Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 114 (2022)

Heft: 4

Artikel: SmartWood : Innovative Sensortechnik zur Messung und Analyse von Schwemmholzprozessen in Fliessgewässern

Autor: Spreitzer, Gabriel / Schalko, Isabella / Boes, Robert

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1008204

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: 07.01.2026

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

SmartWood – Innovative Sensortechnik zur Messung und Analyse von Schwemmholzprozessen in Fliessgewässern

Gabriel Spreitzer, Isabella Schalko, Robert Boes, Volker Weitbrecht

Zusammenfassung

Schwemmholz spielt häufig eine kritische Rolle während Hochwasserereignissen, da Verklausungsprozesse zu grossen Schäden führen können. Die Bewegungsabläufe von Holz in Fliessgewässern sind bis heute relativ unbekannt, obwohl diese für viele praktische Fragestellungen von Bedeutung sind. An der VAW wird im Zuge einer durch die Europäische Kommission sowie das Bundesamt für Umwelt (BAFU) unterstützten Studie «SmartWood_3D» eine neue Methode zur Erforschung von Schwemmholzdynamiken entwickelt und erprobt. Es handelt sich dabei um intelligente («smart») Sensoren, welche in Baumstämme (L=4,35 m, D=0,33 m) eingebaut werden (sog. Smart Wood). Die sensormarkierten Stämme werden in einem Fliessgewässer ausgesetzt, um bei Hochwasser vollständig autonom Daten zur bislang nicht messbaren Schwemmholzdynamik zu generieren. Eine erste Versuchsreihe an der Grossen Melchaa, Kanton Obwalden, hat gezeigt, dass SmartWood den komplexen Anforderungen für den Einsatz in der Schwemmholzforschung entspricht und dabei qualitativ hochwertige Daten über Transportdynamiken aufzeichnet. Die generierten Sensordaten tragen zu einem besseren Verständnis von Mobilitäts-, Transport- und Ablagerungsprozessen bei und liefern Antworten auf praxisrelevante Fragestellungen hinsichtlich Anprallkräfte, Transportgeschwindigkeit und Orientierung von Schwemmholz. Zudem ermöglicht SmartWood die Rekonstruktion von komplexen Bewegungsabläufen und damit auch die Verifizierung neuer numerischer Simulationsmethoden.

Résumé

Le bois flottant joue souvent un rôle critique lors des crues, car les processus d'obstruction peuvent entraîner des dommages importants. Les processus de déplacement du bois dans les cours d'eau sont encore relativement peu connus, bien qu'ils soient importants pour de nombreuses questions pratiques. Dans le cadre de l'étude «SmartWood_3D» soutenue par la Commission européenne et l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), une nouvelle méthode de recherche sur la dynamique du bois flottant est développée et testée à la VAW. Il s'agit de capteurs intelligents («smart») qui sont intégrés dans des troncs d'arbres (appelés SmartWood) (L=4,35 m, D=0,33 m). Les troncs marqués par les capteurs sont placés dans un cours d'eau afin de générer, en cas de crue, des données entièrement autonomes sur la dynamique du bois flottant, jusqu'ici impossible à mesurer. Une première série d'essais sur la Grosse Melchaa, dans le canton d'Obwald, a montré que SmartWood répond aux exigences complexes de la recherche sur le bois flottant et enregistre des données de grande qualité sur la dynamique du transport. Les données générées contribuent à une meilleure compréhension des processus de mobilité, de transport et de dépôt et fournissent des réponses à des questions pratiques concernant les forces d'impact, la vitesse de transport et l'orientation du bois flottant. En outre, SmartWood permet la reconstruction de séquences de mouvement complexes et de vérifier ainsi de nouvelles méthodes de simulation numérique.

1. Einleitung

1.1 Schwemmholz in Fliessgewässern

Holz stellt ein bedeutendes ökologisches Element in Fliessgewässern dar. Zum einen reguliert es den Sedimenthaushalt sowie die Strömungsverhältnisse auf natürliche Weise, zum anderen bietet Holz die erforderliche Komplexität für die Schaffung von aquatischen und terrestrischen Lebensräumen durch die Bereitstellung von Refugien, Nahrung und Überschattung im und am Gewässer. Als Folge des Klimawandels mit intensivierten Wetterereignissen werden jedoch immer häufiger grosse Mengen an potenziellem Schwemmholz aus den Einzugsgebieten in die Gewässer eingetragen, von dem ein Teil im Zuge von Hochwasserereignissen unkontrolliert talwärts bewegt wird. In Flussabschnitten mit wichtigen Infrastrukturen sowie in dicht besiedelten Einzugsgebieten stellt ein Überangebot an Holz eine Gefahrenquelle dar. Fluss- und wasserbauliche Infrastrukturanlagen wie Brücken, Wehre und Durchlässe sind dabei besonders gefährdet, durch Schwemmholz-Anprall beschädigt oder durch Verklausungen blockiert zu werden. Zudem stellen natürliche Engstellen, wie z. B. Schluchten, Gefahrenstellen für Schwemmholzverklausungen dar, wie ein Ereignis im Emmental erst kürzlich gezeigt hat, bei welchem die Räbloch-Schlucht während eines Hochwassers durch Schwemmholz verstopfte und einen rund 11 m hohen und 1,5 km langen Rückstau an der Emme generierte *(Schwab et al., 2021)*.

Das Schwemmholzpotenzial – das potenzielle Holzvolumen, welches in Fliessgewässer eingetragen werden kann – wird in Mitteleuropa vorwiegend durch Wind- und Schneebruch, Hangrutschungen und Lawinenabgänge sowie Ufererosionen während Hochwasserereignissen generiert. In den letzten Jahren tragen jedoch auch immer häufiger Dürren sowie die Verbreitung des Borkenkäfers zur Förderung des Totholzanteiles in heimischen Wäldern bei *(BAFU et al., 2019, Destatis, 2021)*. Speziell in unwegsamem und schwer erreichbarem Gelände (steile Berghänge, Schutzgebiete ohne Nutzung, Schluchten) bleibt Totholz zumeist unberücksichtigt und stellt damit eine potenzielle Gefahr als zukünftiges Schwemmholz dar. Neben der Gefährdung durch die Mobilisierung von grösseren

Mengen an Totholz während extremen Niederschlagsereignissen besteht zudem ein erhebliches Risiko durch den Eintrag von Frischholz (z. B. infolge Hangrutschungen und Ufererosion), was eine zusätzliche, schwer kalkulierbare Komponente für ein zuverlässiges Hochwasserschutz- und Schwemmholzkonzept darstellt.

Zusätzlich zur Menge an verfügbarem Schwemmholz in einem Fliessgewässer spielen auch die Orientierung und Geometrie individueller Holzelemente für deren Bewegungsverhalten während des Transports im Hochwasserfall eine wesentliche Rolle. Holzstämme ohne Wurzelstock und Astwerk folgen unterschiedlichen Bewegungsmechanismen im Vergleich zu Frischholz mit Wurzelstöcken und Geäst, welche sowohl eine Ankerwirkung aufweisen als auch für eine erhöhte Fläche und damit Schubkraft im Falle der Ablagerung sorgen *(Braudrick and Grant, 2000)*. Durchgeführte Studien hinsichtlich der Transport- und Ablagerungsfähigkeit von Schwemmholz an kritischen Gewässerquerschnitten (Brücken) berücksichtigten über 1200 Laborversuche und schlussfolgerten, dass sowohl die Abflusstiefe als auch der vorherrschende Fliesszustand eine für die Verklausungswahrscheinlichkeit untergeordnete Bedeutung aufweisen *(Gantenbein, 2001, Lange and Bezzola, 2006)*. Anhand weiterer Modellversuche konnte gezeigt werden, dass sich die Verklausungswahrscheinlichkeit an Brücken mit zunehmender Schwemmholzgrösse und abnehmendem Freibord (Anstieg der Abflusstiefe) stetig verschärft *(Schmocker and Hager, 2011)*. *Wyss et al. (2021)* führte eine erste Feldstudie zur Verklausungswahrscheinlichkeit von Baumstämmen an einem Brückenpfeiler durch, und stellte deren Ablagerungsfähigkeit in Bezug zum Kräftegleichgewicht aus den einwirkenden Schubkräften am Stamm und den resultierenden Reibungskräften zwischen Baumstamm und Brückenpfeiler, wie dies bereits von *Braudrick and Grant (2000) sowie Schalko (2018)* für stationäre Strömungsverhältnisse unter Laborbedingungen berücksichtigt wurde. Das Schwemmholztransport- und Ablagerungsverhalten variiert zudem mit der Anzahl der sich an einem Querschnitt befindlichen Einzel-Bauwerke (z. B. Brückenpfeiler, Wehrpfeiler, Rückhalterechen) sowie deren Abstand zueinander und der Holzlänge *(Schalko et al., 2019)*. Obwohl in der Schwemmholzforschung bislang bedeutende Fortschritte erzielt wurden, gestaltet sich die Erfassung und Verallgemeinerung von Schwemmholzdynamiken in Fliessgewässern immer noch als äusserst schwierig *(BAFU, 2019)*. Dies liegt vor allem an einem Mangel an geeigneten Methoden zur Messung von Mobilisierungs-, Transport- und Ablagerungsprozessen, wodurch bisherige Studien zumeist auf Messmethoden, basierend auf der Eulerschen Perspektive (vom Ufer aus) angewiesen waren. Durch den Einsatz neuer Technologien werden nun jedoch auch Betrachtungsweisen aus der Lagrangeschen Perspektive (direkt im Objekt) möglich, mit welcher Messungen unabhängig von äusseren Einflüssen durchgeführt werden können. Durch Einschränkungen in der Messtechnik und unvorhersehbare Umwelteinflüsse gestalten sich Schwemmholzexperimente im Natur-Massstab äusserst aufwändig und schwierig. Umso wichtiger ist es, ein fundamentales Verständnis für das Bewegungsverhalten von Schwemmholz in Wildbächen und Flüssen zu generieren, um Anprallkräfte und Verklausungswahrscheinlichkeiten an kritischen Flussquerschnitten zu quantifizieren. Dies hilft bei der Massnahmenauswahl, wie etwa dem Design und der Platzierung von Schwemmholzrückhaltebauwerken an geeigneten Gewässerabschnitten *(Schmocker and Weitbrecht, 2013, Stucki, 2021)*, um Hochwasserschäden gering zu halten und die Sicherheit von Infrastrukturanlagen gewährleisten zu können.

1.2 Ziele von SmartWood

Die Interaktion zwischen Schwemmholz und wasserbaulicher Infrastruktur erhöht im Hochwasserfall das Gefahrenpotenzial für die umliegenden Gebiete als auch für die Bauwerke selbst. Eine Verbesserung des Prozessverständnisses der Schwemmholzdynamik in Fliessgewässern mit innovativen Messmethoden kann für den modernen Hochwasserschutz wichtige Informationen liefern. Aus diesem Grund wird im Zuge des SmartWood_3D-Forschungsprojekts an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich intensiv an der Entwicklung neuer Methoden zur Erforschung der Schwemmholzdynamik während Hochwasserereignissen in Fliessgewässern gearbeitet. Zur Quantifizierung der komplexen Prozessabfolgen werden speziell entwickelte Smart-Sensoren zum ersten Mal im Natur-Massstab angewendet. Die generierten Sensordaten sollen dabei Antworten auf praxisrelevante Fragestellungen liefern und zu einem besseren Verständnis von Mobilitäts-, Transport- und Ablagerungsprozessen beitragen. Dies umfasst Fragestellungen bezüglich Anprallkräfte Transportgeschwindigkeit und Orientierung von Schwemmholz, aber auch der Rekonstruktion von komplexen Bewegungsabläufen sowie des zurückgelegten Transportweges von individuellen Baumstämmen. Diese Erkenntnisse sind zum Beispiel für die Dimensionierung und die Funktion von Holzrückhaltebauwerken, z. B. hinsichtlich der benötigten Rechenstababständen oder für ein optimiertes Design von Brückenpfeilern von Bedeutung.

2. Methodik

2.1 SmartWood-Sensoren

SmartWood_3D schliesst an das Konzept zur Verwendung von Trägheitssensoren in der Schwemmholzforschung an, welches von *Spreitzer et al. (2019a)* und *Spreitzer et al. (2019b)* an der University of Auckland in Neuseeland erstmals vorgestellt und auf dessen Eignung für die Schwemmholzforschung erprobt wurde. Das Konzept beruht auf Smart-Sensoren *(Bild 1)*, welche zur Messung von Beschleunigungs-, Winkelgeschwindigkeits- sowie magnetischer Flussdichteänderungen während Schwemmholztransportprozessen eingesetzt werden. Die ersten Modellversuche wurden im Massstab 1:15 durchgeführt, wobei Holzzylinder (Rundstäbe) mit einer im Stabzentrum installierten inertialen Messeinheit (IMU), sog. SmartWood, verwendet wurden. Die skalierten Rundstäbe mit einer Länge von rund 270 mm und einem Durchmesser von 22 mm entsprechen dabei Rundholzstämmen mit einer Länge von 4 m und einem mittleren Durchmesser von 0,33 m, wie diese häufig in der Holz- und Forstwirtschaft erzeugt werden und auch für das SmartWood_3D-Forschungsprojekt zur Anwendung kommen. Basierend auf diesem Ansatz werden an der VAW Feldversuche durchgeführt, wobei neue Anforderungen an die Sensortechnik gestellt werden mussten. Zum einen muss die gesamte Sensortechnik vor den enormen mechanischen Einwirkungen während Transport und Ablagerungsprozessen geschützt werden, zum anderen werden sehr hohe Ansprüche an die Qualität der produzierten Daten gestellt (z. B. den Einfluss von metallischen Interferenzen – Geistersignale oder Rauschen – in den Messdaten möglichst gering zu halten). Für den Einsatz von SmartWood im Natur-Massstab musste somit eine neue Sensor-Generation konzipiert werden.

Die neue IMU *(Bild 1)* besitzt eine Sensorplatine mit Prozessor, über welche die generierten Daten von Accelerometer (Beschleunigung), Gyroskop (Winkelgeschwindigkeit) und Magnetometer (magnetische

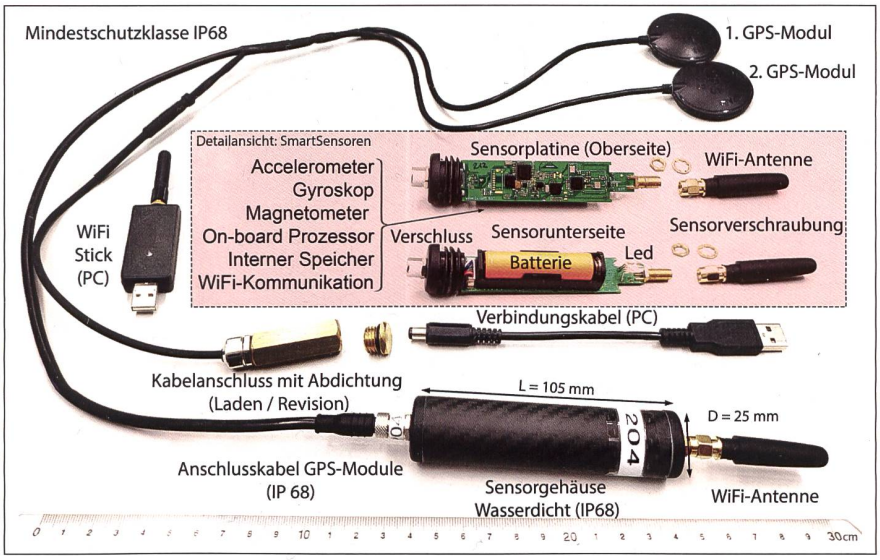

Bild 1: Smart-Sensor zur Verwendung in der Schwemmholzforschung.

Detail	Spezifikation
Länge	105 mm
Durchmesser	25 mm
Batterie	4,25 V, bis zu 2600 mAh
Messfrequenz	25 und 100 Hz
Memory	8 MB
Beschleunigungssensor	0,5 mg bis 16 g
Winkelgeschwindigkeitssensor	0,1 bis 2000 deg·s^{-1}
Magnetometer	0,3 bis 1300 µT
GPS	0,02 bis 4 m
Ruhemodus nach	1 s
Aufwachzeit nach	1/100 s
Datenübertragung	WiFi (100 m) / USB
WiFi Frequenz	868 MHz (für CH)
Betriebssystem	Windows 7 & 10, 64-bit

Tabelle 1: Smart-Sensor-Spezifikationen und technische Daten.

Flussdichte) unmittelbar verarbeitet werden können. Zusätzlich zu den Messdaten der IMU sollen zwei externe GPS-Module Informationen über die geodätische Position der Schwemmholzelemente liefern. Die gewonnenen Daten werden direkt in der IMU mittels des eigenen Prozessors zeitsynchronisiert und auf einem internen Speicher gesammelt. Die gespeicherten Messdaten werden nach Versuchsende kabellos über die integrierte WiFi-Verbindung ausgelesen. Eine leistungsstarke Batterie gewährleistet lange Standbys (bis zu 180 Tage) sowie aktive Messzeiträume (bis zu 100 Std.), wodurch die Kapazität der IMU rein durch den internen Speicher, welcher derzeit auf 8 MB begrenzt ist, limitiert wird. Je nach Sensorkonfiguration und Messfrequenz ergeben sich dadurch mögliche Messzeiträume von rund einer Stunde bis zu mehreren Tagen. Um die Datensätze möglichst klein zu halten, verfügen die IMUs über eine Start-/Stoppfunktion, um Messungen automatisch bei z. B. ansteigendem Wasserstand (Mobilisierung) zu starten und nach der Ablagerung wieder zu stoppen. Nach der Ablagerung senden die IMUs automatisch ein regelmässiges Funksignal im ISM-Band, welches mittels Yagi-Antenne zur Wiederauffindung von SmartWood geortet werden kann. Die Sensor-Einheiten wurden von SST Smart Solutions Technology Consulting in Deutschland konzipiert und hergestellt. Die Entwicklungs- und Herstellungskosten der Sensor-Einheiten mit externen GPS-Modulen betrugen rund CHF 15 000.–. Weitere Details zu den Smart-Sensoren sind in *Bild 1* sowie *Tabelle 1* ersichtlich.

2.2 Herstellung von SmartWood

An der VAW wurden insgesamt zehn Smart Wood-Stämme für den Einsatz im Feld hergestellt *(Bild 2)*. Die verwendeten Fichten-Stämme haben eine Länge von 4,35 m bei einem mittleren Durchmesser von 0,33 m. Das Stammgewicht bei Versuchsdurchführung betrug rund 180 kg, wodurch eine Dichte der SmartWood-Stämme von rund 500 kg·m^{-3} resultiert. Bei der Herstellung galt es insbesondere darauf zu achten, dass die IMU im Stamm-Mittelpunkt installiert wird, um etwaige Exzentrizität in den Messdaten gering zu halten *(Bild 2a)*. Hierzu wurde eine rechteckige Aussparung in der Stamm-Mitte angefertigt. Des Weiteren wurde beim Einsetzen der Sensoren darauf geachtet, dass alle IMUs dieselbe Orientierung mit Bezug auf die Stamm-Ausrichtung aufweisen. Demnach entspricht die Längsachse des Stammes der x-Achse, wobei die Drehung um die Längsachse als Rollen bezeichnet wird. Die z-Achse wurde in Richtung der Gravitation ausgerichtet, wobei die Drehung um die z-Achse in dieser Lage als Gieren bezeichnet wird *(Bild 2b)*. In der Ausgangslage (Aussparung zeigt nach oben) bilden x- und y-Achse eine horizontale Ebene. Die Drehung um die y-Achse wird demnach als Nicken bezeichnet *(Bild 2b)*. An der rechten und linken Seite der Aussparung wurde jeweils ein GPS-Modul angebracht, sodass sich bei Rollbewegungen des SmartWood-Stammes immer ein GPS-Modul über dem Wasserspiegel befindet und dadurch ein kontinuierliches GPS-Signal empfangen

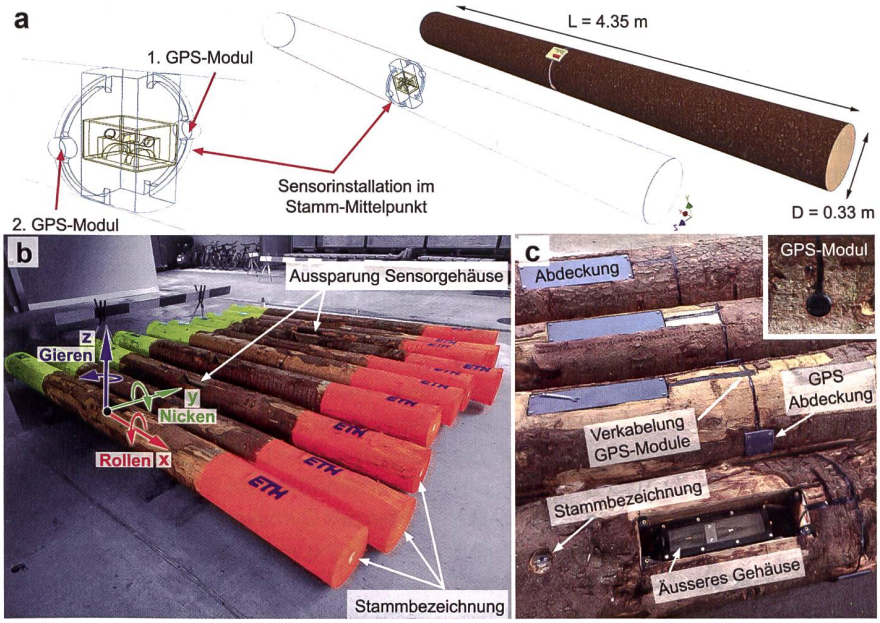

Bild 2: Aufbau der SmartWood-Stämme mit der Sensorinstallation im Stamm-Mittelpunkt, dem äusseren Schutzgehäuse gegen Umwelt- als auch mechanische Einflüsse und je zwei GPS-Modulen pro Stamm. Die Sensororientierung im Stamm wird anhand des Bezugssystems in (b) beschrieben.

werden kann. Für die sichere Verbauung der GPS-Module mit zugehöriger Verkabelung wurden rund 30 mm tiefe Aussparungen in die Stamm-Aussenseite gefräst *(Bild 2c)*. Die gesamte verbaute Sensortechnik muss sowohl vor Feuchtigkeit, Schmutz und weiteren Umwelteinflüssen geschützt sein als auch den mechanischen Einwirkungen, wie Anprallkräften oder Abrasion, zuverlässig standhalten können. Zum Schutz vor diesen Einwirkungen werden die IMUs in einem «äusseren Gehäuse» untergebracht *(Bild 2c)*, welches starr mit dem Stamm verbunden ist. Dies spielt bei der Messung der SmartWood-Orientierung sowie der Anprallkräfte eine wesentliche Rolle. Besonderes Augenmerk wurde auf die Verwendung von nicht-metallischen bzw. nicht-magnetischen Materialien gelegt, um die IMU-Messungen nicht unmittelbar zu beeinflussen. Zur optischen Bestimmung der SmartWood-Orientierung wurde eine Farbcodierung an den Stämmen angebracht *(Bild 2b)*. Dies erleichtert ausserdem die Wiederauffindbarkeit von SmartWood nach den Experimenten. In dieser Form können die neuartigen SmartSensoren *(Bild 1)* mit externen GPS-Einheiten zum ersten Mal in Prototyp-Holzstämmen *(Bild 2)* eingesetzt werden, um die Bewegungsprozesse von Schwemmholz in der Natur genauer zu erforschen. Bevor die SmartWood-Stämme ins Feld geliefert werden konnten, mussten die Sensorgehäuse eine Dichtheitsprüfung bestehen und die sensormarkierten Stämme eine Kalibrierungsphase von trivialen Bewegungsabläufen im Labor (3 x 360° Rollen sowie Gieren) durchlaufen.

3. Versuchsprogramm

Während eines Hochwasserereignisses im Sommer 2021 wurden an der Grossen Melchaa im Kanton Obwalden zum ersten Mal Feldversuche mittels SmartWood durchgeführt. Im Oberlauf der Grossen Melchaa, beim Kraftwerk Hugschwendi, wurden am Vormittag des 15. Juli 2021 vier SmartWood-Stämme nach dem Start der Sensoren manuell in die hochwasserführende Grosse Melchaa ausgesetzt. Von der Zufahrtsstrasse aus wurden die SmartWood-Stämme über eine steile Böschung ins Gewässer «gerollt» *(Bild 3a*, 46°48'10.98''N 8°17'05.89''O), und anschliessend rasch von den Wassermassen (≈15 $m^3 \cdot s^{-1}$) mobilisiert und transportiert. Für die Verifizierung der gemessenen Sensordaten mit tatsächlichen Bewegungsabläufen wurden die Versuche sowohl vom Ufer als auch von der Luft aus via Drohne

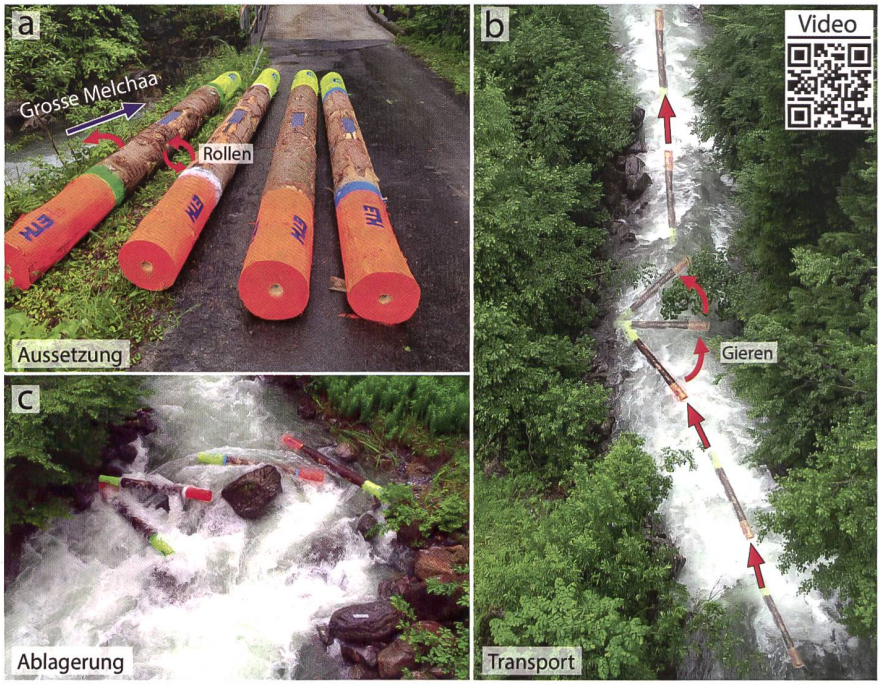

Bild 3: Eindrücke der ersten SmartWood-Versuche im Natur-Massstab an der Grossen Melchaa (Kanton Obwalden). Vier SmartWood-Stämme wurden manuell in das Gewässer ausgesetzt (a), mobilisiert und transportiert (b) und schliesslich im Gewässer abgelagert (c).

gefilmt. Den Beobachtungen zufolge unterlagen die SmartWood-Stämme auf deren Weg talwärts komplexen Transportprozessen, unter anderem Rollen, Gieren und zahlreichen Interaktionen mit dem Ufer sowie der Gewässersohle. Etwa 140 m flussab von der Aussetzstelle wurden alle Stämme am gleichen Querschnitt, an grösseren Blöcken im Gewässer (*Bild 3c*, 46°48'15.80''N 8°17'06.40''O) abgelagert, von wo aus die Stämme im Anschluss mittels Lastwagenkran geborgen werden konnten. Noch vor der Bergung der SmartWood-Stämme wurde deren Speicher ausgelesen und die erzeugten Messdaten gesichert.

4. Erste Resultate und Diskussion

4.1 Sensordaten

Die komplizierten Transportdynamiken und Interaktionen von SmartWood mit der Gewässersohle und dem Ufer können in den generierten Messdaten nachvollzogen werden. Den Beginn der Versuche hebt eine kontinuierlich ansteigende Winkelgeschwindigkeit um die Längsachse (x-Achse) von SmartWood hervor *(Bild 4, oben)*. Messdaten des Gyroskops zeigen die manuelle Aussetzung von SmartWood noch ausserhalb des Wassers. Der kontinuierliche Anstieg der Winkelgeschwindigkeit von Sekunde 5 bis 8 repräsentiert bei Stamm B eine immer schneller werdende Rollbewegung über die steile Böschung hinunter in den Fluss. Zum Zeitpunkt der grössten Winkelgeschwindigkeit verzeichneten beide lateralen Achsen (y und z) des Accelerometers *(Bild 4, Mitte)* Beschleunigungskräfte im Bereich von -8,19 g und +9,19 g, welche durch den Anprall von SmartWood auf die Gewässersohle bewirkt wurden. Ähnlich wie die Messdaten des Gyroskops auf eine Rollbewegung schliessen lassen, liefern auch die Messdaten des Magnetometers Information über eine Rollbewegung, welche sich über alternierende Signale in der magnetischen Flussdichte entlang der y- und z-Achse erkennen lässt *(Bild 4, unten)*.

Nach einer Messzeit von rund 29 s wurde in den Beschleunigungsdaten ein Anprall mit einer Magnitude von +7,14 g verzeichnet. Dieser Anprall wird in *Bild 5* im Detail dargestellt und resultiert, wie Beobachtungen aus der Luft zeigen *(Bild 6)*, aus einem Anprall des SmartWood-Stammes am rechten Flussufer. Kurz nach dem Uferanprall (Sekunde 35 bis 42) geben die SmartWood-Rohdaten des Gyroskops und Magnetometers Aufschluss auf Gieren um rund 90° sowie zahlreiche Umdrehungen um die Längsachse des SmartWood-Stammes, was wiederum auf eine rollende Bewegung schliessen lässt. Diese Interpretation der SmartWood-Rohdaten wird durch den beobachteten Bewegungsablauf mit Hilfe von Videoanalysen *(Bild 6)* bestätigt. Ähnliche Bewegungsabläufe wurden auch von *Ruiz-Villanueva et al. (2016)* beschrieben, wobei aufgrund der Fliessbedingungen ein Stammende stärker be-

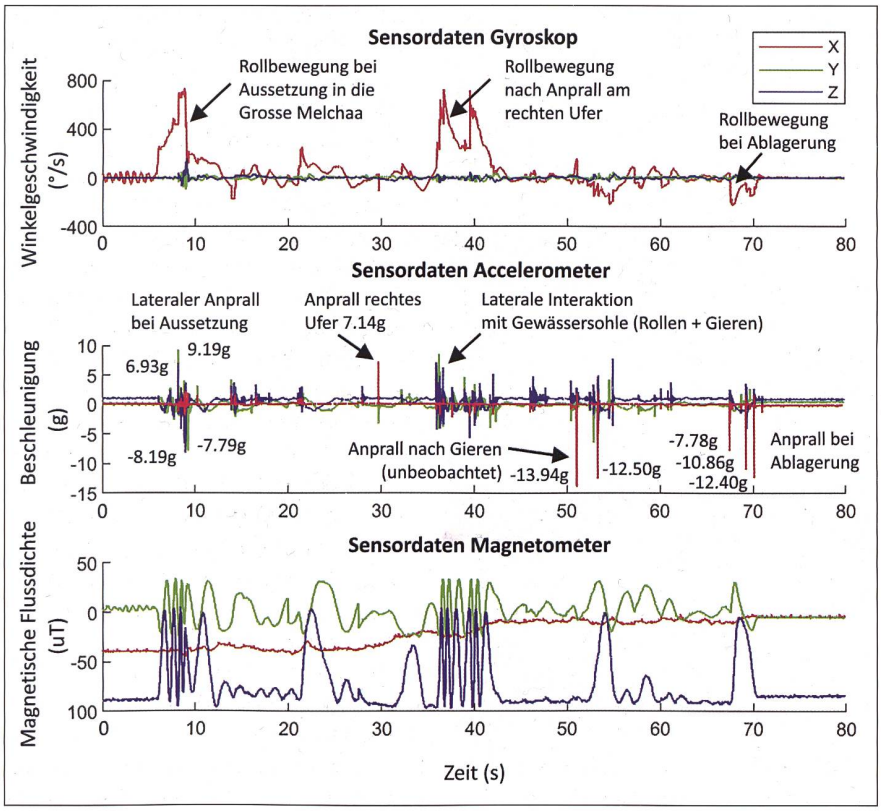

Bild 4: Rohdaten eines SmartWood-Stammes (SmartWood B) der ersten Versuchsreihe an der Grossen Melchaa von der Aussetzung bis zur Ablagerung nach einem Transportweg von rund 140 m.

schleunigt wurde, was zu Gieren sowie Rollen führte. Gegen Ende der Rollbewegung erfuhr der SmartWood-Stamm erneut eine Gierbewegung um weitere 90° und wurde in paralleler Ausrichtung zur Fliessrichtung weitertransportiert. Durch die relativ langsame Gierbewegung ist diese in den Gyroskop-Rohdaten nicht offensichtlich erkennbar (verhältnismässig geringe Winkelgeschwindigkeit). Bei genauer Betrachtung der Messdaten des Magnetometers wird jedoch erkennbar, dass sich die magnetische Flussdichte mit Bezug auf die x-Achse über den Zeitraum von 29 s bis 42 s um einen signifikanten Faktor verändert hat und in Summe einer Gierbewegung um 180° entspricht. Die Bestätigung der Gierbewegung um 180° liefern weitere gemessene Anprallkräfte in Längsrichtung des SmartWood-Stammes (Sekunde 51, 53), welche nun in entgegengesetzter Richtung (–13,94 g und –12,50 g) aufgezeichnet wurden. Gegen Ende der Messdaten wurden abermals eine erhöhte Winkelgeschwindigkeit um die x-Achse sowie mehrere Anprallkräfte in Längsrichtung ersichtlich, welche durch die Videoanalyse als Ablagerung bestätigt werden konnte.

Im Detail wird ersichtlich, dass jeder Anprall in zwei zeitliche Komponenten (Anprall und Rückprall) aufgeteilt werden kann *(Bild 5)*. Zum einen ergibt sich aus der Steifigkeit des Objekts (z. B. Smart Wood) sowie dem Hindernis (z. B. Felsvorsprung, Blöcke im Gerinne, Brückenpfeiler) eine Anpralldauer. Je flexibler (weniger steif) das Objekt bzw. Hindernis ist, desto länger fällt die entsprechende Anpralldauer aus, was wiederum zu einem gedämpften Anprall mit geringeren Anprallkräften führt. Da die relativ trockenen SmartWood-Stämme sowie der vollkommen starre Felsvorsprung eine sehr hohe Steifigkeit aufweisen, wird die Anpralldauer (≈20 ms) stark reduziert. Durch diese kurze Anpralldauer resultieren höhere Anprallkräfte, was wiederum das Gefahrenpotenzial und Risiko von entstehenden Schäden durch Schwemmholzkollisionen erhöht. Die in dieser Studie gemessenen Anprallzeiten stimmen mit bisherigen Angaben, welche zwischen 10 und 40 ms betragen *(Haehnel and Daly, 2002, Spreitzer et al., 2022)*, überein. Jedoch finden sich zugleich auch Annahmen von Anprallzeiten von bis zu 1 s (1000 ms) in der Literatur wieder *(FEMA, 1995, U.S. Army Corps of Engineers, 1995)*, welche bei SmartWood zu einer deutlichen Unterschätzung der tatsächlichen Anprallkräfte führen würden. Unmittelbar nach dem Anprall folgt eine Rückprallperiode (≈50 ms), welche zudem aus mehreren in Längs- und Querrichtung wirkenden Rückprall-Schwingungen bestehen kann *(Bild 5)*.

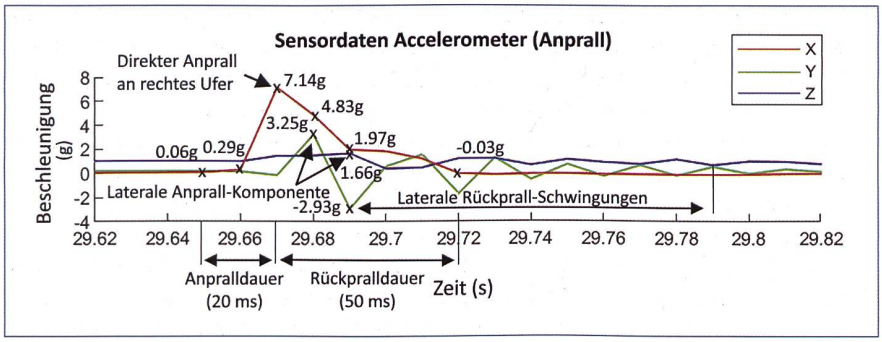

Bild 5: Detailansicht der Accelerometerdaten vom Anprall (7,14 g in Längsrichtung) eines SmartWood-Stammes an das rechte Flussufer nach einer Messzeit von rund 29 s.

4.2 SmartWood-Transport

Bild 4 verdeutlicht das Transportverhalten, mit welchem Schwemmholz (SmartWood A und B) talwärts transportiert werden kann. Zufolge der Messdaten des Gyroskops und Magnetometers kommt es immer wieder zu Rollbewegungen sowie Anzeichen für Gieren und Nicken von Smart Wood. Die Beschleunigungssensoren geben zusätzlichen Aufschluss über Interaktionen mit der Gewässersohle und dem Ufer, was auf eine grosse Rauheit oder einen geringen Wasserstand hindeutet. Wie aus der Studie von *Ruiz-Villanueva et al. (2016)* hervorgeht, kann schon eine kleine Abweichung der lokalen Strömungsverhältnisse oder der Gerinnemorphologie zu stark veränderten Schwemmholzdynamiken führen (Gegenüberstellung SmartWood *A & B in Bild 6*). Beobachtungen zufolge wurde SmartWood A mit einer Orientierung parallel zu Fliessrichtung sowie in der Mitte des Gewässers transportiert, was bereits in vorherigen Studien ebenfalls beobachtet wurde *(Braudrick and Grant, 2001)*. SmartWood B zeigt beim Eintritt in den Bildabschnitt *(Bild 6)* eine annähernd gleiche Orientierung in Bezug auf SmartWood A, entwickelte jedoch aufgrund der stark heterogenen Strömung ein vollkommen un-

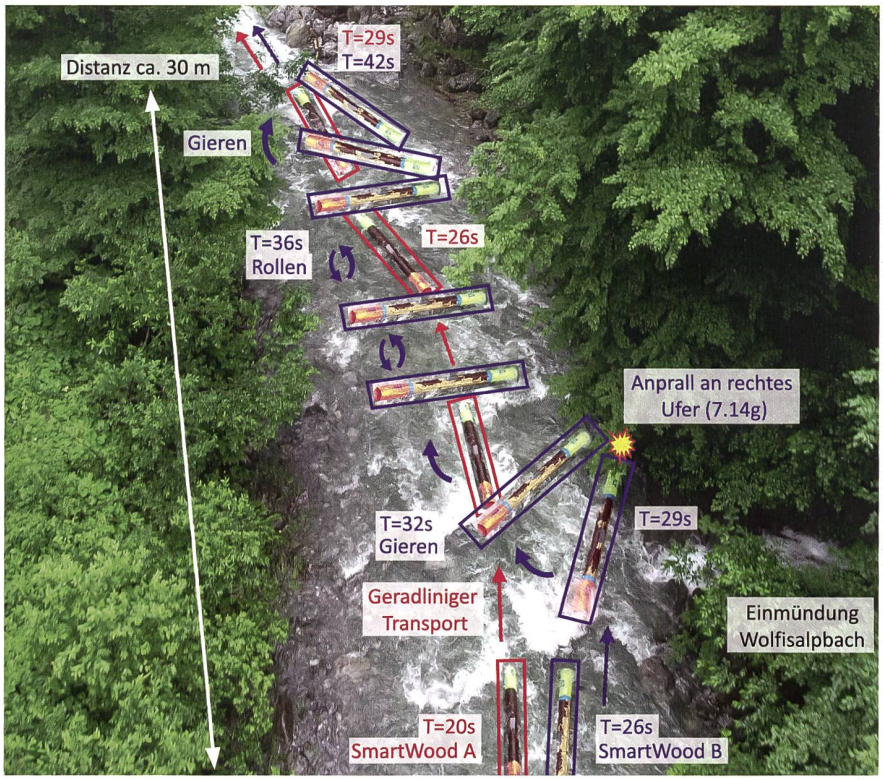

Bild 6: Vergleich von Schwemmholzdynamiken anhand von zwei SmartWood-Stämmen (A in rot & B in blau) in einem Gewässerabschnitt an der Grossen Melchaa. Die Messzeit (T) basiert auf den IMU-Daten und zeigt auf, wie sehr sowohl die Transportgeschwindigkeit als auch individuelle Bewegungsprozesse variieren können.

terschiedliches Transportverhalten entlang des eingesehenen Gewässerabschnittes. Daraus wird ersichtlich, dass selbst kleinste hydraulische und morphologische Details für die Abschätzung und Bestimmung des Schwemmholztransports in Gewässerabschnitten von Bedeutung sind.

Abweichungen des Transportpfads führten demzufolge zu einer Veränderung der Transportgeschwindigkeit. Die durchschnittliche Transportgeschwindigkeit über die eingesehene Strecke von rund 30 m *(Bild 6)* betrug für SmartWood A 3,3 $m \cdot s^{-1}$, wohingegen SmartWood B mit 1,9 $m \cdot s^{-1}$ talwärts transportiert wurde. Die ermittelten Transportgeschwindigkeiten sind trotz des rauen Gewässerabschnittes vergleichsmässig hoch und liegen deutlich über den Geschwindigkeitsangaben (0,50 bis 1,80 $m \cdot s^{-1}$), welche in Flachlandflüssen ermittelt wurden *(Ravazzolo et al., 2015)*. In umgekehrter Weise kann eine Abweichung der Transportgeschwindigkeit und die einhergehende Trägheitsänderung auch eine Kursänderung verursachen. SmartWood bietet diesbezüglich grosses Potenzial für die zusätzliche Erfassung der Trägheitsparameter, welche letztlich in Kombination mit den vorherrschenden Strömungsverhältnissen und der Gerinnemorphologie das Transportverhalten dominieren.

4.3 GPS-Positionierung

Zusätzlich zu den IMU-Daten bestimmt SmartWood bis zu fünf Mal pro Sekunde deren Position mittels der eingebauten GPS-Einheiten, welche an den gegenüberliegenden Stammseiten installiert wurden *(Bild 2)*. Die gemessenen GPS-Punkte geben dabei Aufschluss über die zurückgelegte Transportstrecke *(Bild 7a und b)*. Aufgrund der vorherrschenden Umwelteinflüsse während des SmartWood-Transports und der topografischen Gegebenheiten im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa *(Bild 7c)* sowie an der SmartWood-Teststrecke *(Bild 7d)*, beinhalten die gewonnenen Positionsdaten Ungenauigkeiten, wie in *Bild 7a und b* dargestellt. Ein zusätzlicher Offset des SmartWood GPS-Signals resultiert direkt aus den Google Satellite *(Bild 7a)* und Google Maps *(Bild 7b)* Oberflächen, was die GPS-Abweichungen in der Google Satellite Oberfläche *(Bild 7a)* noch signifikanter erscheinen lässt, jedoch nicht direkt in Verbindung mit der Qualität der SmartWood-Daten steht.

Unmittelbar nach dem Start der IMU begannen die GPS-Module mit der Datensammlung, ehe SmartWood etwas oberhalb der Brücke Hugschwendi in die Grosse Melchaa ausgesetzt wurde. Beim Transport unter der Brücke hindurch wurden bereits erste offensichtliche Reflexionen des GPS-Signals erkennbar, welche sich als Ansammlung von Punkten kurz nach der Brücke zeigen. Während SmartWood flussab transportiert wurde, sind immer wieder kürzere Signalausfälle aufgefallen. Diese Ausfälle könnten aufgrund kurzfristiger Signal-Abschattung durch die Ufervegetation aufgetreten sein. Beim Vergleich des beobachteten Bewegungsablaufs von SmartWood B in *Bild 6* mit dem Transportpfad aus GPS-Daten in *Bild 7b* ist dagegen ersichtlich, dass die relative Genauigkeit der Messungen sehr hoch ist. Dies spielt insbesondere für die Rekonstruktion der SmartWood-Orientierung als auch den zurückgelegten Transportweg aus den Daten der IMU eine bedeutende Rolle. Eine präzise Abschätzung der absoluten GPS-Genauigkeit ist zu diesem Zeitpunkt noch ausständig.

Wie aus den Rohsensordaten für Winkelgeschwindigkeit und magnetische Flussdichte hervorgeht, finden speziell in Wildbächen ununterbrochen komplexe Bewegungsdynamiken statt *(Bild 4)*. Die Genauigkeit der GPS-Messungen sowie das grundsätzliche Konzept mit zwei gegenüberliegenden GPS-Modulen, wobei sich stets ein GPS-Modul über dem Wasserspiegel befindet, könnte durch die raschen Bewegungsänderungen, insbesondere durch das kontinuierliche Rollen im Wasser, zusätzlich beeinträchtigt werden. Des Weiteren kommt es zu erheblichen Beeinträchtigungen des GPS-Signals sowohl bei Verwendung in nasser Umgebung, bei Überschattung durch Ufervegetation als auch durch Reflexionen von Bergflanken und Objekten sowie einer limitierten Anzahl an zur Verfügung stehenden Satelliten, basierend auf der vorherrschenden Topografie im Einzugsgebiet *(Bild 8)*. Für die Standortbestimmung mittels GPS wird freie Sicht auf mindestens vier Satelliten benötigt, wobei stets zumindest acht Satelliten (im Flachland) zur Verfügung stehen. Speziell in kleineren Flusssystemen und Wildbächen muss daher mit zum Teil signifikanten Abweichungen des GPS-Signals gerechnet werden, was eine manuelle Datenauswertung der GPS-Daten voraussetzt, um gegebenenfalls Ausreisser und offensichtliche Reflexionen im Signal zu eliminieren. Trotz der beschriebenen Fehlerquellen bietet SmartWood mit den zwei externen GPS-Modulen einen erheblichen Mehrwert für Schwemmholzstudien, da der Transportpfad bis auf wenige Meter genau nachvollzogen werden kann, was speziell in breiteren Flusssystemen von Vorteil ist.

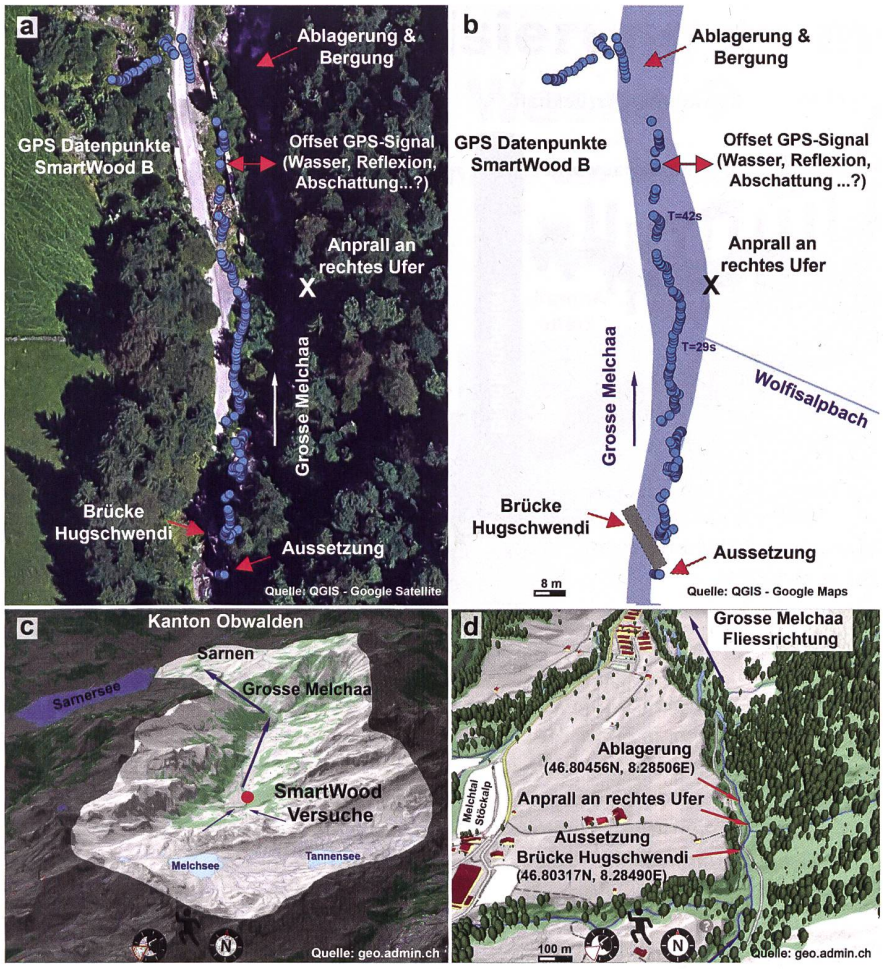

Bild 7: Gemessene GPS-Punkte von SmartWood B, welche mittels der Google Satellite Oberfläche (a), in der Google Maps Oberfläche (b), im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa im Kanton Obwalden (c) sowie an der SmartWood-Teststrecke (d) dargestellt werden.

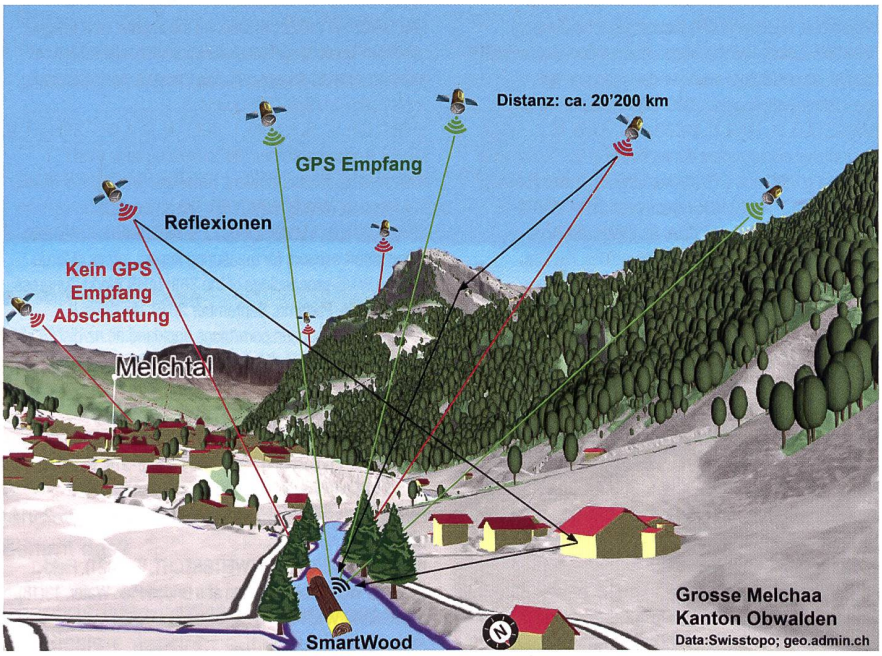

Bild 8: Illustration des GPS-Empfangs an der Grosse Melchaa im Kanton Obwalden. Steile Bergflanken, starker Uferbewuchs und eine stark limitierte Anzahl an zur Verfügung stehenden GPS-Satelliten erschweren das Sammeln von qualitativ hochwertigen GPS-Daten in topografisch komplexen Einzugsgebieten.

5. Fazit und Ausblick

Im SmartWood-Projekt der VAW wird das Bewegungsverhalten von Schwemmholz in Fliessgewässern untersucht mit dem Ziel, die individuellen Transport- und Ablagerungsprozesse genauer erfassen und bewerten zu können. Zum Einsatz kommen innovative Smart-Sensoren, welche in Holzstämme (L = 4,35 m, D = 0,33 m) eingebaut wurden, um das Messen und Quantifizieren von Schwemmholzdynamiken aus Sicht der Lagrangeschen Betrachtungsweise zu ermöglichen. Die Erfassung von neuen Daten aus dieser Betrachtungsweise (d. h. direkt im Schwemmholz), stellt einen Vorteil gegenüber bisherigen Messungen aus Sicht der Eulerschen Perspektive (vom Ufer aus) dar. Das erste Versuchsprogramm an der Grossen Melchaa (OW) hat gezeigt, dass SmartWood trotz der enormen einwirkenden Kräfte in einem Wildbachsystem qualitativ hochwertige Messdaten generiert, wobei die Zuverlässigkeit der GPS-Daten durch den dichten Uferbewuchs sowie die steile Topografie im Einzugsgebiet limitiert wurde. Während des ersten Feldversuchs an der Grossen Melchaa konnte SmartWood bereits durch die konsistente und eindeutige Nachvollziehbarkeit der Messdaten überzeugen. Die Schwemmholzforschung unterliegt hohen Anforderungen sowohl seitens der Sensortechnologie und Methodik als auch durch gegebene Rahmenbedingungen und Umwelteinflüsse während der Feldversuche, wobei mit SmartWood ein bedeutender Schritt in Richtung vollständig autonomer Erfassung von Schwemmholzdynamiken vollzogen wird.

Durch die Quantifizierung von Mobilisierungs-, Transport- und Ablagerungsprozessen kann praxisrelevanten Fragestellungen bezüglich Geschwindigkeit, Orientierung und bevorzugte Transportrouten, aber auch zu Stabilität und Dauerhaftigkeit von flussbaulichen Infrastrukturanlagen gegen Anprallkräfte durch Schwemmholz effektiver nachgegangen werden. Nach dem Einsatz von SmartWood auch an grösseren Flüssen (Limmat und Thur) sollen nun die gewonnenen SmartWood-Daten von allen individuellen Sensoren (Accelerometer, Gyroskop, Magnetometer und GPS) mittels spezieller Software miteinander verknüpft werden (sog. Sensor-Fusion), und damit besseren Aufschluss über die Orientierung von SmartWood zu jedem Zeitpunkt der Messung geben, sowie die vollständige Rekonstruktion des Transportweges ermöglichen *(Bild 9)*. Diesbezüglich wird an der VAW an der Entwicklung einer

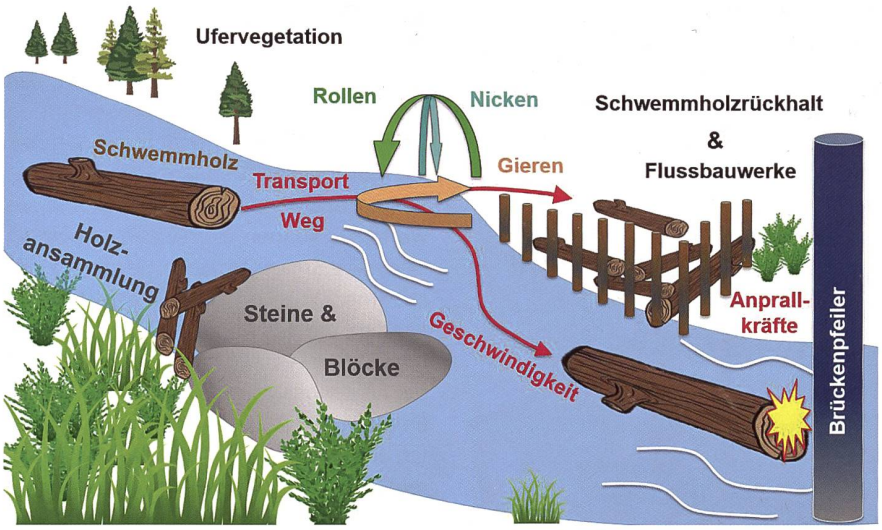

Bild 9: Messung und Rekonstruktion von Schwemmholzdynamiken in Fliessgewässern; Bild adaptiert von Spreitzer et al. (2021).

effizienten Software gearbeitet, um die gewonnenen Daten bestmöglich in praxisrelevantes Wissen zu transformieren. Untersuchungen und Analysen von Transport- und Ablagerungsprozessen können für Revitalisierungsprojekte sowie das Risikomanagement und die Gefahrenprävention im Fluss- und Wasserbau in Zukunft wichtige Zusatzinformationen geben.

6. Danksagung

Das Forschungsprojekt SmartWood_3D wurde dem Erstautor in Form eines Marie Skłodowska-Curie Individual Fellowships im Rahmen des Horizon 2020 Forschungs- und Innovationsförderprogrammes der Europäischen Kommission (Projektnummer: 885274) finanziert. Unser Dank ergeht zudem an das Bundesamt für Umwelt (BAFU) für eine Mitfinanzierung und insbesondere an *Frau Dr. Eva Gertsch-Gautschi* für die Unterstützung dieses Forschungsprojektes. Zusätzlich möchten wir unseren Dank an die Gemeinde Sarnen, insbesondere an *Herrn Sepp Berchtold* sowie an das Elektrizitätswerk Obwalden für die tolle Unterstützung und Zusammenarbeit während der SmartWood-Feldversuche an der Grossen Melchaa aussprechen. Wir schätzen die Mithilfe unserer Kollegen während der Feldversuche sowie die Arbeit unserer Techniker in der VAW-Werkstatt, um SmartWood einsatzbereit zu halten, und danken allen weiteren Beteiligten für die hervorragende Zusammenarbeit.

7. Widmung

Die Autorin und die Autoren widmen diesen Fachartikel *Prof. em. Dr. Daniel Vischer* zum 90. Geburtstag. Er war in seiner aktiven Zeit an der ETH Zürich stets interessiert an Naturgefahrenprozessen und Hochwasserschutzaspekten. Dabei spielt Schwemmholz sehr häufig eine wichtige Rolle.

Quellen:

BAFU. (2019). Schwemmholz in Fliessgewässern - Ein praxisorientiertes Forschungsprojekt. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Umwelt-Wissen, 102. doi:https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/naturgefahren/uw-umwelt-wissen/schwemmholz-fliessgewaessern.pdf.download.pdf/de_BAFU_UW-1910_Schwemmholz_8_GzD_11-12.pdf

BAFU ET AL. (2019). Hitze und Trockenheit im Sommer 2018. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Bern, Umwelt-Zustand Nr. 1909, 91. doi:https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/uz-umwelt-zustand/hitze_und_trockenheit_im_sommer_2018.pdf.download.pdf/UZ-1909-D_Hitzesommer2018.pdf

BRAUDRICK, C. A. & GRANT, G. E. (2000). When do logs move in rivers? Water Resour Res, 36(2), 571-583. doi:10.1029/1999wr900290

BRAUDRICK, C. A. & GRANT, G. E. (2001). Transport and deposition of large woody debris in streams: a flume experiment. Geomorphology, 41(4), 263-283. doi:10.1016/S0169-555x(01)00058-7

DESTATIS. (2021). Anteil von Schadholz am Gesamteinschlag auf Rekordhoch - Pressemitteilung Nr. N 050 vom 4. August 2021. Statistisches Bundesamt Deutschland, Pressemitteilung Nr. N 050. doi:https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/08/PD21_N050_41.html

FEMA. (1995). Engineering principles and practices for retrofitting flood prone residential buildings. Federal Emergency Management Agency, 259, 450. doi:https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema259_complete_rev.pdf?id=1645

GANTENBEIN, S. (2001). Verklausungsprozesse – Experimentelle Untersuchungen; Diplomarbeit an Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Sommersemester 2001, unveröffentlicht. Verweis auf VAW Mitteilungen Nr. 188 - Schwemmholz: Probleme und Lösungsansätze.

HAEHNEL, R. B. & DALY, S. F. (2002). Maximum Impact Force of Woody Debris on Floodplain Structures. US Army Corps of Engineers, 53. doi:https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA398916.pdf

LANGE, D. & BEZZOLA, G. R. (2006). Schwemmholz - Probleme und Lösungsansätze. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich, 135. doi:https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/2000-2009/188.pdf

RAVAZZOLO, D., MAO, L., PICCO, L. & LENZI, M. A. (2015). Tracking log displacement during floods in the Tagliamento River using RFID and GPS tracker devices. Geomorphology, 228, 226-233. doi:10.1016/j.geomorph.2014.09.012

RUIZ-VILLANUEVA, V., WYŻGA, B., ZAWIEJSKA, J., HAJDUKIEWICZ, M. & STOFFEL, M. (2016). Factors controlling large-wood transport in a mountain river. Geomorphology, 272, 21-31. doi:10.1016/j.geomorph.2015.04.004

SCHALKO, I. (2018). Modeling Hazards Related to Large Wood in Rivers. Ph.D. Thesis, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zurich, Zurich, Switzerland. doi:https://doi.org/10.3929/ethz-b-000293084

SCHALKO, I., SCHMOCKER, L., WEITBRECHT, V. & BOES, R. (2019). Gefahrenbeurteilung von Schwemmholzverklausungen in Flüssen: Teil 1 - Verklausungswahrscheinlichkeit. Wasser, Energie, Luft, 2019, Heft 2, 61-68.

SCHMOCKER, L. & HAGER, W. H. (2011). Probability of Drift Blockage at Bridge Decks. J. Hydraul. Eng., 137(4), 470-479. doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000319

SCHMOCKER, L. & WEITBRECHT, V. (2013). Driftwood: Risk Analysis and Engineering Measures. J. Hydraul. Eng., 139(7), 683-695. doi:10.1061/(Asce)Hy.1943-7900.0000728

SCHWAB, S., BAER, P. & SCHNEIDER, D. (2021). Räbloch - Verklausung und Räumung einer Schlucht im Emmental. Wasser, Energie, Luft, 2021, Heft 1, 31-40.

SPREITZER, G., GIBSON, J., TANG, M., TUNNICLIFFE, J. & FRIEDRICH, H. (2019a). SmartWood: Laboratory experiments for assessing the effectiveness of smart sensors for monitoring large wood movement behaviour. Catena, 182. doi:10.1016/j.catena.2019.104145

SPREITZER, G., RAVAZZOLO, D., TUNNICLIFFE, J. & FRIEDRICH, H. (2022). Measuring the impact: new insights into flood-borne large wood collisions with river structures using an isolated sensor-unit. Nat Hazards. doi:https://doi.org/10.1007/s11069-022-05354-3

SPREITZER, G., SCHALKO, I., BOES, R. M. & WEITBRECHT, V. (2021). Innovative sensors for measuring large wood movement dynamics in rivers. American Geophysical Union, Fall Meeting, New Orleans, USA, December 2021.

SPREITZER, G., TUNNICLIFFE, J. & FRIEDRICH, H. (2019b). Using smart sensors for measuring impact forces of large wood (LW). E-proceedings of the 38th IAHR World Congress, Panama City, Panama, September 2019. doi:https://cpb-ap-se2.wpmucdn.com/blogs.auckland.ac.nz/dist/7/206/files/2020/11/c059.pdf

STUCKI, A. (2021). Entlastungsstollen Thalwil - Stand und Ausblick. Wasser, Energie, Luft, Heft 3, 153-162.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. (1995). Flood-proofing regulations. Engineering Pamphlet 1165-2-314, Washington, D.C. doi:https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerPamphlets/EP_1165-2-314.pdf

WYSS, A., SCHALKO, I. & WEITBRECHT, V. (2021). Field Study on Wood Accumulation at a Bridge Pier. Water, 13(18). doi:10.3390/w13182475

Autorin und Autoren:

Gabriel Spreitzer, Isabella Schalko, Robert Boes, Volker Weitbrecht, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) ETH Zürich, Hönggerbergring 26, 8093 Zürich, www.vaw.ethz.ch, spreitzer@vaw.baug.ethz.ch