

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 115 (2023)
Heft: 2

Artikel: SmartWood_3D : drohnenbasierte Structure-from-Motion-Photogrammetrie für die Vermessung von Schwemmholzansammlungen
Autor: Spreitzer, Gabriel / Schalko, Isabella / Boes, Robert
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1043747>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 21.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

SmartWood_3D: Drohnenbasierte Structure-from-Motion-Photogrammetrie für die Vermessung von Schwemmholtansammlungen

Gabriel Spreitzer, Isabella Schalko, Robert Boes, Volker Weitbrecht

Zusammenfassung

Die Ansammlung von Schwemmholt an kritischen Gewässerquerschnitten und dessen Einfluss auf die Fließhydraulik und Gerinnmorphologie stellt häufig eine Gefahr für den Menschen in dessen Lebens- und Wirtschaftsraum dar. Obwohl sich in der Vergangenheit zahlreiche Studien mit Schwemmholtverklausungen und deren Auswirkungen auf das Fließ- und Geschiebeverhalten befasst haben, fehlen bis heute quantitative Daten (z.B. Volumen, Porosität) über Verklausungen im Naturmaßstab. Die Herausforderungen zur Datengewinnung im Feld liegen zum einen in der Entwicklung zuverlässiger Methoden, und zum anderen in der Erreichbarkeit der Versuchsorte mit schwerem Gerät, das zur Analyse von Verklausungen erforderlich ist. Im Zuge einer von Seiten der Europäischen Kommission geförderten Studie konnte eine vollständige Bewertung von Schwemmholtansammlungen zum ersten Mal im Feld erfolgen. Diese wurden mittels drohnenbasierter Structure-from-Motion-Photogrammetrie (hochauflösende 3D-Modelle) vermessen und im Anschluss «manuell» analysiert (gehäckelt, gewogen, Dichtebestimmungen), um das Festmetervolumen zu bestimmen. Die Erfassung des Schütt- und Festmetervolumens ist für die Bestimmung der Verklausungs- porosität unerlässlich. Dies ermöglicht, in einem weiteren Schritt das Verständnis über das Fließ- und Geschiebeverhalten infolge einer Schwemmholtansammlung zu verbessern sowie Risiken und Schäden durch Verklausungen zu reduzieren.

Résumé

L'accumulation de bois flottant aux sections critiques de cours d'eau et son influence sur l'hydraulique d'écoulement et la morphologie du lit constituent souvent un danger pour l'homme dans son espace de vie et d'activité économique. Bien que de nombreuses études aient été consacrées par le passé aux embâcles de bois flottant et à leurs effets sur le comportement d'écoulement et de la charge de fond, il manque à ce jour des données quantitatives (par ex. volume, porosité) sur les embâcles à l'échelle naturelle. Les défis à relever pour l'acquisition des données sur le terrain sont, d'une part, le développement de méthodes fiables et, d'autre part, l'accès-sibilité des sites d'essais avec les équipements lourds nécessaires à l'analyse des embâcles. Dans le cadre d'une étude financée par la Commission européenne, une évaluation complète des accumulations de bois flottant a pu être réalisée pour la première fois sur le terrain. Celles-ci ont été mesurées à l'aide d'une photogrammétrie Structure-from-Motion basée sur des drones (modèles 3D à haute résolution), puis analysées «manuellement» (hachage, pesée, détermination de la densité) afin de déterminer le volume en mètres cubes. La saisie du volume de mètre cube en vrac et solide est essentielle pour déterminer la porosité de l'embâcle. Cela permet, dans une étape ultérieure, d'améliorer la compréhension du comportement d'écoulement et de la charge de fond à la suite d'une accumulation de bois flottant et de réduire les risques et les dommages causés par les embâcles.

1. Einleitung

1.1 Vermessung von Schwemmholtansammlungen

Schwemmholt übernimmt zahlreiche wichtige Funktionen zur natürlichen Gewässerregulierung. Während Hochwasserereignissen kommt es jedoch immer wieder zu gefährlichen Situationen durch Schwemmholtverklausungen (BAFU, 2019). Die Gefahr resultiert dabei aus dem unkontrollierten Auftreten von Verklausungen, z.B. bei der Blockade der Räbloch-Schlucht (Schwab et al., 2021) sowie den Auswirkungen auf die Strömung, wie Aufstau (Gschnitzer et al., 2017, Schalko et al., 2019a) und die Gerinnmorphologie, wie Brückenkolk (Melville und Dongol, 1992, Schalko et al., 2019b). Schwemmholtverklausungen können kom-

plexe Erscheinungsformen annehmen und sind daher nur schwer zu charakterisieren. Bis heute hat sich in der Schwemmholtforschung für die Abschätzung von Verklausungs- und Ablagerungsvolumen zu meist die Ermittlung des Holz-Luft-Volumens, wie von Thevenet et al. (1998) im Detail beschrieben, durchgesetzt. Es handelt sich dabei um eine Schüttraummeter-Angabe, welche sich aus der Multiplikation der Länge, Breite und Höhe einer Verklausung ergibt und dabei das eingeschlossene Luftvolumen vollständig mitberücksichtigt. Obwohl Schwemmholt nicht geschüttet wird, stellt das Schüttvolumen (Schüttraummeter) einen bekannten und einheitlichen Begriff für die Volumenbestimmung von Holz (vorwiegend Energieholz) inkl. aller offenen und geschlossenen

Porenräume dar. Das Holz-Luft-Volumen lässt sich demnach unkompliziert mit einem Massband im Feld ermitteln und liefert eine erste charakteristische Kenngrösse zur Bewertung der Schwemmholtansammlung. Um weitere Charakteristiken einer Schwemmholtansammlung zu ermitteln, z. B. deren Porosität, bedarf es in erster Linie der Bestimmung des Festmetervolumens. Im Vergleich zum Schüttvolumen berücksichtigt das Festmetervolumen lediglich das tatsächliche Holzvolumen ohne den durch die Lagerung der individuellen Holzelemente (der sog. strukturellen Anordnung) eingeschlossenen volumenmässigen Luftanteil (Porenvolumen). Obwohl die Porosität für Schwemmholtstudien eine übergeordnete Rolle spielt (z.B. zur Bestimmung des Aufstaus), basiert der

Standard zur Ermittlung der Porosität einer Schwemmholtzansammlung im Feld bis dato auf der visuellen Abschätzung der Porosität (*Dixon 2016, Livers und Wohl 2021*) ohne die Ermittlung eines konkreten Festmetervolumens. Um die Vergleichbarkeit der Porositätsschätzungen zu gewährleisten, empfehlen *Livers und Wohl (2021)* die Anwendung der visuellen Methode durch die jeweils selbe Person. Zur korrekten Abschätzung der Porosität bedarf es jedoch zwingend Referenzwerten von Schwemmholtzansammlungen im Naturmassstab, welche bis dato aufgrund von Limitierungen in der Messtechnik und dem grossen Aufwand von Feldstudien erst in einer einzigen Studie ermittelt werden konnten (*Spreitzer et al., 2022b*). Das Fehlen von Referenzwerten des Festmetervolumens führt zu einer willkürlichen Abschätzung der Verklausungsporosität und verhindert den übergreifenden Vergleich von Ergebnissen verschiedener Gewässerabschnitte (*Livers und Wohl 2021*). Hinzu kommt, dass die Begrifflichkeit zur Beschreibung des Porositätsproblems zwischen verschiedenen Studien stark variiert. Begriffe wie z. B. Dichte, Durchlässigkeit, Auflockerungsfaktor oder Verklausungsgrad (*Lange und Bezzola, 2006, Andreoli et al., 2007, Dixon, 2016, Follett et al., 2020*) kreisen allesamt um das gleiche Problem. Gemäss *Pagliara und Carnacina (2010)* ist die Porosität einer Schwemmholtzansammlung als das Verhältnis von Porenvolumen zu Schüttvolumen definiert.

In *Spreitzer et al. (2019)* wird erstmals die Structure-from-Motion (SfM) Photogrammetrie zur digitalen und hochauflösenden Vermessung von Schwemmholtzansammlungen vorgestellt. Wenngleich die SfM-Methode bereits in den 1970er Jahren entwickelt wurde (*Ullman, 1979*), blieb diese für die Schwemmholtzforschung auch aufgrund fehlender Rechenleistung und wenig ausgereifter Software lange Zeit unberücksichtigt. Die photogrammetrische Methode beruht auf der Erstellung von 3D-Modellen anhand von 2D-Bildern, aufgenommen von unterschiedlichen Positionen mit stark überlappenden Bildausschnitten (*Westoby et al., 2012, Detert et al., 2017*). Eine spezielle Software erkennt Merkmale in den überlappenden Bildausschnitten und überträgt diese in Form von einzelnen Punkten in einen virtuellen Raum. Aus mehreren dieser Merkmale entsteht letztlich eine räumliche Struktur aus Punkten – eine sog. Punktwolke. In weiteren Schritten können die einzelnen Punkte einer Punktwolke mit deren engsten Nachbar-Punkten verbunden werden (Drahtgittermodelle), und schliessen damit

je eine Fläche ein, aus welchen sich im Zusammenhang vollständig geschlossene 3D-Modelle erstellen lassen. Durch die steigige Weiterentwicklung der SfM-Software gelingt es bereits, nahezu identische 3D-Modelle (digitale Zwillinge) von statischen Objekten und Landschaften zu erstellen. Dies ist insbesondere für die detaillierte Bewertung von Schwemmholtzansammlungen von grossem Interesse, da sowohl Verklausungen im Feld (*Spreitzer et al., 2019*), als auch in Laborstudien (*Spreitzer et al., 2020a, 2021b*) mit der SfM-Methode zuverlässig und hochauflösend rekonstruiert werden können. Die Erstellung der digitalen Zwillinge erlaubt die Bestimmung eines sogenannten 2.5D Volumens (m^3), welches auf Basis einer definierten Grundfläche (Länge, Breite) und der vertikalen Projektion des Oberflächenmodells (Höhe) einer Verklausung automatisch berechnet wird (*Remondino, 2003, Sanhueza et al., 2019*). Das resultierende 2.5D Volumen nähert sich dabei dem Holz-Luft-Volumen an und kann daher als das Schüttvolumen in m^3 berücksichtigt werden (*Spreitzer et al., 2020a*). Im Gegensatz zum 2.5D Volumen werden bei der Abschätzung eines höherauflösenden 3D Volumens von aussen einsehbare Porenräume nicht als Volumen berücksichtigt. Dadurch ermöglicht die SfM-Methode eine Abschätzung des räumlichen Gefüges bzw. der strukturellen Anordnung einer Verklausung aus dem Verhältnis von 3D zu 2.5D Volumen, sowie der minimalen Verklausungsporosität aus dem Verhältnis von Porenvolumen (2.5D – 3D Volumen) zu Schüttvolumen, ausschliesslich basierend auf den digital ermittelten Volumina (*Spreitzer et al., 2020b, Spreitzer et al., 2022b*). Die bisherigen Studien demonstrieren Notwendigkeit und Vorteile von digitalen Zwillingssmodellen für die Schwemmholtzforschung und stellen neben SmartWood (*Spreitzer et al., 2022a*) erst den Beginn der Digitalisierung und quantitativen Bewertung von Schwemmholtzprozessen dar. Die erzeugten 3D-Modelle und die automatisierte Datengenerierung liefern reproduzierbare Parameter, welche zudem für den Einsatz in numerischen Modellen von grosser Bedeutung sind (*Spreitzer et al., 2019*).

1.2 Ziele von SmartWood_3D

Um eine zuverlässige Datenbank über Schwemmholtzverklausungen und eine damit einhergehende bessere Vergleichbarkeit zu erzielen, sollten (i) innovative Methoden angewandt, (ii) Referenzwerte im Naturmassstab ermittelt, und (iii) einheitliche Definitionen zur Charakterisierung

von Schwemmholtzansammlungen (z. B. Porosität) eingehalten werden. An der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) wird daher intensiv an der Vermessung von Schwemmholtzverklausungen im Feld und deren Charakterisierung hinsichtlich Volumen, Porosität und Struktur gearbeitet. Die Charakterisierung von Schwemmholtzansammlungen trägt zur besseren Beurteilung von kritischen Gewässerquerschnitten bei und ermöglicht zudem das präzise Abschätzen von hydraulischen und morphologischen Auswirkungen, um die Sicherheit für Menschen in deren Lebens- und Wirtschaftsräumen, inklusive flussbaulicher Infrastrukturanlagen zum Erhalt der Mobilität und Energieversorgung, zu gewährleisten. Diesbezüglich werden unter anderem auch spezielle Sicherungssysteme (z. B. Schwemmholtzrechen oder -netze) benötigt, um Schwemmholtz mit grossem Schadenspotenzial frühzeitig und sicher an geeigneten Gewässerabschnitten zurückzuhalten (*Schmocker und Weitbrecht, 2013, Hochstrasser et al., 2018, Stucki, 2021*).

2. Methodik und Versuchstandorte

Die Hochwassersituation im Sommer 2021 hat an zahlreichen Schweizer Flüssen zu einem erhöhten Schwemmholtzaufkommen geführt. Ein Teil des Treibguts wurde dabei an speziell errichteten Rückhaltebauwerken abgelagert oder in Staauseen und natürlichen Seen zurückgehalten. Die zurückgehaltenen Schwemmholtzmengen stellen für das SmartWood_3D-Projekt eine bedeutende Informationsquelle dar und boten ideale Gelegenheiten, die SfM-Methode in der Praxis anzuwenden und quantitative Referenzwerte zu erheben. Ein grosser Vorteil der SfM-Methode liegt in der zerstörungsfreien Analyse von drainierten Schwemmholtzablagerungen, wodurch sich der Ursprungszustand dokumentieren und vermessen lässt. Um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen, erfolgte die Fotoaufnahme mittels Drohne, wobei die Befliegung sowohl über als auch rund um die Schwemmholtzansammlungen, mit jeweils schräger (oblique) und vertikaler (nadir) Ausrichtung der Kamera erfolgte (*Bild 1b*). Für die Befliegung wurde eine DJI Phantom 4 Pro-Drohne mit 20 MP-Kamera eingesetzt. Zur Erzeugung der 3D-Modelle aus den Drohnenaufnahmen stellte das Schweizer Softwareunternehmen Pix4D eine Lizenz der Photogrammetrie-Software Pix4Dmapper zur Verfügung. Bei der Drohnenvermessung mittels SfM-Photogrammetrie gilt es, insbe-

sondere auf eine ausreichende Überlappung der Bilder (> 80 Prozent) zu achten. Die Anzahl der Bilder richtet sich daher nach der Grösse der zu vermessenden Schwemmholtzansammlung bzw. nach dem aufzulösenden Schwemmholtz sowie dem Sichtfeld der Kamera (Distanz Bildsensor zu Objekt). Neben der Weiterentwicklung der SfM-Methode zur digitalen Vermessung von Schwemmholtzansammlungen steht unter anderem die Ermittlung des tatsächlichen Festmetervolumens von Schwemmholtzansammlungen im Fokus des Forschungsprojekts. Das Festmetervolumen (fm) ergibt sich aus dem Verhältnis des Gesamtgewichts der jeweiligen Schwemmholtzansammlung zur dazugehörigen Feuchtdichte des Schwemmholzes. Neben dem Schüttvolumen (2.5D Volumen, $V_{2.5D}$) stellt das Festmetervolumen einen wichtigen Parameter zur Ermittlung der Porosität dar (n_{max} , Gl. 1). Alternativ ergibt sich unter Berücksichtigung des 3D Volumens (V_{3D}) die minimale Porosität (n_{min} , Gl. 2), welche z. B. für die Abschätzung des

ungünstigsten Einflusses einer Verklausung auf die Hochwassersicherheit von Bedeutung ist. Da die Ermittlung des Festmetervolumens im Feld stets mit grossen Herausforderungen und manuellem Aufwand verbunden ist, wird an der VAW zusätzlich an der Entwicklung einer Methode zur automatisierten Abschätzung der Porosität gearbeitet (Spreitzer et al., 2022b), um Porositätsbestimmungen auch ohne ein bekanntes Festmetervolumen zu ermöglichen. Die automatisierte Methode berücksichtigt die mittels SfM-Photogrammetrie ermittelte strukturelle Anordnung einer Verklausung (PA, Gl. 3) sowie einen auf Erfahrungswerten basierten Korrekturfaktor (cf) zur Bestimmung der empirisch ermittelten Porosität (n_{emp} , Gl. 4). Die Auswahl des Korrekturfaktors richtet sich nach dem Verklausungstyp gemäss Manners und Doyle (2008) und beträgt 0,5 für komplexe Verklausungen, 0,9 für grobe Fachwerk-Verklausungen sowie 1,0 für individuelle Schlüsselelemente und vollständige Blockaden (Spreitzer et al., 2022b). Als Zusatz zur ermittelten Porosität wird der speziell im deutschsprachigen Raum weitverbreitete Auflockerungsfaktor (a, Gl. 5) angeführt, welcher als Verhältnis des Lockervolumens zum Festvolumen einer Verklausung definiert wird.

$$n_{max} = \frac{V_{2.5D} - fm}{V_{2.5D}} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

$$n_{min} = \frac{V_{3D} - fm}{V_{3D}} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

$$PA = \frac{V_{2.5D} - (V_{2.5D} - V_{3D})}{V_{2.5D}} \cdot 100 = \frac{V_{3D}}{V_{2.5D}} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

$$n_{emp} = 100 - cf \cdot PA [\%] \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{1 - n_{max}} [-] \quad (5)$$

An der Grossen Melchaa und Sihl wurde Schwemmholt an den dafür vorgesehenen Rückhaltebauwerken (Schmocker und Weitbrecht 2013, Flury et al., 2015) abgelagert und mittels der drohnenbasierten SfM-Methode aus nächster Nähe vermessen (Bild 1 und 2). Insgesamt wurden 142 Bilder an der Grossen Melchaa und 606 Bilder an der Sihl für die Erzeugung der 3D-Modelle herangezogen. Die unterschiedliche

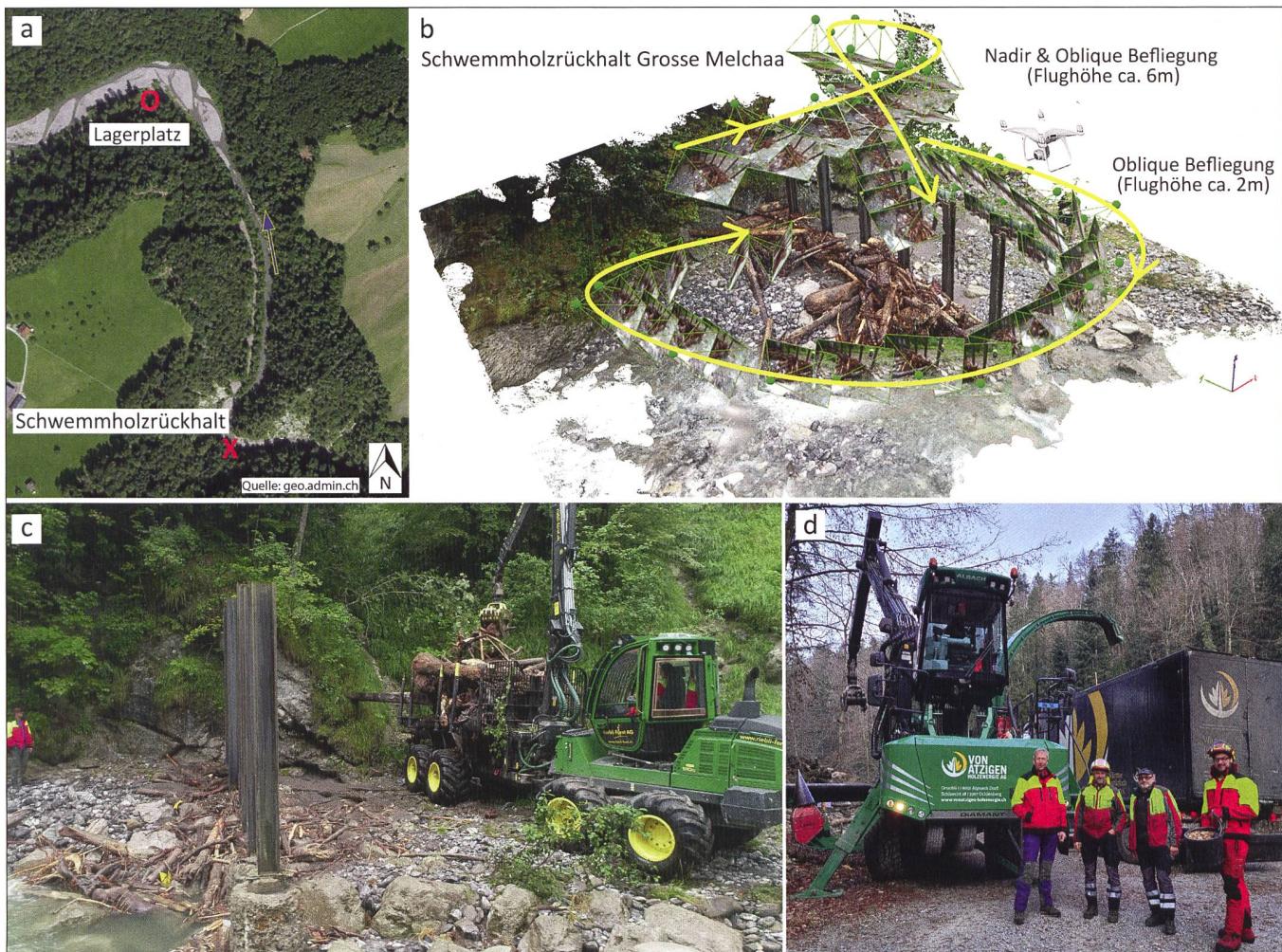


Bild 1: Übersicht des Schwemmholtrückhalts an der Grossen Melchaa im Kanton Obwalden (a) und der Drohnenbefliegung für Structure-from-Motion-Photogrammetrie der Schwemmholtzverklausung (b). Die grünen Rechtecke entlang der gelben Flugtrajektorie in (b) zeigen die Kameraperspektiven und -positionen während der Datenaufnahme. Zur Räumung (c) und Analyse (d) der Schwemmholtzansammlung war der Einsatz von schwerem Gerät erforderlich.

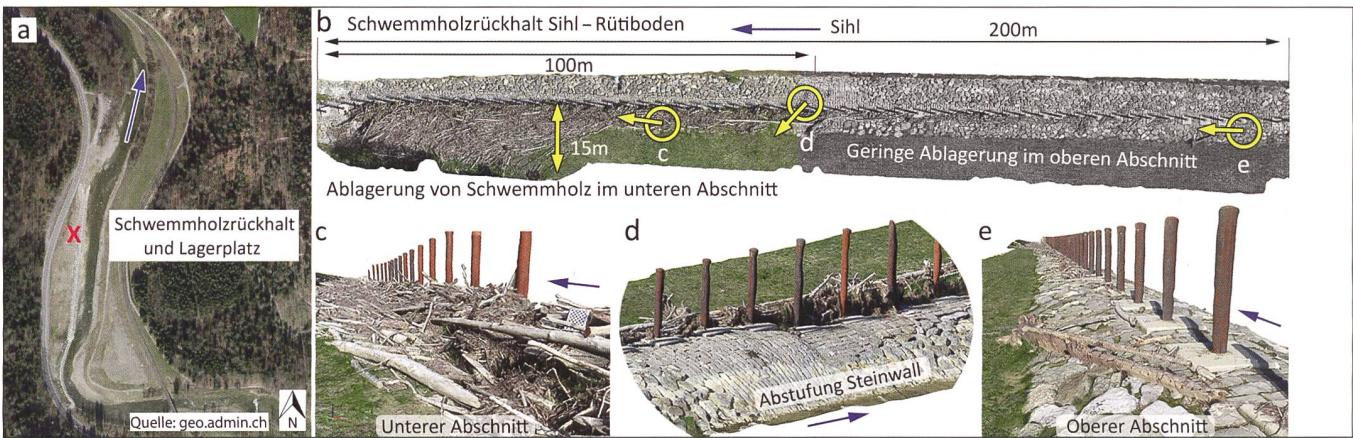


Bild 2: Übersicht des Schwemmholtrechens an der Sihl (a) und das mittels SfM-Photogrammetrie erzeugte 3D-Modell (b) bis (e). Die gelben Markierungen in (b) zeigen die Position und Blickrichtung der Bildausschnitte in (c) bis (e).

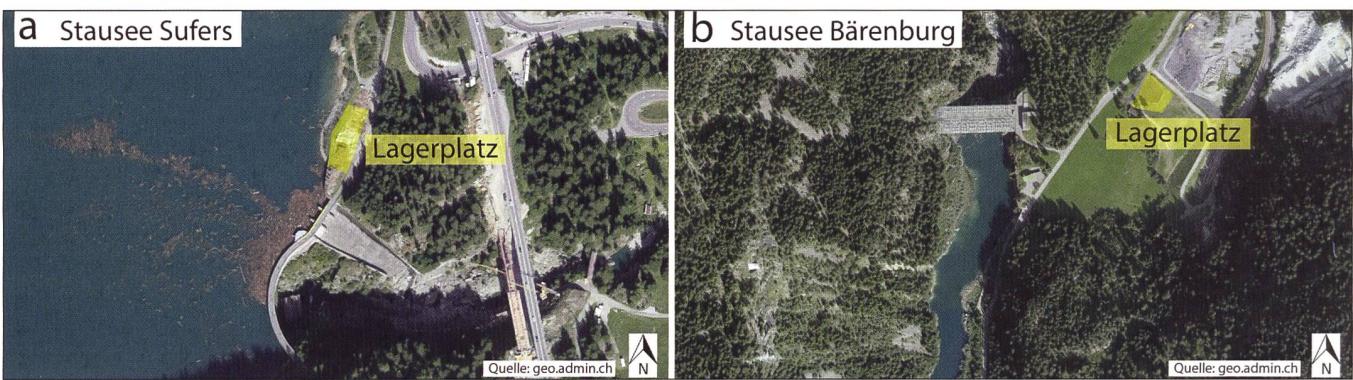


Bild 3: Satellitenbilder der Stauseen Sufers (a) und Bärenburg (b) mit schematischer Lage des jeweiligen Lagerplatzes für das geborgene Schwemmholt, an welchem auch die Vermessung und Analyse stattfanden. Es gilt zu beachten, dass das Satellitenbild vom Stausee Sufers lediglich der Übersicht dient und zufällig Schwemmholt im Stausee erkennen lässt. Das ersichtliche Schwemmholt im Satellitenbild (a) steht daher nicht im Zusammenhang mit dieser Studie.

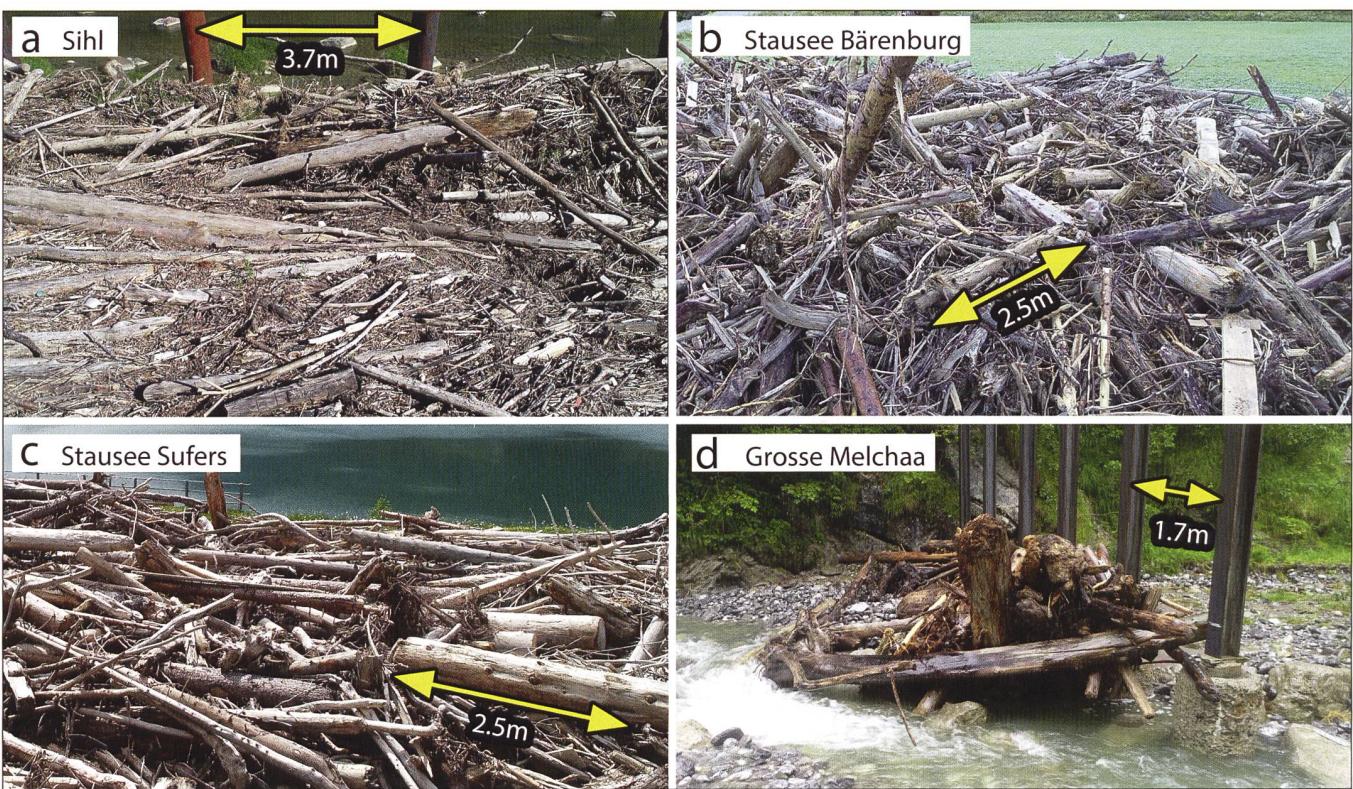


Bild 4: Überblick über die Zusammensetzung der Schwemmholtansammlungen an der Sihl (sehr feines organisches Material, a), Stausee Bärenburg (sehr viel kleines Schwemmgut, b), Stausee Sufers (vorwiegend grobes Schwemmgut und Stämme, c), und Grossen Melchaa (Ablagerung grosser Stämme im Vergleich zur Gesamtabmessung der Verklausung, d).

Anzahl an Bildern resultiert aus der Grösse und Zusammensetzung der Schwemmholtzansammlungen. Die relativ kleine Verklausung an der Grossen Melchaa (*Bild 1*) konnte demnach mit einer wesentlich geringeren Anzahl an Bildern erfasst werden als die Schwemmholtzansammlung an der Sihl (*Bild 2*). Im Anschluss an die Drohnenvermessung wurden Proben des organischen Materials für die Analyse der Feuchtigkeit im Labor gesichert, ehe das gesamte Schwemmholtz mittels schweren Geräts geräumt und zur Massenermittlung gewogen bzw. zu Hackgut verarbeitet wurde (*Bild 1c* und *d*).

Bei den Stauseen Sufers und Bärenburg am Hinterrhein wurde das Treibgut aus dem Gewässer entfernt und an gut zugänglichen Orten in der Nähe zur jeweiligen Staumauer für die Weiterverarbeitung zu Hackgut zwischengelagert (*Bild 3*). Es gilt zu erwähnen, dass das geborgene Treibgut aus den Stauseen unterschiedlich lange Lagerzeiten aufwies (Sufers bis zu fünf Monate, Bärenburg ca. zwei Wochen) und daher nicht im völlig durchfeuchten Zustand vorlag, ehe es vermessen und analysiert wurde. Die drohnenbasierte Vermessung der Schwemmholtzansammlungen erfolgte am Lagerplatz unmittelbar vor der manuellen Analyse und Verarbeitung zu Hackgut. Für die Erzeugung des 3D-Modells am Stausee Sufers wurden 281 Bilder verwendet, wohingegen am Stausee Bärenburg durch einen höheren Anteil an organischem Feinmaterial (Äste und Zweige) eine wesentlich grössere Anzahl an Bildern (544) für eine zufriedenstellende Auflösung des 3D-Modells herangezogen werden musste. Zum Zeitpunkt der Drohnenvermessung wurden auch hier Holzproben der jeweiligen Schwemmholtzansammlung entnommen, um diese im Labor einer Dichtebestimmung zu unterziehen. Das gesamte erzeugte Hackgut wurde im Anschluss an die Studie als Energieholz verwertet.

Ein direkter Vergleich des Schwemmholtzes von allen vier Standorten lässt die unterschiedliche Zusammensetzung und Dimensionen erkennen (*Bild 4*). Demzufolge weist die Ablagerung an der Sihl einen grossen Anteil an organischem Feinmaterial auf (Gräser, Blätter, Zweige, Äste) und benötigt dadurch eine grössere Anzahl an Bildern zur Erstellung eines hochauflösenden 3D-Modells, wohingegen die Dimension einzelner Schwemmholtzelemente im Verhältnis zur Gesamtgrösse der Ablagerung von Bärenburg über Sufers bis hin zur Grossen Melchaa stetig zunimmt und dadurch eine geringere Anzahl an Bildern verlangt.

3. Resultate und Diskussion

Die Auflistung der erzeugten 3D-Modelle und Ergebnisse erfolgt mit zunehmender Schwemmholtzgrösse im Verhältnis zur Gesamtabmessung der Schwemmholtzansammlungen, beginnend mit der Schwemmholtzansammlung an der Sihl, gefolgt von Bärenburg und Sufers. Den Abschluss bildet die kleinste Verklausung an der Grossen Melchaa, welche im Verhältnis zur Gesamtgrösse die grössten Schwemmholtzelemente aufweist.

3.1 2.5D- und 3D-Modelle der Schwemmholtzansammlungen

Im Zuge der Drohnenvermessung wurde bei der Schwemmholtzansammlung an der Sihl ein hoher Anteil an organischem Feinmaterial festgestellt, welcher die Eindringtiefe

der SfM-Methode stark reduziert (Spreitzer et al., 2020a) und eine höhere Anzahl an Bildern zur zufriedenstellenden Auflösung kleinerer Holzelemente (z.B. Äste) erfordert. Trotz der grossen Dimension des Rückhaltebauwerks (*Bild 2a*) in Kombination mit dem relativ kleinskaligen Treibgut (*Bild 4a*) lieferte die drohnenbasierte SfM-Methode hochauflösende 3D-Modelle (*Bild 5c*). Die generierte Punktwolke des Sihl-Modells besteht aus 62,5·106 Punkten mit einer durchschnittlichen Dichte von 139·103 Punkten pro m³. Basierend auf dem erzeugten Oberflächenmodell (*Bild 5a*) konnten das 2.5D Volumen (Schüttvolumen, *Tabelle 1* und *Bild 5b*) sowie das 3D Volumen (*Bild 5c*) ermittelt werden. Die Auflösung der definierten Grundfläche (grüne Fläche in *Bild 5b*) zur Messung des 2.5D Volumens (rotes Volumen in *Bild 5b*) beträgt 3,3 mm.

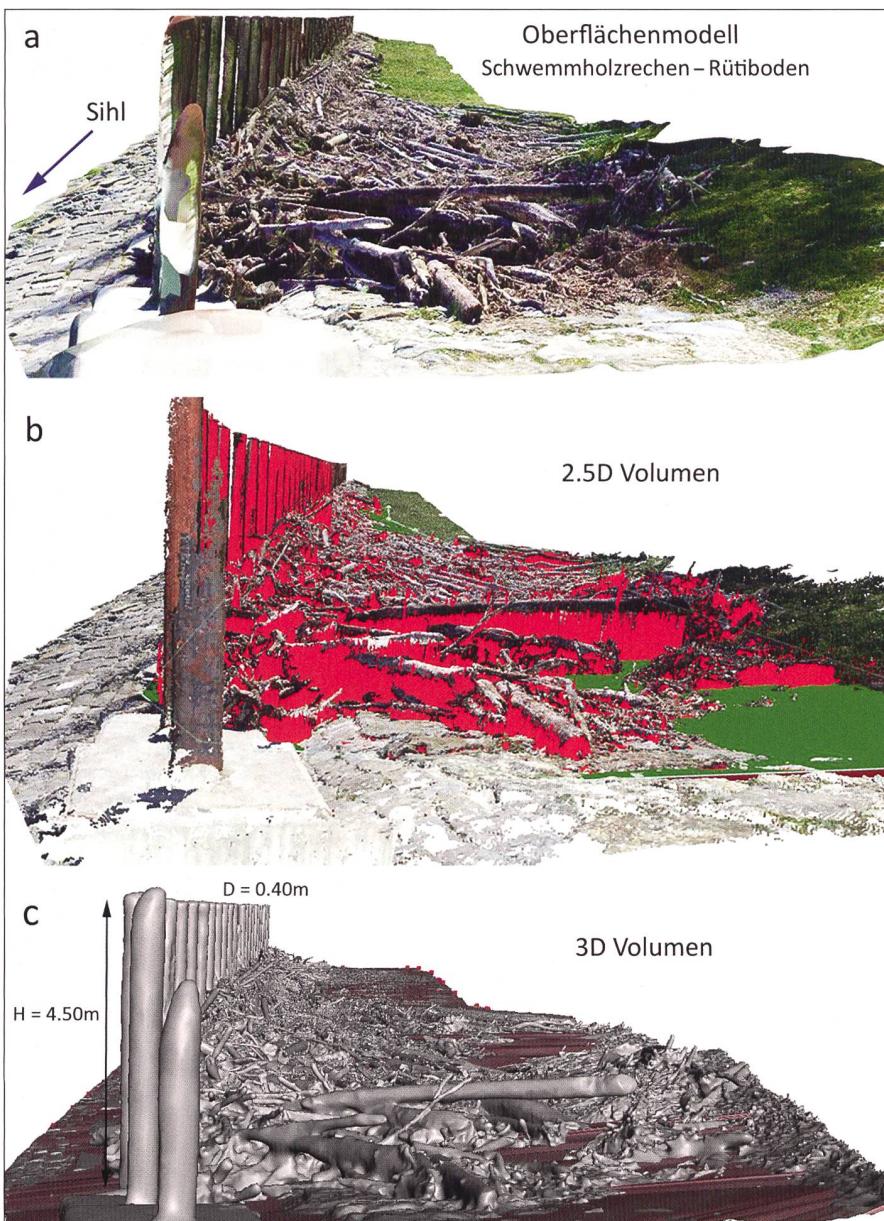


Bild 5: Diverse Modelle und Volumina sowie Vermessung der Schwemmholtzansammlung an der Sihl – Rütiboden nach einem Hochwasser (HQ₃₀) im Sommer 2021.

Die erzeugte Punktwolke zur Rekonstruktion der Schwemmholtzansammlung Bärenburg (*Bild 6*) besteht aus 53,4·10⁶ individuellen Punkten und weist eine durchschnittliche Punktdichte von 174·10³ Punkten pro m³ auf. Durch die höhere Punktdichte im Vergleich zum digitalen Zwillingssmodell an der Sihl wurde am Modell Bärenburg eine bessere Auflösung (2,5 mm)

zur Vermessung des 2.5D Volumens erreicht. Bei gleichen Softwareeinstellungen wurden für die Rekonstruktion der Schwemmholtzansammlung Sufers (*Bild 7*) lediglich 17,7·10⁶ Punkte generiert. Dies entspricht in etwa einem Drittel der Punkte vom Modell Bärenburg, für welches aufgrund des grossen Anteils an Feinmaterial rund die doppelte Anzahl an Bildern ver-

wendet wurde. Bei annähernd gleichen Abmessungen der Schwemmholtzansammlungen und deutlich gröberem Schwemm-gut resultiert das Modell Sufers in einer deutlich geringeren Punktdichte (71,4·10³ Punkte pro m³) und Auflösung (5,0 mm) der benötigten Grundfläche zur Vermes-sung des 2.5D Volumens als das Modell Bärenburg.

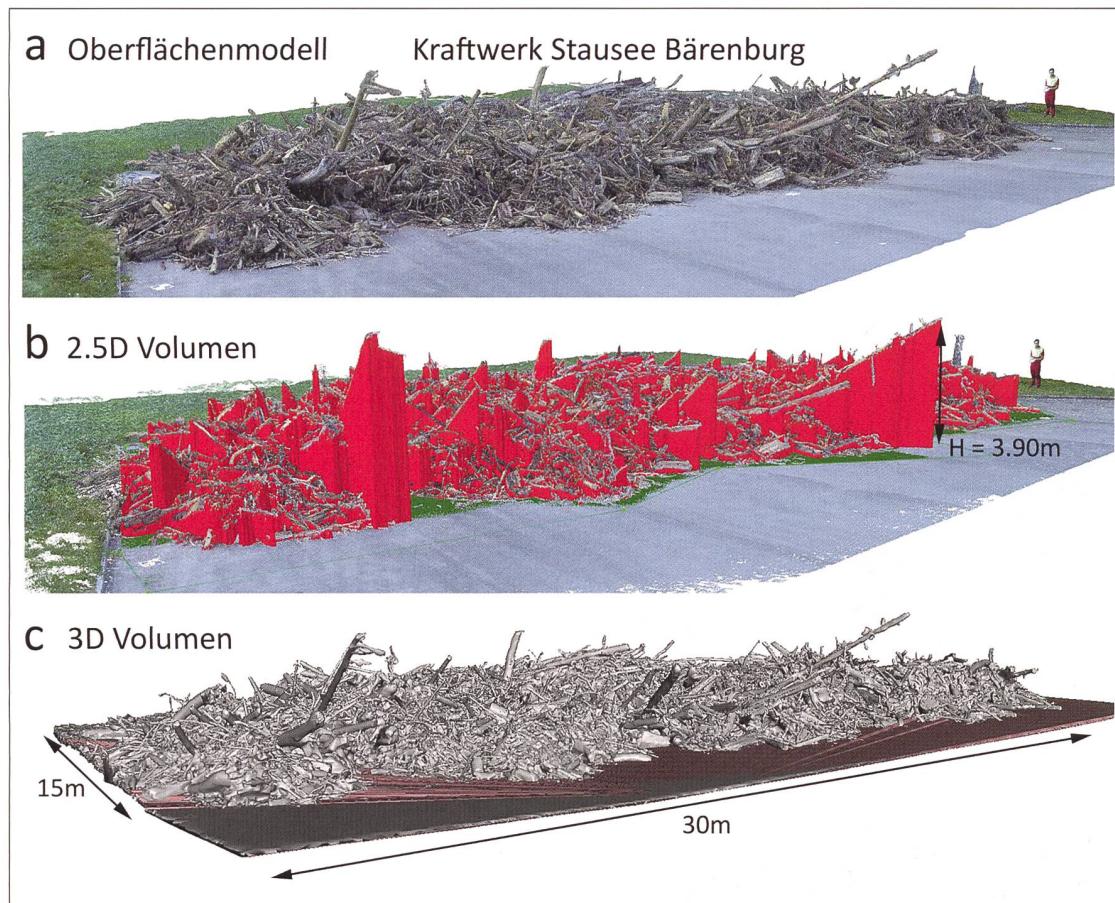


Bild 6: Diverse Modelle und Volumina sowie Vermessung der Schwemmholtzansammlung am Lagerplatz beim Stausee Bärenburg.

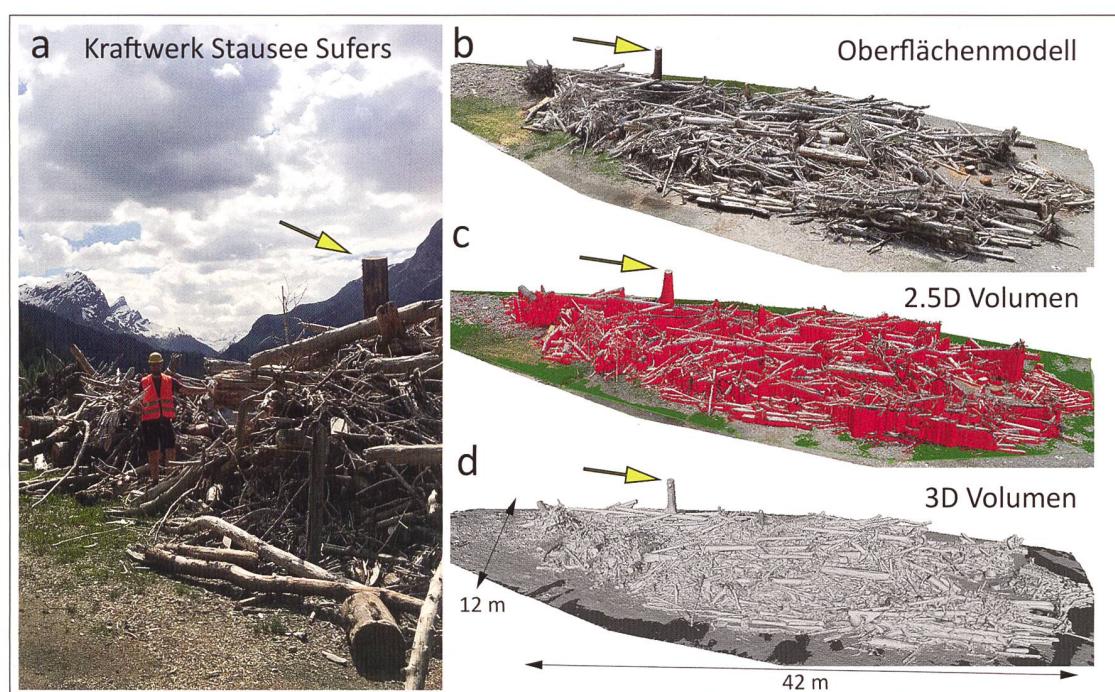


Bild 7: Diverse Modelle und Volumina sowie Vermessung der Schwemmholtzansammlung am Lagerplatz beim Stausee Sufers.

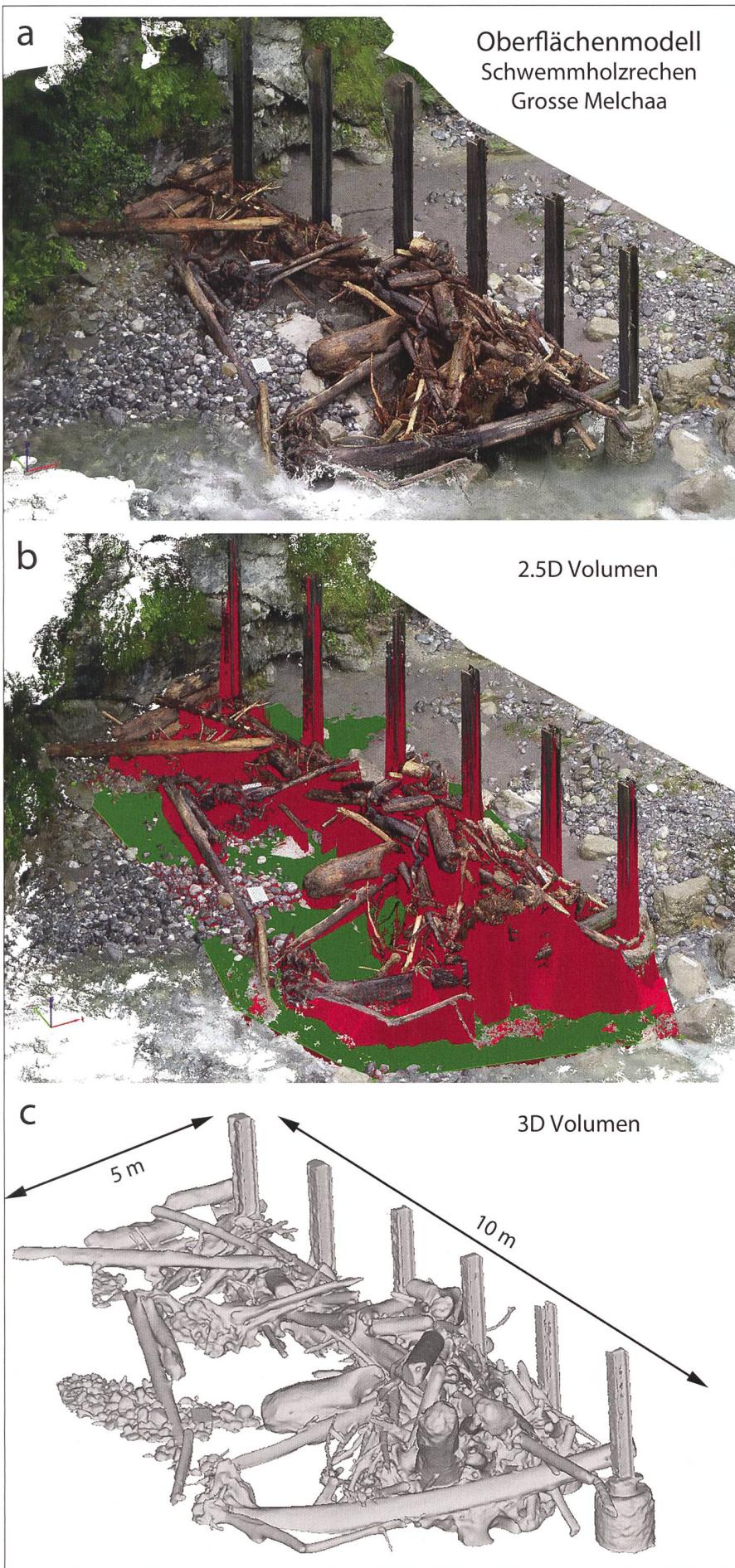


Bild 8: Diverse Modelle und Volumina sowie Vermessung der Schwemmholtansammlung am Rückhaltebauwerk an der Grossen Melchaa.

Das digitale Zwillingsmodell der Schwemmholtansammlung an der Grossen Melchaa (*Bild 8*) beruht auf der geringsten Anzahl an Punkten (12,2·106), weist jedoch aufgrund der kleinen Gesamtabmessungen im Verhältnis zu den anderen Schwemmholtansammlungen eine wesentlich höhere Punktdichte (325·103 Punkte pro m^3) auf. Die Auflösung der Grundfläche für die 2.5D Volumenbestimmung ergab 2,3 mm. Das digitale Zwillingsmodell der Grossen Melchaa verfügt demnach über die beste Auflösung aller Schwemmholt-Modelle dieser Studie.

Der benötigte Zeitaufwand für die Drohnenbefliegung im Feld (max. 1 h ohne An-/Abreise), sowie die benötigte Zeit zur Erstellung der 3D-Modelle mittels Pix4Dmapper Photogrammetrie-Software (max. 1,5 h) und anschliessender Bearbeitung und Fertigstellung (2 h) beanspruchte rund einen halben Tag. Durch die hohe Qualität der Resultate und die geringen Kosten (Westoby et al., 2012) bietet die SfM-Methode eine effektive Möglichkeit zur Dokumentation und Vermessung von Schwemmholtansammlungen. Alle digitalen Zwillingsmodelle dieser Studie weisen bei der Skalierung eine sehr hohe Genauigkeit auf (< 1 mm). Die erzielte Auflösung der zur Vermessung des 2.5D Volumens benötigten Grundfläche (2,3 bis 5,0 mm) ist für jedes 3D-Modell dieser Studie um ein Vielfaches kleiner als die kleinsten aufzulösenden Schwemmholtelemente (> 10 mm). Dadurch resultieren sehr genaue volumetrische Ergebnisse, und es kann ausgeschlossen werden, dass die Auflösungsspanne von 2,3 bis 5,0 mm in dieser Studie einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse und deren Vergleichbarkeit hat. Die Vergleichbarkeit der 3D-Modelle und der Ergebnisse ist gewährleistet.

3.2 Volumen und Porosität der Schwemmholtansammlungen

Die Ergebnisse der Vermessungen mittels SfM-Methode und den manuellen Analysen sind in *Tabelle 1* und *Bild 9* dargestellt. Wie in *Bild 5b* und *Bild 8b* ersichtlich, wurde im Zuge der Messung des 2.5D Volumens an den Rückhaltebauwerken auch das Volumen der Stäbe erfasst, welches im Anschluss unter Verwendung einfacher geometrischer Formen (Zylinder und Quader) subtrahiert wurde. Die Schwemmholtansammlungen an der Sihl, in Bärenburg und Sufers weisen trotz grosser Unterschiede in der ermittelten Gesamtmasse und Feuchtigkeit ähnliche Kubaturen auf (*Bild 9*). Die Ansammlung beim Stausee Sufers weist das grösste 2.5D Volumen ($435,23 m^3$), das kleinste Festmetervolumen ($162,71 m^3$) und

	<i>Sihl</i>	<i>Bärenburg</i>	<i>Sufers</i>	<i>Grosse Melchaa</i> Vergleichsdatensatz 2020 (Spreitzer et al., 2022)	
Evaluierung im Feld					
<i>Masse (t)</i>	140.00	123.52	73.22	9.10	7.84
<i>Holzdichte im Feld (t/m³)</i>	0.84	0.66	0.45	0.81	0.83
Drohnenvermessung					
<i>2.5D Schüttvolumen, V_{2.5D} (m³)</i>	411.93	425.12	435.23	28.77	31.83
<i>3D Volumen, V_{3D} (m³)</i>	369.00	367.87	383.79	19.39	19.91
Zusätzliche Abschätzungen					
<i>Festmeter, fm (m³)</i>	166.67	187.15	162.71	11.23	9.45
<i>Max. Porosität, n_{max} (%)</i>	60	56	63	61	70
<i>Min. Porosität, n_{min} (%)</i>	55	49	58	42	53
<i>Empirisch ermittelte Porosität, n_{emp} (%)</i>	55	57	56	66	69
<i>Auflockerungsfaktor, a (-)</i>	2.5	2.3	2.7	2.6	3.3
<i>Strukturelle Anordnung, PA (%)</i>	90	87	88	67	63

Tabelle 1: Resultate der Untersuchungen von Schwemmholtzansammlungen an Schweizer Flüssen.

dadurch die grösste Porosität (63 Prozent) auf. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass eine grosse Varianz in der Schwemmholtzdimension über die verschiedenen Versuchsorte hinweg (*Bild 4*) nicht zwingend Einfluss auf die resultierende Porosität ($n_{\max} = 56$ bis 63 Prozent, *Tabelle 1*) der Schwemmholtzansammlungen nehmen muss. Umso wichtiger ist die Verwendung von innovativen Vermessungsmethoden (SfM-Photogrammetrie, Laser-Scanner), anstatt einer rein visuellen Methode wie von Livers und Wohl (2021) zuletzt angewandt. Die Abschätzung der empirisch ermittelten Porosität mittels der SfM-Methode (Gl. 4), unter Berücksichtigung der strukturellen Anordnung sowie der Verwendung eines Korrekturfaktors von 0,5 für komplexe Schwemmholtzansammlungen, wie von Spreitzer et al., (2022b) empfohlen, ergab eine sehr gute Annäherung an die tatsächliche Porosität (berechnet aus dem Festmeter- und Schüttvolumen, Gl. 1 bzw. 2) und erlaubt somit auch eine automatisierte Abschätzung für verhältnismässig grosse Schwemmholtzansammlungen (Sihl, Bärenburg und Sufers). Ein Vergleich der Porositätsbestimmungen ($n_{\max} = 56$ bis 63 Prozent, *Tabelle 1*) mit dem Auflockerungsfaktor ($a = 2,3$ bis 3,3, *Tabelle 1*) verdeutlicht eine relativ hohe bis mittlere Ablagerungsdichte der Schwemmholtzansammlungen an den Versuchsstandorten. Trotz der erzielten Ergebnisse gilt es zu beachten, dass die derzeitige Datengrundlage auf lediglich einigen wenigen Referenzwerten im Naturmassstab basiert und weitere Referenzwerte dringend erforderlich sind, um die Genauigkeit bzw. Zuverlässigkeit der empirisch ermittelten Porosität zu erhöhen.

3.3 Strukturelle Anordnung der Schwemmholtzansammlungen

Neben der Porosität wurde in dieser Studie auch die strukturelle Anordnung von

Schwemmholtzansammlungen untersucht (PA, *Bild 9*). Deutlich erkennbar wird eine abnehmende relative Eindringtiefe der SfM-Methode für grössere Schwemmholtzansammlungen (*Bild 9*). Übersteigt die Länge oder Breite einer Schwemmholtzansammlung ein Vielfaches der Abmessungen der längsten sich darin befindlichen Schwemmholtzelemente und übersteigt die Mächtigkeit (Dicke, Höhe) der Schwemmholtzansammlung ein Vielfaches der stärksten Stammdurchmesser, so reduziert sich die relative Eindringtiefe der SfM-Methode zusehends und eine zunehmend gleichmässige strukturelle Anordnung mit kompakter Erscheinungsform resultiert. Während am Beispiel der Grosse Melchaa ein wesentlicher Anteil des Gesamtporenvolumens von aussen eingesehen und mittels SfM-Methode aufgelöst werden kann, reduziert sich dieser auflösbare Porenanteil mit steigender Mächtigkeit der Schwemmholtzansammlung. Im Verhältnis zum Gesamtvolumen von sehr grossen und kompakten Schwemmholtzansammlungen werden die Einflüsse von auskragenden Elementen auf die Verklausungsporosität damit immer kleiner. Die SfM-Methode erkennt diesen Effekt, indem sich das 3D Volumen immer weiter an das 2.5D Volumen annähert. Bei losen Verklausungen vergrössert sich die relative Eindringtiefe der SfM-Methode entsprechend, und das 3D Volumen nähert sich zunehmend dem Festmetervolumen an. In diesem Fall resultiert für die strukturelle Anordnung PA ein kleiner Wert, der eine lose Verklausung reflektiert. Zur Unterscheidung von losen und kompakten Schwemmholtzansammlungen wird für die strukturelle Anordnung ein Richtwert von 70 Prozent ausgewiesen ($PA_{\text{Locker}} < 70 \text{ Prozent} < PA_{\text{Kompakt}}$ (Spreitzer et al., 2022b); *Bild 9 und 10*). Die max. Porosität berücksichtigt das 2.5D und Festmetervolumen (Gl. 1), wohingegen die min.

Porosität aus dem 3D und Festmetervolumen berechnet wird (Gl. 2). Die Verwendung des geeigneten Ansatzes sollte fallweise entschieden werden, da sowohl eine kleine als auch grosse Porosität den spezifischen Bemessungsfall abbilden kann.

Auffällig ist, dass die Porosität für eine Vielzahl an Schwemmholtzansammlungen im Bereich zwischen 55 und 70 Prozent liegt (Spreitzer et al., 2020b), wobei die strukturelle Anordnung im Feld erheblich variiert (PA = 55 bis 100 Prozent, *Bild 10*). Durch die starke Varianz der strukturellen Anordnung können Verklausungen mit ähnlicher Porosität unterschiedliche Auswirkungen auf das hydraulische Fliessverhalten haben (Spreitzer et al., 2022b), welche es in zukünftigen Studien zu erforschen gilt. So verursachen lockere Verklausungen mit wenigen, aber grossen Porenräumen (kleines PA) einen geringen Strömungswiderstand, wohingegen sehr kompakte Verklausungen mit sehr vielen, jedoch kleinen Porenräumen (grosses PA) einen grossen Strömungswiderstand erzeugen. Durch die Unterschiede in der Grösse sowie Anzahl an Porenräumen ergeben sich entgegen der Erwartung ähnliche Porositäten sowohl für lockere als auch für kompakte Verklausungen. Hinsichtlich der strukturellen Anordnung lassen die Ergebnisse von vorwiegend grösseren Schwemmholtzansammlungen auf eine kompakte Ablagerung schliessen, obwohl die einzelnen Elemente willkürlich angeordnet sind. Dies liegt daran, dass die Proportion aus der Gesamtabmessung einer Verklausung zu den grössten darin vorkommenden Schwemmholtzelementen mit steigender Gesamtabmessung stetig zunimmt und dadurch mächtige Schwemmholtzansammlungen ($> 400 \text{ m}^3$, Sihl, Bärenburg, Sufers) strukturierter erscheinen als kleinere Verklausungen ($< 50 \text{ m}^3$, Grosse Melchaa). Eine Tendenz, dass Ablagerungen mit einer kom-

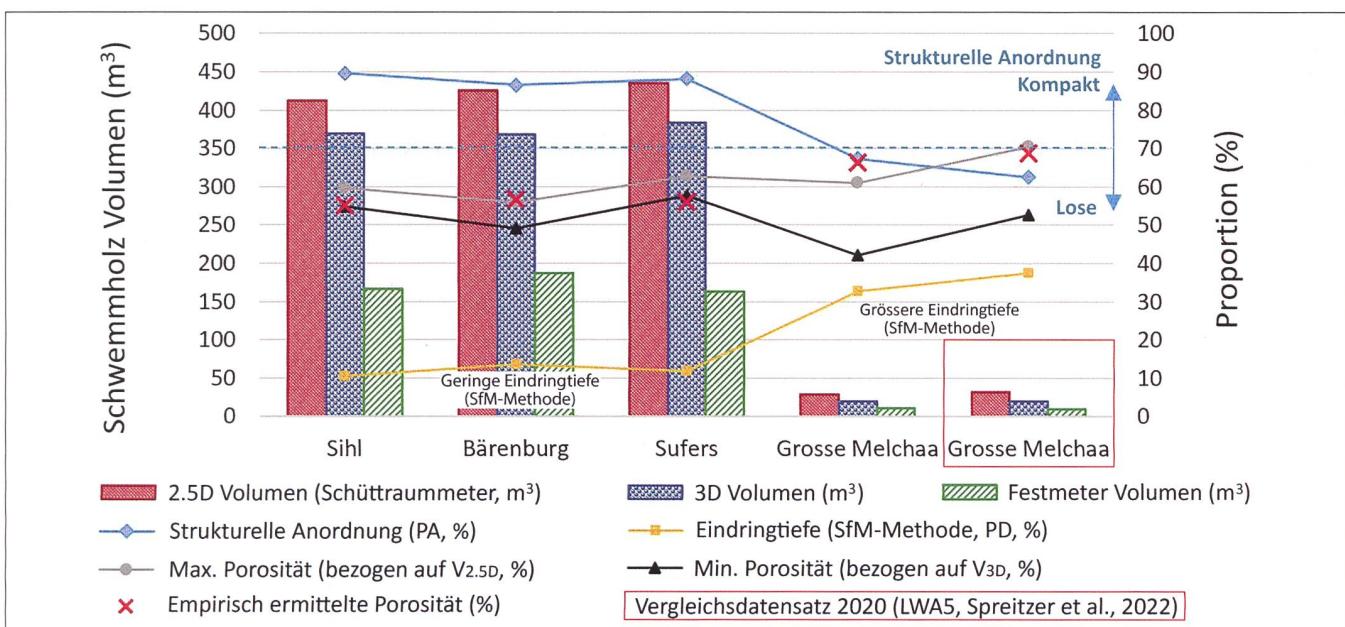


Bild 9: Vergleich der ermittelten Schwemmmholzvolumen. Der Übergangsbereich von gleichmässigen und kompakten zu ungleichmässigen und losen Verklausungen wird anhand der strukturellen Anordnung und einer 70-Prozent-Marke beschrieben. An der Grossen Melchaa wurden bereits im Jahr 2020 Erhebungen am selben Schwemmmholzrückhalt (LWA5 in Spreitzer et al. (2022b)) durchgeführt, welche in diesem Artikel als Vergleichsdatensatz angeführt werden.

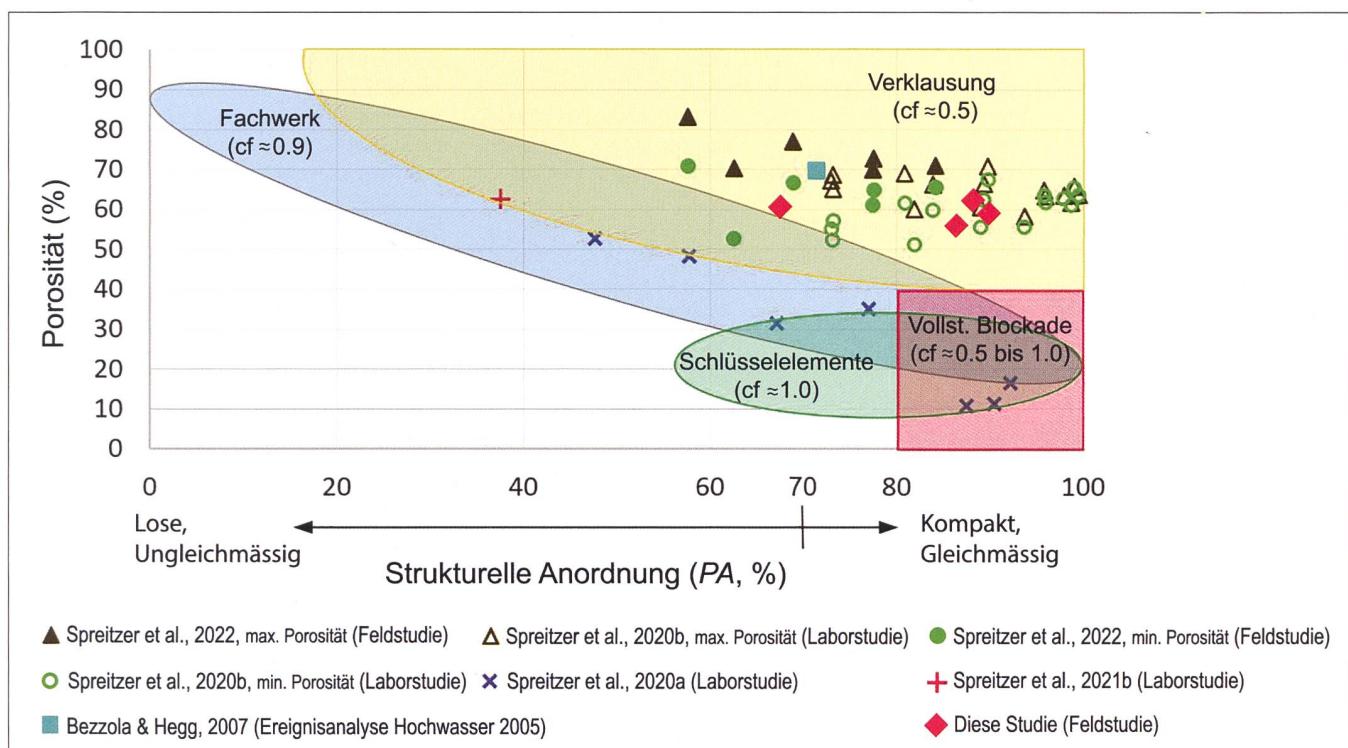


Bild 10: Gegenüberstellung der strukturellen Anordnung und Porosität von verschiedenen Schwemmmholzansammlungen. Die Einteilung der Verklausungstypen (Schlüsselemente, Fachwerke, komplexe Verklausungen und vollständige Blockaden) erfolgte nach Manners und Doyle (2008). Zur Ermittlung der empirischen Porosität (n_{emp}) wird je nach Verklausungstyp ein Korrekturfaktor (cf) empfohlen (adaptiert von Spreitzer et al. (2022b)).

pakten strukturellen Anordnung (Bild 10) eine geringere Porosität aufweisen (Spreitzer et al., 2022b), konnte mit dieser Studie wieder abschliessend bestätigt noch ausgeschlossen werden und erfordert weitere Erhebungen im Feld unter Berücksichtigung von Schwemmmholzansammlungen unterschiedlicher Dimension und Komplexität.

4. Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse dieser SmartWood_3D-Studie, mitsamt der Drohnenvermessung und den zusätzlichen manuellen Analysen von Schwemmmholzansammlungen im Naturmaßstab, erlauben neue Einblicke in Schwemmmholzverklausungen und geben

Aufschlüsse über das 2.5D Volumen (Schüttvolumen), das 3D Volumen sowie das Festmetervolumen. Anhand der gewonnenen Daten können Aussagen über die strukturelle Anordnung einer Ablagerung und deren Porosität getroffen werden. Die generierten Daten von grossen Schwemmmholzansammlungen stellen eine wichtige Ergänzung dar.

zung zur ersten Versuchsreihe – der Vermessung von kleineren Schwemmholtzansammlungen (Spreitzer et al., 2022b) – dar. Zudem helfen die Ergebnisse bei der Kalibrierung der SfM-Methode und sollen zukünftige Abschätzungen der Porosität auch ohne den zusätzlichen Mehraufwand von manuellen Analysen zur Bestimmung des Festmetervolumens ermöglichen. Durch die hohe Qualität der Resultate und die geringen Kosten (Westoby et al., 2012) bietet die SfM-Methode eine effektive Möglichkeit zur Dokumentation und Vermessung von Schwemmholtzansammlungen mit guter Vergleichbarkeit der erzielten Ergebnisse.

Durch die automatisierte Quantifizierung von Schwemmholtzvolumen, Porosität und struktureller Anordnung kann praxisrelevanten Fragestellungen bezüglich Verklausungswahrscheinlichkeiten, dem generierten Aufstau, aber auch den Aus-

wirkungen von Schwemmholtzansammlungen auf die Gerinnmorphologie (Schalko, 2018) besser nachgegangen werden. Die effiziente Dokumentation und Vermessung spielt insbesondere für Revitalisierungsprojekte und die Überwachung von künstlich installierten Schwemmholtzansammlungen (Engineered Log Jams, ELJ), eine bedeutende Rolle. Als weitere Schritte sollen Daten von Schwemmholtzverklausungen an kritischen Gewässerquerschnitten während Hochwasserereignissen gesammelt werden, für welche es der raschen Datenaufnahme mittels Drohnenvideos (Spreitzer et al., 2021a) bedarf. Diese Daten helfen bei der Instandhaltung und sicheren Bemessung von flussbaulichen Anlagen (Schmocker und Weitbrecht, 2013; Ruiz-Villanueva et al., 2017), um das Risiko von Schäden durch Schwemmholtzverklausungen zu minimieren.

5. Danksagung

Das Forschungsprojekt SmartWood_3D wurde dem Erstautor in Form eines Marie Skłodowska-Curie Individual Fellowships im Zuge des Horizon 2020 Forschungs- und Innovationsförderprogrammes der Europäischen Kommission (Projektnummer: 885274) finanziert. Dank ergeht zudem an die Gemeinde Sarnen, insbesondere an *Sepp Berchtold*, die Kraftwerksbetreiber der Kraftwerke Hinterrhein AG, speziell an *Urs Storni*, die Baudirektion des Kantons Zürich – Amt für Abfall, Wasser, Energie, und Luft (AWEL), insbesondere an *Simone Messner* und *Werner Hasler*, sowie an das Schweizer Softwareunternehmen Pix4D für die tolle Unterstützung dieses Forschungsprojekts.

Quellen:

- Andreoli, A., Comiti, F. & Lenzi, M.A. (2007) Characteristics, distribution and geomorphic role of large woody debris in a mountain stream of the Chilean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1675–1692.
- BAFU (2019) Schwemmholtz in Fließgewässern – Ein praxisorientiertes Forschungsprojekt. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Umwelt-Wissen, 102.
- Détert, M., Johnson, E.D. & Weitbrecht, V. (2017) Proof-of-concept for low-cost and non-contact synoptic airborne river flow measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 38, 2780–2807.
- Dixon, S.J. (2016) A dimensionless statistical analysis of logjam form and process. *Ecohydrology*, 9, 1117–1129.
- Flury, S., Rüdinger, C., Eicher, W., Pieren, J. & Lehmann, P. (2015) Hochwasserschutzprojekt Grosse Melchaa, Sarnen. *Wasser Energie Luft*, 107(3), 225–232.
- Follett, E., Schalko, I. & Nepf, H. (2020) Momentum and Energy Predict the Backwater Rise Generated by a Large Wood Jam. *Geophysical Research Letters*, 47.
- Gschnitzer, T., Gems, B., Mazzorana, B. & Aufleger, M. (2017) Towards a robust assessment of bridge clogging processes in flood risk management. *Geomorphology*, 279, 128–140.
- Hochstrasser, H., Schmocker, L., Bösch, M. & Oplatka, M. (2018) Schwemmholtzrechen für den Hochwasserschutz im unteren Sihltal. *Wasser Energie Luft*, 110(1), 25–32.
- Lange, D. & Bezzola, G.R. (2006) Schwemmholtz – Probleme und Lösungsansätze. VAW-Mitteilung 188 (H.-E. Minor, Hrsg.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- Livers, B. & Wohl, E. (2021) All Logjams Are Not Created Equal. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126.
- Manners, R.B. & Doyle, M.W. (2008) A mechanistic model of woody debris jam evolution and its application to wood-based restoration and management. *River Research and Applications*, 24, 1104–1123.
- Melville, B.W. & Dongol, M.S. (1992) Bridge Pier Scour with Debris Accumulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9), 1306–1310.
- Pagliara, S. & Carnacina, I. (2010) Temporal scour evolution at bridge piers: effect of wood debris roughness and porosity. *Journal of Hydraulic Research*, 48, 3–13.
- Remondino, F. (2003) From point cloud to surface the modeling and visualization problem. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIV-5/W10.
- Ruiz-Villanueva, V., Wyżga, B., Mikuś, P., Hajdukiewicz, M. & Stoffel, M. (2017) Large wood clogging during floods in a gravel-bed river: the Długopole bridge in the Czarny Dunajec River, Poland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42, 516–530.
- Sanhueza, D., Picco, L., Ruiz-Villanueva, V., Iroumé, A., Ulloa, H. & Barrientos, G. (2019) Quantification of fluvial wood using UAVs and structure from motion. *Geomorphology*, 345, 106837.
- Schalko, I. (2018) Modeling Hazards Related to Large Wood in Rivers. VAW-Mitteilung 249 (R. Boes, Hrsg.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- Schalko, I., Lageder, C., Schmocker, L., Weitbrecht, V. & Boes, R.M. (2019a) Laboratory flume experiments on the formation of spanwise large wood accumulations Part I: Effect on backwater rise. *Water Resources Research*, 55, 4854–4870.
- Schalko, I., Lageder, C., Schmocker, L., Weitbrecht, V. & Boes, R.M. (2019b) Laboratory Flume Experiments on the Formation of Spanwise Large Wood Accumulations: Part II-Effect on local scour. *Water Resources Research*, 4871–4885.
- Schmocker, L. & Weitbrecht, V. (2013) Driftwood: Risk Analysis and Engineering Measures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139, 683–695.
- Schwab, S., Baer, P. & Schneider, D. (2021) Räbloc - Verklausung und Räumung einer Schlucht im Emmental. *Wasser Energie Luft*, 113(1), 31–40.
- Spreitzer, G., Schalko, I., Boes, R.M. & Weitbrecht, V. (2021a) Video footage from drones for Structure-from-Motion photogrammetry – A practical and rapid assessment method for large wood accumulations in rivers? *EGU General Assembly 2021*, online, 19–30 Apr 2021 – EGU21-4966.
- Spreitzer, G., Schalko, I., Boes, R.M. & Weitbrecht, V. (2022a) SmartWood - Innovative Sensortechnik zur Messung und Analyse von Schwemmholtzprozessen in Fließgewässern. *Wasser Energie Luft*, 114(4), 259–266.
- Spreitzer, G., Schalko, I., Boes, R.M. & Weitbrecht, V. (2022b) Towards a non-intrusive method employing digital twin models for the assessment of complex large wood accumulations in fluvial environments. *Journal of Hydrology*, 614, 128505.
- Spreitzer, G., Tunnicliffe, J. & Friedrich, H. (2019) Using Structure from Motion photogrammetry to assess large wood (LW) accumulations in the field. *Geomorphology*, 346, 106851.
- Spreitzer, G., Tunnicliffe, J. & Friedrich, H. (2020a) Large wood (LW) 3D accumulation mapping and assessment using structure from Motion photogrammetry in the laboratory. *Journal of Hydrology*, 581, 124430.
- Spreitzer, G., Tunnicliffe, J. & Friedrich, H. (2020b) Porosity and volume assessments of large wood (LW) accumulations. *Geomorphology*, 358, 107122.
- Spreitzer, G., Tunnicliffe, J. & Friedrich, H. (2021b) Effects of large wood (LW) blockage on bedload connectivity in the presence of a hydraulic structure. *Ecological Engineering*, 161, 106156.
- Stucki, A. (2021) Entlastungsstollen Thalwil - Stand und Ausblick. *Wasser Energie Luft*, 113(3), 153–162.
- Thevenet, A., Citterio, A. & Pieglay, H. (1998) A new methodology for the assessment of large woody debris accumulations on highly modified rivers. *Regulated Rivers: Research & Management*, 14, 467–483.
- Ullman, S. (1979) The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 203, 405–426.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J. & Reynolds, J.M. (2012) ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314.

Autoren und Autorin:

Dr. Gabriel Spreitzer, Dr. Isabella Schalko,
Prof. Dr. Robert Boes, Dr. Volker Weitbrecht,
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und
Glaziologie (VAW) ETH Zürich, Hönggerberg 26,
8093 Zürich, www.vaw.ethz.ch,
gspr390@aucklanduni.ac.nz

