle/20.500.12854/41072>
- [9] Qin, R., Tian, J. und Reinartz P. (2016) 3D change detection – Approaches and applications [online]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 122, 41-56. ISSN 09242716. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.is-prsjprs.2016.09.013
- [10] SAPOS, (2015) Produktdefinition SAPOS [online]. Verfügbar unter: https://www.sapos.de/files/SAPOS-Produkt-definition_2017.pdf
- [11] Wu, Ziyin, (2021) High-resolution seafloor survey and applications. Beijing, Singapore, Singapore: Science Press; Springer.
- [12] Zhang, W., et al. (2016). An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation [online]. Remote Sensing, 8(6), 501. Remote Sensing. Verfügbar unter: doi:10.3390/rs8060501
- [13] UWITEC GmbH (2023) Technisches Datenblatt USC Corer [online] Abgerufen Jan. 2024 Verfügbar unter: https://www.uwitec.at/wp-content/uploads/2021/08/Prospekt-USCxxx00_DE_WEB-1.pdf