

# Schwemmholz in Fließgewässern

Ein praxisorientiertes Forschungsprojekt



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

# Schwemmholtz in Fliessgewässern

Ein praxisorientiertes Forschungsprojekt

# Impressum

## Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

## Redaktion

Nicolas Steeb (WSL) und Stéphane Losey (BAFU)

## Projektleitung

Markus Stoffel (Université de Genève), Stéphane Losey und Eva Gertsch-Gautschi (BAFU)

## Begleitgruppe

Johannes Abegg (Flussbau AG SHA), Niki Beyer-Portner (Hydrocosmos SA), André Burkard (Geoformer), Paul Dändliker (unabhängig), Urs Felder (Kanton Luzern), Eva Frick (tur GmbH), Aron Ghiringhelli (Kanton Tessin), Nils Hählen (Kanton Bern), Gabi Hunziker (Hunziker Gefahrenmanagement), Roni Hunziker (Hunziker, Zarn & Partner), Andrea Irniger (Hunziker, Zarn & Partner), Jürg Speerli (HSR Rapperswil)

## Beiträge

Berner Fachhochschule, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL (Eric Gasser, Massimiliano Schwarz): Kapitel 1.4/1.6/1.7/1.8

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL (Nicolas Steeb, Dieter Rickenmann, Alexandre Badoux, Christian Rickli): Kapitel 1.1/1.2/1.5/1.7/1.8/2.2

Université de Genève, Institut des Sciences de l'environnement ISE (Virginia Ruiz-Villanueva, Markus Stoffel): Kapitel 1.3/1.7/1.8/2.1/2.3/2.4/2.5/3.4/3.5

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich (Isabella Schalko, Volker Weitbrecht, Lukas Schmocker, Robert Boes): Kapitel 2.4/3.1/3.2/3.3/3.4/3.5/3.6

## Lektorat

Jacqueline Dougoud, Zürich

## Zitierung

BAFU (Hrsg.) 2019: Schwemmholz in Fließgewässern. Ein praxisorientiertes Forschungsprojekt. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1910: 100 S.

## Gestaltung

Cavetti AG, Marken. Digital und gedruckt, Gossau

## Titelbild

Hochwasser an der Reuss mit Schwemmholzverklausung am Wehr bei Perlen (LU) im August 2005.

© Schweizer Luftwaffe, VBS

## PDF-Download

[www.bafu.admin.ch/uw-1910-d](http://www.bafu.admin.ch/uw-1910-d)

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache verfügbar. Die Originalsprache ist Deutsch.

## Weiterführende Informationen und Datenbezug

[www.bafu.admin.ch/wasser](http://www.bafu.admin.ch/wasser)

© BAFU 2019

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                              |           |                                                                                                 |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Abstracts</b>                                                                             | <b>5</b>  | <b>Literatur</b>                                                                                | <b>79</b> |
| <b>Vorwort</b>                                                                               | <b>6</b>  | <b>Anhang 1 Symbole und Abkürzungen</b>                                                         | <b>85</b> |
| <b>Einleitung</b>                                                                            | <b>7</b>  | <b>Anhang 2 Forschungskonzept <i>WoodFlow</i></b>                                               | <b>87</b> |
| <b>1 Schwemmholtzpotenzial und -eintrag</b>                                                  | <b>12</b> | <b>Anhang 3 Übersichtstabelle der <i>WoodFlow</i>-Werkzeuge und -Ansätze</b>                    | <b>88</b> |
| 1.1 Generelles Konzept und Grundlagen der GIS-Ansätze                                        | 12        | <b>Anhang 4 Übersichtstabelle und Vergleich der verschiedenen GIS-Ansätze (Beispiel Chirel)</b> | <b>95</b> |
| 1.2 Empirischer GIS-Ansatz                                                                   | 15        | <b>Anhang 5 Feldprotokoll für die Aufnahme von Schwemmholtz</b>                                 | <b>96</b> |
| 1.3 Fuzzy-Logic GIS-Ansatz                                                                   | 17        |                                                                                                 |           |
| 1.4 Probabilistischer Ansatz: <i>SlideforMAP</i> und <i>BankforMAP</i>                       | 21        |                                                                                                 |           |
| 1.5 Empirische Schätzformeln                                                                 | 25        |                                                                                                 |           |
| 1.6 Vegetationswirkung und Bachtypisierung                                                   | 30        |                                                                                                 |           |
| 1.7 Anwendungsbeispiel Chirel (Kanton Bern)                                                  | 34        |                                                                                                 |           |
| 1.8 Empfehlungen und wichtige Anmerkungen                                                    | 40        |                                                                                                 |           |
| <b>2 Transport, Verkleinerung und Ablagerung von Schwemmholtz</b>                            | <b>46</b> |                                                                                                 |           |
| 2.1 Schwemmholtztransport                                                                    | 46        |                                                                                                 |           |
| 2.2 Verkleinerung von Schwemmholtz                                                           | 51        |                                                                                                 |           |
| 2.3 Schwemmholtzablagerung im Flussbett                                                      | 54        |                                                                                                 |           |
| 2.4 <i>Iber-Wood</i> : Numerische 2-D-Modellierung von Schwemmholtztransport und -ablagerung | 55        |                                                                                                 |           |
| 2.5 Monitoring von Schwemmholtz: Methodenüberblick                                           | 59        |                                                                                                 |           |
| <b>3 Schwemmholtzverklausung</b>                                                             | <b>66</b> |                                                                                                 |           |
| 3.1 Verklausungswahrscheinlichkeit an Brückenpfeilern                                        | 66        |                                                                                                 |           |
| 3.2 Massnahmen zur Verringerung der Verklausungswahrscheinlichkeit an Brückenpfeilern        | 69        |                                                                                                 |           |
| 3.3 Aufstau und lokaler Kolk infolge Schwemmholtzverklausung                                 | 70        |                                                                                                 |           |
| 3.4 Numerische Modellierung von Verklausungsprozessen                                        | 73        |                                                                                                 |           |
| 3.5 Teilfreibord aufgrund von Schwemmholtztransport bei Brücken                              | 74        |                                                                                                 |           |
| 3.6 Anwendungsbeispiel: Schwemmholtzverklausung an der Glatt (Zürich)                        | 76        |                                                                                                 |           |

---

# Abstracts

This publication summarises the most important practical findings from the “WoodFlow” research project. The main goal was to improve the understanding of the processes governing large wood (LW) dynamics in watercourses and to provide practitioners with suitable tools to help assess LW-related hazards. The results provide a basis for estimating potential LW quantities, modelling wood transport during flooding and describing the associated clogging processes. The approaches developed are illustrated by case studies at different spatial scales. The resulting recommendations for application can be used by specialists as a basis for silvicultural and river-engineering measures.

Die vorliegende Publikation fasst die wichtigsten praxisrelevanten Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt «WoodFlow» zusammen. Das übergeordnete Ziel war es, das Prozessverständnis der Schwemmholzdynamik in Fließgewässern zu vertiefen und der Praxis geeignete Hilfsmittel zur Verfügung zu stellen, die bei der Beurteilung schwemmholzrelevanter Gefahren helfen. Die Resultate liefern Grundlagen zur Abschätzung potentieller Schwemmholzmengen, zur Modellierung von Holztransport bei Hochwasser und zur Beschreibung der damit verbundenen Verklausungsprozesse. Die entwickelten Ansätze werden mittels Fallbeispielen auf unterschiedlichen räumlichen Skalen veranschaulicht. Die daraus abgeleiteten Anwendungsempfehlungen dienen Fachpersonen als Grundlage für wald- und flussbauliche Massnahmen.

La présente publication résume les principaux résultats du projet de recherche «WoodFlow» utiles à la pratique. Ce dernier avait pour objectif général une meilleure compréhension de la dynamique du bois flottant dans les cours d’eau ainsi que la mise à disposition d’outils adaptés à la pratique afin de faciliter l’évaluation des dangers inhérents au bois flottant. Ces résultats fournissent des bases permettant d’estimer les quantités potentielles de bois flottant, d’en modéliser le transport en cas de crue et de décrire les processus d’embâcle associés. Les approches développées sont illustrées à l’aide d’exemples de cas à différentes échelles spatiales. Les recommandations qui en découlent sont destinées à des spécialistes pour des mesures d’entretien sylvicole et d’aménagement des cours d’eau.

La presente pubblicazione riassume le principali conoscenze, rilevanti per la pratica, del progetto di ricerca «WoodFlow». L’obiettivo primario è approfondire la comprensione della dinamica del legname galleggiante nei corsi d’acqua e mettere a disposizione della pratica strumenti ausiliari adeguati per la valutazione dei pericoli relativi a tale fenomeno. I risultati forniscono basi per stimare le quantità di legname galleggiante, modellizzare il trasposto del legname in caso di piena e descrivere i processi di ostruzione connessi. Gli approcci sviluppati sono illustrati attraverso casi pratici su scale spaziali differenti. Le raccomandazioni di utilizzo che ne derivano servono da base agli specialisti per la pianificazione di misure selvicolturali e di sistemazione idrauliche.

**Keywords:**

*watercourse, flooding, flood hazards, large wood, large wood dynamics, clogging*

**Stichwörter:**

*Fließgewässer, Hochwasser, Hochwassergefahren, Schwemmholz, Schwemmholzdynamik, Verklausung*

**Mots-clés :**

*Cours d’eau, crue, dangers dus aux crues, bois flottant, dynamique du bois flottant, embâcle*

**Parole chiave:**

*corsi d’acqua, piene, pericolo di piene, legno alluvionale, dinamica del legno alluvionale, ostruzione*

---

# Vorwort

Schwemmholz hat zahlreiche positive, ökologische Wirkungen, stellt aber auch ein Risiko für Bevölkerung und Infrastruktur dar. Bei Unwettern kann das Holz an Engstellen von Gewässern zu Schäden durch Wasserstau und Ausuferungen führen. Die Ereignisanalyse zum Hochwasser 2005 verdeutlichte, dass der Schwemmholzeintrag durch forstliche Pflegemassnahmen zwar beeinflusst, aber nicht verhindert werden kann. Dieses Erkenntnis zeigt die Notwendigkeit, die Schwemmholzproblematik in der Schutzwaldpflege, in der Planung wasserbaulicher Massnahmen sowie in der Notfallplanung zu berücksichtigen. Im Umgang mit Schwemmholz gilt es, einerseits realistische Szenarien zu erarbeiten, gegen welche man geschützt sein will, und andererseits mögliche Überlastfall-Szenarien als Grundlage für die Notfallplanung zu kennen.

Um die Probleme durch Schwemmholz adäquat zu berücksichtigen, initiierte das Bundesamt für Umwelt BAFU ein Forschungsprogramm zum Thema «Schwemmholz». Das Ziel war, wissenschaftliche Grundlagen für die Bewältigung aktueller Herausforderungen beim Schwemmholz-Management an Fliessgewässern zu erarbeiten und sie im Hinblick auf die Umsetzung in die Praxis aufzubereiten.

In der vorliegenden Publikation werden die Ergebnisse der Forschungsarbeiten präsentiert. Sie richtet sich an Fachleute in den Kantonen, in den Gemeinden und aus der Privatwirtschaft, welche sich mit den forstlichen Pflegemassnahmen und mit dem Wasserbau befassen.

Wir möchten uns an dieser Stelle herzlich für die wertvolle Unterstützung aller beteiligten Forschungsinstitutionen bedanken.

Paul Steffen  
Vizedirektor  
Bundesamt für Umwelt

# Einleitung

## Schwemmholzproblematik bei Hochwasserereignissen

Bäume und Sträucher im Uferbereich von Fließgewässern haben eine stabilisierende Wirkung und tragen zur ökologischen Vielfalt bei. Holz im Bach- und Flussbett führt zu zahlreichen, kleinräumigen morphologischen Strukturen, welche eine grosse Variabilität von Abflusstiefen und -geschwindigkeiten erzeugen. Diese Strukturen bieten Tieren Schutz, Ruhezonen und Nahrungsquellen. Demgegenüber kann Frisch- und Totholz während eines Hochwassers durch Rutschungen und Erosion aus den Einhängen und dem Gerinne mobilisiert und mittransportiert werden. Grössere Ansammlungen und Ablagerungen von Schwemmholz können bei ungenügendem Abflussprofil zu Verklausungen führen, z. B. bei Brücken oder anderen Engnissen. Die Folgen sind oft Ausbrüche des Fließgewässers, Überschwemmungen und Übersarungen der angrenzenden Gebiete. Gebüsch und Holz in und an Fließgewässern bildet somit sowohl ein ökologisch wertvolles Element als auch eine Gefahr für Menschen und Sachwerte.

Ereignisanalysen der Hochwasser in den letzten Jahrzehnten haben gezeigt, dass die anfallende Schwemmholzmenge während eines Hochwassers sehr stark variieren kann. Die Spannweite reicht von wenigen Kubikmetern bis hin zu einer Schwemmholzkubatur von bis zu 25 000 Kubikmetern pro Hochwasserereignis (z. B. in der Melezza 1978 und in der Reuss oder am Thunersee 2005) (Waldner et al., 2009). Aus demselben Einzugsgebiet können mehrere Male hintereinander bei Ereignissen grosse Schwemmholzmengen mitgeführt werden, so z. B. beobachtet an der Rhone in den Jahren 1987, 1993 und 2000. Auch die Herkunft des mitgeführten Schwemmholzes kann sehr unterschiedlich sein. Der Anteil Frischholz variierte zum Beispiel bei den Hochwassern im Jahr 2005 stark, belief sich aber immer auf über 50 Prozent der gesamten Schwemmholzmenge (Waldner et al., 2009). Diese Analysen zeigen die Komplexität der vorherrschenden Mobilisierungs-, Transport- und Ablagerungsprozesse. Vorhersagen sind äusserst schwierig und mit vielen Unsicherheiten behaftet.

Schwemmholz wird im Rahmen von Gefahrenbeurteilungen an Fließgewässern berücksichtigt. Schwemmholz soll auch als fester Bestandteil in die Planung wasserbaulicher und waldbaulicher Massnahmen sowie in die Notfallplanung einbezogen werden. Eine einheitliche Methodik von der Abschätzung des Schwemmholzpotenzials über die Mobilisierung, den Transport bis hin zur Ablagerung und Beurteilung allfälliger Verklausungswahrscheinlichkeiten besteht aber bis heute nicht.

Das Bundesamt für Umwelt erkannte insbesondere nach der Ereignisanalyse 2005, dass wissenschaftlich robuste Methoden zur Abschätzung der durch Schwemmholz verursachten Gefahren noch lückenhaft sind. Nach einer ausgedehnten Auslegeordnung initiierte es deshalb das interdisziplinäre Forschungsprogramm «WoodFlow». Es wurde zwischen 2015 und 2019 durchgeführt. Beteiligt daran waren die vier Institutionen Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW, das *dendrolab.ch* der Universität Genf und die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.

Die Ziele des Forschungsprogramms waren 1. Die Erarbeitung von wissenschaftlichen Grundlagen für die Bewältigung der Herausforderungen beim Schwemmholz-Management an Fließgewässern; 2. Die Aufbereitung der o. g. wissenschaftlichen Grundlagen im Hinblick auf die Umsetzung in der Praxis. Das Programm befasste sich inhaltlich mit der Analyse der wichtigsten Prozessphänomene beim Eintrag, der Mobilisierung und dem Transport von Schwemmholz und mit der Ermittlung von Schwachstellen im Gerinne bezüglich Schwemmholz. Die Ergebnisse sollen der Optimierung des forstlichen Unterhalts entlang von Gewässern dienen und Empfehlungen für die Schutzwaldpflege, die Gefahrenbeurteilung und die Erarbeitung von Schutzkonzepten bereitstellen. Die Interdisziplinarität zwischen Ingenieurwissenschaften und Forstwissenschaften im Programm soll als Vorbild für eine integrale Auseinandersetzung mit der Problematik des Schwemmholzes in den Projekten zum Schutz vor Naturgefahren dienen.

---

In der vorliegenden Publikation sind die Forschungsergebnisse zusammenfassend aufgeführt und für die Praxis aufbereitet worden und stellen den heutigen Stand des Wissens im Themenbereich Schwemmholz in Fließgewässern dar.

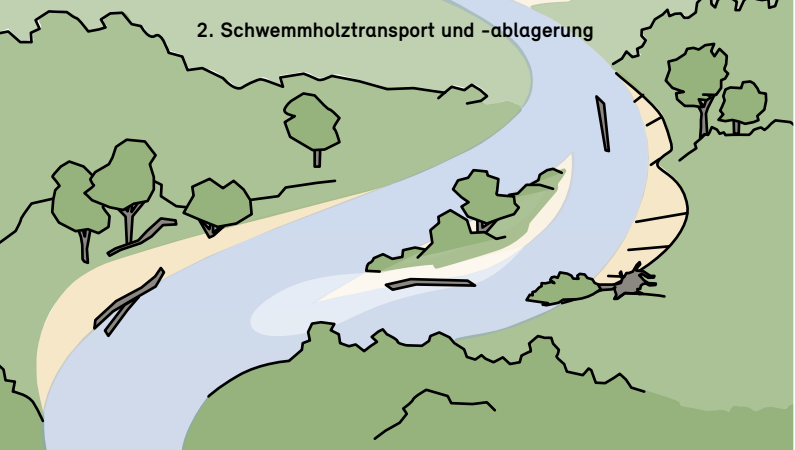
## Berichtstruktur und Methodenübersicht

Der vorliegende Synthesebericht liefert verschiedene Werkzeuge und Methoden, welche dem Anwender (z. B. Ingenieurbüros oder kantonale Ämter) bei der Abschätzung schwemmholzrelevanter Gefahren helfen. *WoodFlow* ist in drei verschiedene Kapitel gegliedert, welche die Schwemmholzdynamik in einem holistischen und interdisziplinären Rahmen mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad und in verschiedenen räumlichen Skalen bearbeiten (Abb. 1 bzw. Tab. 1).

Auf Stufe Einzugsgebiet (Kap. 1) werden die zum Holzeintrag beitragenden Flächen bestimmt, die wesentlichen Eintragsprozesse eruiert und anschliessend das Schwemmholzpotenzial bzw. die zu erwartende Schwemmholzfracht abgeschätzt. In Kap. 2 werden Schwemmholztransport und -ablagerungsprozesse sowie die Verkleinerung von mobilisierten Holzstücken auf Stufe Flussabschnitt untersucht. In Kap. 3 wird auf Stufe Querschnitt die Verklausung von Schwemmholz modelliert, um Schwachstellen im Gerinne ermitteln zu können. Abb. 56 in Anhang A2 zeigt das Zusammenspiel der im Zuge des Forschungsprojekts *WoodFlow* entwickelten Ansätze und verweist auf die jeweiligen Unterkapitel im vorliegenden Synthesebericht. Die modellierten Resultate dienen dabei jeweils als Input für darauf aufbauende Werkzeuge und Methoden.

Abb. 1: Thematischer Aufbau des vorliegenden Syntheseberichts

Überblick zu den Werkzeugen in Tab. 1.

| Skala          | Prozesse                                                                                                                            | Werkzeuge                                                                                                                                            |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Einzugsgebiet  | <p>1. Schwemmholzpotenzial und -eintrag</p>      | <p>(i) Emp. GIS-Ansatz<br/> (ii) Fuzzy-Logic GIS-Ansatz<br/> (iii) <i>Slide/BankforMAP</i><br/> (iv) Emp. Schätzformeln<br/> (v) Bachtypisierung</p> |
| Flussabschnitt | <p>2. Schwemmholztransport und -ablagerung</p>  | <p>(vi) <i>Iber-Wood</i><br/> (vii) Monitoring</p>                                                                                                   |
| Querprofil     | <p>3. Schwemmholzverkläuerung</p>               | <p>(viii) Abschätzgleichungen</p>                                                                                                                    |

## Begriffe und Definitionen

Als «Schwemmholz» wird das vom Wasser an- oder mitgeschwemmte Holz bezeichnet, das üblicherweise länger als 1 m ist und einen Durchmesser von mindestens 0.10 m hat (Wohl & Jaeger, 2009). Der Ausdruck «Schwemmholz» ist in der Schweizer Fachliteratur geläufig und wird deshalb auch in diesem Bericht gebraucht. Andere Begriffe sind: «Treibholz», «Wildholz» oder «Unholz/Schadholz». Im Englischen wird Schwemmholz als «instream wood», «large wood» oder «woody debris» bezeichnet (Ruiz-Vilanova et al., 2016c), wobei letzterer Begriff wegen negativer Konnotation nicht mehr häufig gebraucht wird. Beim Schwemmholz wird unterschieden zwischen bereits abgestorbenem Holz im Flussgerinne oder in naheliegenden Waldstücken (Totholz), frischem Holz, welches erst bei einem Hochwasserereignis in das Gerinne eingetragen wird, und verarbeitetem Wirtschaftsholz (z. B. von Holzlagern), welches bei Hochwasser mitgerissen werden kann (Lange & Bezzola, 2006). Nachfolgend werden die wichtigsten Begriffe, die im vorliegenden Bericht

verwendet werden, zusammengefasst. Ein ausführliches Glossar mit schwemmholzrelevanten Begriffen ist in den Sprachen Deutsch, Französisch, Italienisch und Englisch auf der Website [www.woodflow.ch](http://www.woodflow.ch) zu finden.

**Schwemmholz (SH):** Baum oder Teile eines Baums (inkl. Wurzelstöcke, Wurzeln, Kronen, Stämme, Äste, Zweige), die in den fluvialen Korridor (inkl. Flussauen) eingetragen werden. Normalerweise definiert als Holzstücke mit mindestens 1 m Länge und mindestens 0.10 m Durchmesser.

**Schwemmholzablagerung:** Akkumulation von SH im Gerinne oder im Gewässerraum.

**Schwemmholzdynamik:** Beschreibt im Allgemeinen die involvierten Prozesse von Eintrag, Transport und Ablagerung, welche die Bewegungsvorgänge und das Gleichgewicht von Schwemmholz definieren. Im engeren Sinn geht es um die Betrachtung der wirkenden Kräfte beim SH-Transport.

Tab. 1: Kurzübersicht der im Zuge des Forschungsprojekts *WoodFlow* entwickelten Werkzeuge und Methoden für die Praxis

Weitere Details in Anhang A3.

| Nummer | Name                     | Kapitel         | Ziel                                                                          | Bemerkungen                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--------|--------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (i)    | Empirischer GIS-Ansatz   | 1.2             | Identifizierung potenzieller SH-Eintragsflächen und Abschätzung der SH-Fracht | Räumlich explizit auf regionaler Skala                                                                                                                                                                                                                                     |
| (ii)   | Fuzzy-Logic GIS-Ansatz   | 1.3             |                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| (iii)  | <i>Slide/BankforMAP</i>  | 1.4             |                                                                               | Räumlich explizit auf kleinräumiger Skala; probabilistische Modellierung                                                                                                                                                                                                   |
| (iv)   | Empirische Schätzformeln | 1.5             | Abschätzung der SH-Fracht                                                     | Potenzfunktionen                                                                                                                                                                                                                                                           |
| (v)    | Bachtypisierung          | 1.6             | Beurteilung der Vegetationswirkung                                            | Beurteilungsmatrizen zur Ableitung waldbaulicher Massnahmen                                                                                                                                                                                                                |
| (vi)   | <i>Iber-Wood</i>         | 2.4 / 3.4       | Modellierung von SH-Transport und -Ablagerung                                 | Hydrodynamische/hydraulische numerische 2-D-Modellierung                                                                                                                                                                                                                   |
| (vii)  | Monitoring               | 2.5             | Erfassung und Abschätzung von SH-Speicher, -Mobilisierung und -Transport      | Anleitungen für: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Feldbegehungen (Protokolle)</li> <li>• Kameras (Videoüberwachung)</li> <li>• Fernerkundung (Luftbilder und Drohnen)</li> </ul>                                                                                   |
| (viii) | Abschätzgleichungen      | 3.1 / 3.3 / 3.5 | Quantifizierung von Verklauungsprozessen und deren Auswirkungen an Bauwerken  | Modellversuche zur Abschätzung von: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verklauungswahrscheinlichkeit</li> <li>• Aufstau</li> <li>• Lokale Kolkbildung</li> </ul><br>Entscheidungsbaum zur Ermittlung des Teilfreibords aufgrund von Schwemmholztransport bei Brücken |

---

**Schwemmholzeintrag:** Prozesse, welche SH in das Gerinne liefern, z. B. Seitenerosion, Rutschungen, Hangmuren, Murgänge, Lawinen, Windwurf, fluvialer Transport oder natürliches Baumsterben.

**Schwemmholzfracht:** SH-Menge (Volumen oder Masse) in einem bestimmten Einzugsgebiet oder Abschnitt, welche während eines Hochwasserereignisses vom Fließgewässer effektiv transportiert wird.

**Schwemmholzpotenzial:** Gesamtmenge an verfügbarem SH (Volumen oder Masse) in einem bestimmten Einzugsgebiet oder Abschnitt, welche während eines Ereignisses bestimmter Intensität potenziell in das Gerinne eingetragen und mobilisiert werden kann.

**Schwemmholzteppich:** Grosse Ansammlung von transportiertem SH, die das aktive Gerinne ganz überdeckt und in der Länge die durchschnittliche Gerinnebreite um ein Vielfaches übersteigt (Kap. 2.1.1).

**Verklausung:** Ablagerung von SH-Stücken verschiedener Grösse, an einem gegebenen Punkt im Gerinne, was zu einer Verringerung des Querschnitts führt. Meistens wird implizit angenommen, dass dabei die ganze Gerinnebreite betroffen ist (komplette Verklausung bzw. Blockierung des Gerinnes).

Im Anhang ist zur Übersicht eine Symbolliste mit allen im Synthesebericht verwendeten Kürzeln und Variablen aufgelistet.

# 1 Schwemmholzpotenzial und -eintrag

Im ersten Kapitel werden verschiedene Methoden vorgestellt, die das Schwemmholzpotenzial in einem Einzugsgebiet und die bei einem Hochwasserereignis zu erwartende Schwemmholzfracht abschätzen. Um die Vergleichbarkeit der Modellierungsansätze zu gewährleisten, wird die Schwemmholzmenge dabei stets in Festmetern ( $m^3$ ) angegeben. Neben zwei verschiedenen GIS-Ansätzen (empirisch vs. Fuzzy-Logic) beinhaltet dieses Kapitel auch einen probabilistischen/numerischen Ansatz sowie verschiedene empirische Schätzformeln. Des Weiteren wird eine Typisierung von Bachabschnitten unter Berücksichtigung der Vegetationswirkung vorgeschlagen, die als vereinfachtes Beurteilungsverfahren für potenzielle Eintragsprozesse sowie zur Abschätzung der Vegetationseinwirkung dient. In Kap. 1.1 werden als Erstes die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden GIS-Ansätze erläutert, da diese zwar auf derselben Datengrundlage aufgebaut sind, sich jedoch in der Prozessmodellierung und in der Abschätzung der Schwemmholzfracht unterscheiden. Anhand eines Anwendungsbeispiels im Einzugsgebiet des Chirel (Kanton Bern) werden die verschiedenen Werkzeuge schliesslich verglichen (Kap. 1.7) und praktische Anwendungsempfehlungen (Kap. 1.8) dazu abgeleitet.

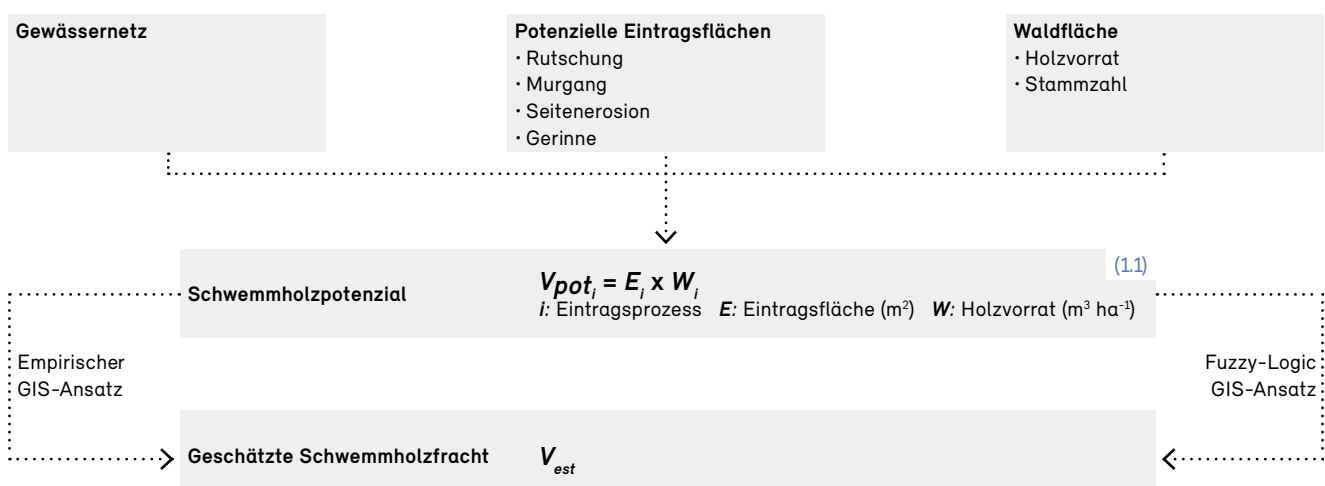
## 1.1 Generelles Konzept und Grundlagen der GIS-Ansätze

### 1.1.1 Konzept

Nachfolgend werden zwei GIS-Ansätze vorgestellt, welche das Schwemmholzpotenzial  $V_{pot}$  eines Einzugsgebiets räumlich explizit mithilfe von Geographischen Informationssystemen (GIS) modellieren. Vereinfacht gesagt geschieht dies mit der Verschneidung verschiedener Prozessflächen (potenzieller SH-Eintrag) mit der Waldfläche (Holzvorrat) und dem Gewässernetz (Abb. 2; Gl. (1.1)). Der Fokus liegt auf dem Eintrag bzw. der Mobilisierung von Schwemmholz während eines Hochwassers. Holz, das in

der Zeit vor einem Hochwasserereignis z. B. durch Windwurf, Schneedruck und Lawinen in das Gerinne gelangt, ist mit dem Anteil «Gerinneholz» implizit berücksichtigt. In einem zweiten Modellierungsschritt wird aus dem Schwemmholzpotenzial die entsprechende Schwemmholzfracht  $V_{est}$  aus einem Einzugsgebiet abgeschätzt (Abb. 2). In Lange & Bezzola (2006) wird in diesem Zusammenhang von «effektiver Schwemmholzmenge» gesprochen. Diese beschreibt ebenso eine geschätzte Schwemmholzfracht (genannt  $V_{est}$  in Kap. 1.1 bis 1.4, bzw.  $V_{reg}$  in Kap. 1.5) und darf nicht mit der tatsächlich beobachteten Schwemmholzfracht  $V_{obs}$  verwechselt werden.

Abb. 2: Schematische Darstellung für die Berechnung des Schwemmholzpotenzials



Während die Datengrundlage bei beiden GIS-Ansätzen gleich ist, unterscheiden sie sich sowohl bei der Modellierung des Schwemmholzpotenzials als auch bei der Abschätzung der Schwemmholzfracht (Kap. 1.2 & 1.3). Beim empirischen GIS-Ansatz (EGA) kommen sogenannte Abminderungsfaktoren zum Einsatz; demgegenüber verwendet der Fuzzy-Logic GIS-Ansatz (FGA) verschiedene Entscheidungsmatrizen zur Abschätzung der Schwemmholzfracht.

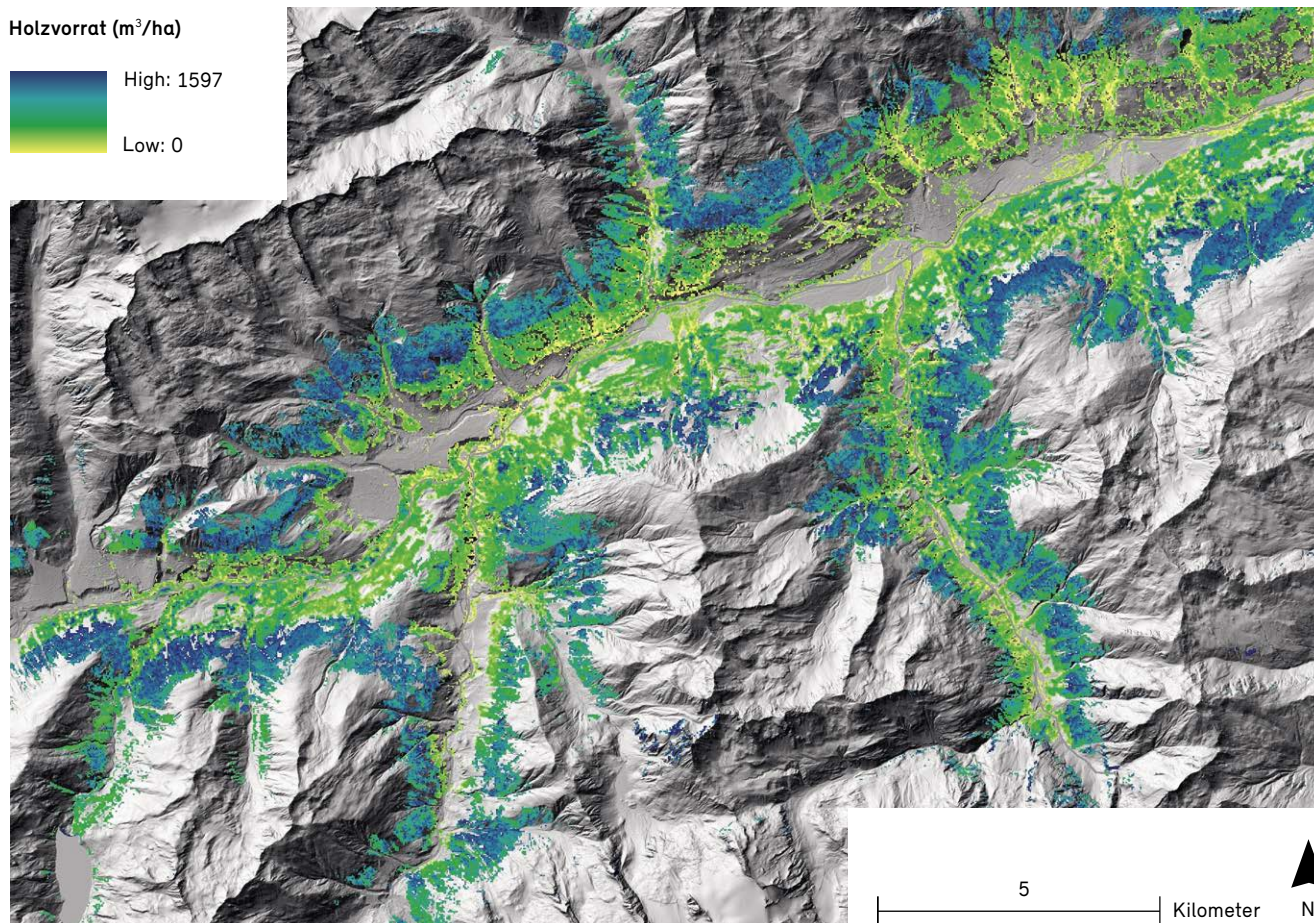
### 1.1.2 Datengrundlage

Um eine regionale Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, werden als Input für die beiden GIS-Ansätze schweizweit einheitliche Geodaten verwendet (Vector25 bzw. swissTLM3D ©swisstopo, swissALTI3D ©swisstopo, SilvaProtect-CH ©BAFU, Ökomorphologie Stufe F ©BAFU, CH-FLOZ ©BAFU, Landesforstinventar

LFI ©WSL). Konkret werden für die Anwendung der beiden GIS-Ansätze folgende Inputdaten benötigt:

- Shapefile des zu untersuchenden **Einzugsgebiets**: Dieses muss durch den Anwender selbst definiert werden. Eine einfache und schnelle Methode zur Extraktion des Untersuchungsgebiets liefert das BAFU-Produkt «Einzugsgebietsgliederung der Schweiz» (EZGG-CH), welches online direkt angewendet werden kann (<https://s.geo.admin.ch/7dc770a41e>). Hierzu muss man lediglich auf den gewünschten Fließgewässerabschnitt klicken, und die Dateien des entsprechenden (Teil-)Einzugsgebiets stehen zum Download bereit.
- Digitales **Terrainmodell** der Schweiz (swissALTI3D von swisstopo [Auflösung 2 × 2 m]).
- Shapefile des **Gewässernetzes** der Schweiz: Dieses wurde für die GIS-Anwendung spezifisch bearbeitet,

Abb. 3: Ausschnitt aus der Holzvorratskarte (VHMV) im Einzugsgebiet des Rheins bei Disentis/Mustér (Kanton Graubünden)



Hintergrundbild: Reliefkarte, swisstopo

- d.h. mit ökomorphologischen Kriterien (u. a. Gewässerbreite) und Flussordnungszahl verlinkt.
- Shapefile der Schweizer **Waldfläche** (Silva\_V25) aus dem SilvaProtect-CH Datensatz.
  - Shapefile der Schweizer **Forstkreise** inklusive Daten aus dem Landesforstinventar LFI (WSL, 2016).
  - Karte des **Holzvorrats** in Schweizer Wäldern (VHMV): Auf Grundlage des Vegetationshöhenmodells der Schweiz (Ginzler & Hobi, 2016) sowie von Daten des Schweizerischen Landesforstinventars LFI (WSL, 2016) wurde eine flächendeckende Rasterkarte (25 × 25 m) mit Angaben zum Holzvorrat (m<sup>3</sup>/ha) in Schweizer Wäldern erarbeitet (Ginzler et al., 2019; Abb. 3). In beiden GIS-Ansätzen dient die Holzvorratskarte als Input für die Waldfläche. Angewendet auf die modellierten potenziellen Eintragsflächen wird daraus das Schwemmholzpотенzial berechnet.
  - Modellierung der **Eintragsprozesse**: Für die beiden GIS-Ansätze werden die während eines Hochwassers dominanten Schwemmholz-Eintragsprozesse in das Gerinne berücksichtigt, namentlich Rutschungen, Murgänge aus steilen Zubringern, Seitenerosion sowie die Mobilisierung von bereits im Gerinne vorhandenem Totholz (Abb. 4). Die dafür verwendeten Daten bestehen aus Shapefiles der Hangmuren-Trajektorien (EV\_HM) und Murgang-Trajektorien (EV\_Mur) von Silva-

Protect-CH (Losey & Wehrli, 2013), die als Grundlage für die Ausscheidung der potenziellen Eintragsflächen dienen. Die entsprechenden Shapefiles können beim BAFU bezogen werden. Für die Modellierung der Seitenerosion bzw. der Rückgriffweite dient hauptsächlich die Gerinnebreite des Gewässernetzes (Ökomorphologie Stufe F). Für die Abschätzung des Totholzpотенzials im Gerinne wurden die empirischen Resultate aus Kap. 2.3 verwendet.

Die beiden GIS-Ansätze sind als Werkzeuge (.tbx File und/oder Python-Skript) auf der Website [www.woodflow.ch](http://www.woodflow.ch) zum Download verfügbar, zusammen mit einem detaillierten Anwendungsmanual und dem Hinweis, wo die benötigten Geodaten erhältlich sind. Für eine detaillierte Beschreibung der Datengrundlage und Methodik siehe Steeb et al. (2019a) und Ruiz-Villanueva & Stoffel (2018).

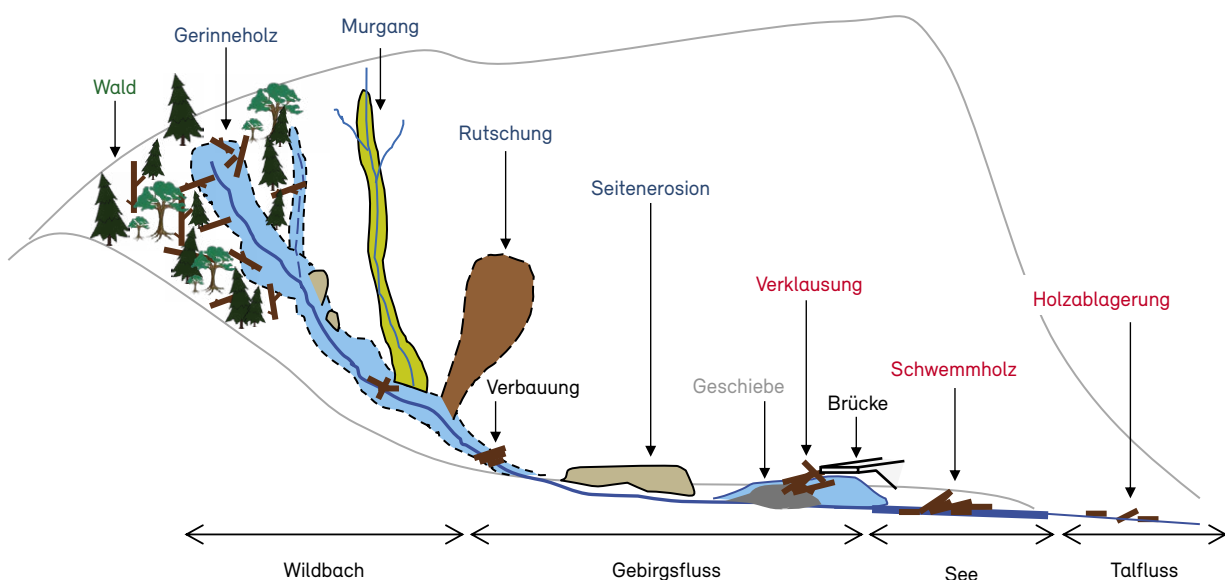
### 1.1.3 Szenarien

Beide GIS-Ansätze (Kap. 1.2 & 1.3) sowie der probabilistische Ansatz (Kap. 1.4) zur Abschätzung der Schwemmholzmenge rechnen für ein Einzugsgebiet jeweils drei verschiedene Szenarien, die sich nach der Eintretenswahrscheinlichkeit bzw. Wiederkehrperiode der involvierten Prozesse orientieren:

$$SH_{\llbracket 30 \rrbracket} \mid SH_{100} \mid SH_{\llbracket 300 \rrbracket}$$

Abb. 4: Schematische Darstellung der Schwemmholzeintrags- und -ablagerungsprozesse

Adaptiert aus Waldner et al., 2009.



Die meisten der umfangreich dokumentierten Schwemmholzereignisse (Kap. 1.5) hatten bezüglich Niederschlag und/oder Abfluss eine Wiederkehrperiode von 50 bis 150 Jahren, was durch das Szenario SH<sub>100</sub> beschrieben wird. Die anderen beiden Szenarien nennen die ungefähre Wiederkehrperiode in Anführungszeichen, da sie gutachterlich mit Ad-hoc-Faktoren bestimmt wurden, weil sie aufgrund fehlender Daten nicht genauer quantifiziert werden konnten.

Beim EGA werden für die drei Szenarien jeweils unterschiedliche Pufferbreiten bezüglich der potenziell beitragenden Flächen sowie verschiedene Abminderungsfaktoren angenommen (genaue Beschreibung der Methodik in Steeb et al., 2019a). Beim FGA werden die potenziellen Eintragsflächen für jedes Szenario als Rasterkarten mit Möglichkeitswerten zwischen 0 und 1 dargestellt. Beim probabilistischen Ansatz werden für jedes Szenario entsprechende Niederschlags- (*SlideforMAP*) bzw. Abflussmengen (*BankforMAP*) geschätzt und als Input für die numerische Modellierung der Eintragsprozesse genommen.

## 1.2 Empirischer GIS-Ansatz

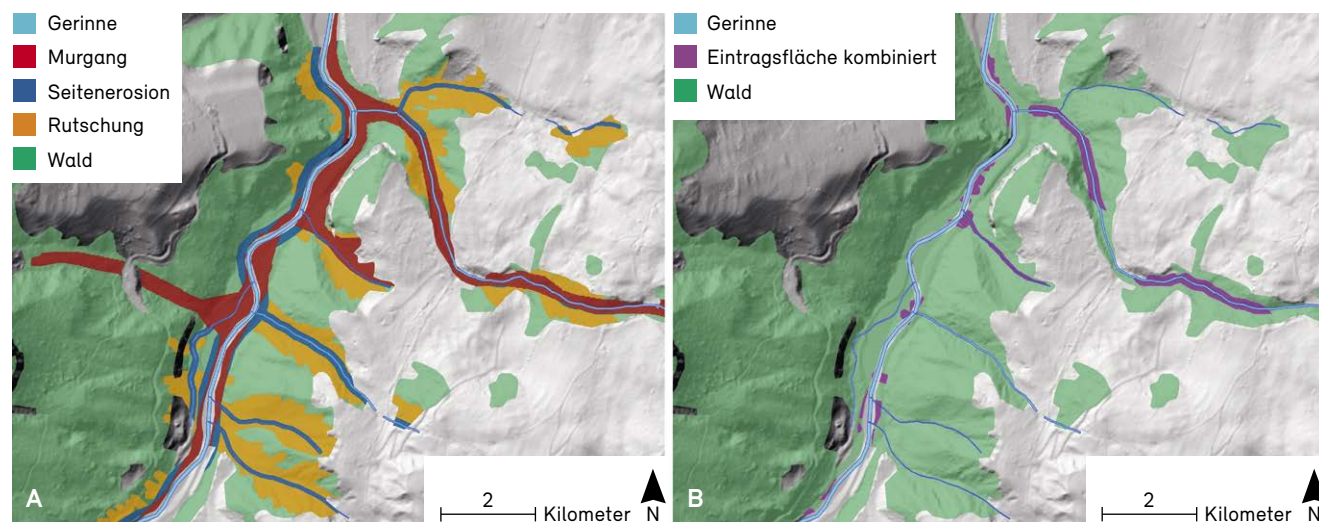
### 1.2.1 Schwemmholzpotenzial

Nach Eingabe der Inputdaten berechnet das GIS-Modell automatisch das Schwemmholzpotenzial im gewählten Einzugsgebiet aus. Neben den potenziellen Waldverlustflächen der einzelnen Eintragsprozesse (Abb. 5a), extrahiert das GIS-Modell auch die überlappenden Flächen der Eintragsprozesse ausserhalb des Gerinnebettes (Seitenerosion, Rutschung, Murgang; Abb. 5b). Diese kombinierte potenzielle Eintragsfläche weist ein minimal zu erwartendes Schwemmholzpotenzial auf bzw. definiert die Potenzialflächen mit der grössten Mobilisierungswahrscheinlichkeit. Um aus Sicht von Forst- bzw. Gewässerunterhalt das Schwemmholzaufkommen zu reduzieren, besteht bei diesen Flächen somit der grösste Handlungsbedarf.

Als weiteres Resultat liefert das GIS-Modell eine Output-Tabelle, die für jeden Eintragsprozess und für alle drei Szenarien sowohl die potenzielle bewaldete Eintragsfläche als auch die potenzielle Schwemmholzmenge in Festmetern (m<sup>3</sup>) quantifiziert (Tab. 2). Zusätzlich kann das Schwemmholzpotenzial in Totholz- und Frischholzvolumen unterteilt sowie die Anzahl der mobilisierten Baumstämme innerhalb der betroffenen Waldfläche abgeschätzt werden.

**Abb. 5: Ausschnitt der GIS-Modellierung im Einzugsgebiet der Chiene (Kanton Bern)**

Als Output werden einerseits (A) Waldverlustflächen nach Eintragsprozess und andererseits (B) sich überschneidende Prozessflächen ausgeschieden.



Hintergrundbild: Reliefkarte, swisstopo

Wie in Tab. 2 ersichtlich, dominiert bezüglich potenzieller Eintragsfläche im Allgemeinen der Prozess Rutschung. Dies weil die zugrunde liegenden Hangmuren-Trajektorien aus SilvaProtect-CH ohne Berücksichtigung der Waldwirkung modelliert wurden und die entsprechenden Eintragsflächen deshalb zur Überschätzung tendieren. Die für den EGA vorgeschlagenen Abminderungsfaktoren gleichen diesen Effekt jedoch wieder aus, sodass die Anteile der verschiedenen Eintragsprozesse an der geschätzten Schwemmholzfracht schliesslich ausgeglichener sind.

### 1.2.2 Schwemmholzfracht

Vom resultierenden Schwemmholzpotenzial  $V_{pot}$  wird in einem weiteren Schritt die zu erwartende Schwemmholzfracht  $V_{est}$  abgeschätzt (Gl. (1.2)), da nicht das ganze potenziell verfügbare Holz bei einem Hochwasser in das Gewässer gelangt und transportiert wird (Abb. 2). Hier kommt den so genannten Abminderungsfaktoren  $f_{abm}$  eine wichtige Rolle zu, die je nach Eintragsprozess  $i$  und Szenario unterschiedliche Werte annehmen (Tab. 3):

$$V_{est} = \sum_i^n V_{pot_i} \cdot f_{abm_i} \quad (1.2)$$

Die Abminderungsfaktoren wurden durch einen Vergleich des Schwemmholzpotenzials mit den bei früheren Hochwassern effektiv transportierten Schwemmholzmengen  $V_{obs}$  empirisch eruiert, wobei auch Angaben aus anderen

Studien und Modellen berücksichtigt wurden (Steeb et al., 2019a). Die geschätzten Schwemmholzfrachten und Eintragsflächen liegen schliesslich in der gleichen Grössenordnung wie die beobachteten Werte aus vergangenen Hochwasserereignissen (Abb. 6). Über 34 Testeinzugsgebiete gemittelt, entspricht  $V_{est}$  noch rund 2 % von  $V_{pot}$  beim Szenario SH<sub>«30»</sub>, rund 8 % beim Szenario SH<sub>100</sub> sowie rund 19 % beim Szenario SH<sub>«300»</sub>. Dies entspricht dem Anteil des Schwemmholzpotenzials, das bei einem Ereignis gemäss GIS-Ansatz mobilisiert wird.

Im Vergleich zur Jährlichkeit des Ereignisses führen die mithilfe des GIS-Modells und der gewählten Abminderungsfaktoren berechneten Schwemmholzfrachten tendenziell eher zu einer Überschätzung der Holzmenge (vgl. Abb. 8B). Aus Sicht der Gefahrenprävention entspricht dies einer konservativen Schätzung. Der EGA wurde auf insgesamt 34 Testgebiete angewendet, für welche auch beobachtete Schwemmholzfrachten  $V_{obs}$  zur Verfügung standen. Im Allgemeinen zeigt der EGA für kleine bis mittlere Einzugsgebiete (5 – 200 km<sup>2</sup>) die besten Resultate. Bei kleineren Einzugsgebieten (<5 km<sup>2</sup>) können sporadische Eintragsprozesse wie Rutschungen oder Murgänge dominieren, sodass die Schwemmholzmengen durch das Modell unterschätzt werden ( $V_{obs} > V_{est}$ ). Bei grösseren Einzugsgebieten (>200 km<sup>2</sup>) ist das berechnete Schwemmholzpotenzial  $V_{pot}$  hingegen sehr gross (Verhältnis  $V_{obs}/V_{pot}$  ist kleiner als die Bandbreite der Abminderungsfaktoren  $f_{abm}$  in Abb. 7). Hier ist während eines

Tab. 2: Output des GIS-Modells am Beispiel des Einzugsgebiets der Grossen Melchaa (Kanton Obwalden)

Je Eintragsprozess bzw. Szenario werden die potenzielle bewaldete Eintragsfläche und die potenzielle Schwemmholzmenge in Festmetern quantifiziert. Zusätzlich wird das gesamte Schwemmholzpotenzial ( $V_{pot}$ ) sowie das kombinierte, d. h. sich überlappende Schwemmholzpotenzial ( $V_{kombi}$ ) zusammengefasst.

|               | SH <sub>«30»</sub>              |                                                | SH <sub>100</sub>               |                                                | SH <sub>«300»</sub>             |                                                |
|---------------|---------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------|
|               | Potenzielle Eintragsfläche (ha) | Potenzielle Schwemmholzmenge (m <sup>3</sup> ) | Potenzielle Eintragsfläche (ha) | Potenzielle Schwemmholzmenge (m <sup>3</sup> ) | Potenzielle Eintragsfläche (ha) | Potenzielle Schwemmholzmenge (m <sup>3</sup> ) |
| Gerinneholz   | 28.5                            | 2 197                                          | 28.5                            | 2 197                                          | 28.5                            | 2 197                                          |
| Seitenerosion | 18.7                            | 4 659                                          | 62.7                            | 18 567                                         | 91.4                            | 28 550                                         |
| Rutschung     | 141.5                           | 49 574                                         | 152.9                           | 54 919                                         | 151.3                           | 55 197                                         |
| Murgang       | 69.4                            | 18 052                                         | 97.7                            | 26 218                                         | 124.8                           | 34 423                                         |
| $V_{pot}$     | 258.0                           | 74 483                                         | 341.7                           | 101 901                                        | 396.0                           | 120 367                                        |
| $V_{kombi}$   | 10.1                            | 2 724                                          | 30.0                            | 8 270                                          | 47.0                            | 13 116                                         |

Unwetters aber meist nur ein Teil des Gebiets betroffen und entsprechend geomorphologisch aktiv. In diesem Fall sind die in Tab. 3 aufgeführten Abminderungsfaktoren tendenziell zu gross, sodass die Schwemmholzfracht generell überschätzt wird ( $V_{est} > V_{obs}$ ). Für den in Kap. 1.7 folgenden Vergleich mit dem FGA zeigt Abb. 8 für eine Auswahl an Untersuchungsgebieten die geschätzten Schwemmholzfrachten des EGA (analog zu Abb. 10).

### 1.3 Fuzzy-Logic GIS-Ansatz

Ein alternativer Ansatz für die Ermittlung von Eintragsflächen von Schwemmholz und die Abschätzung des Schwemmholzvolumens in einem bestimmten Gebiet basiert auf GIS und Prinzipien der Fuzzy-Logic. Diese

**Tab. 3: Abminderungsfaktoren der geschätzten Schwemmholzfracht**  
Überblick zu den verwendeten Abminderungsfaktoren  $f_{abm}$ , um multipliziert mit dem Schwemmholzpotenzial  $V_{pot}$  eines Einzugsgebiets auf die geschätzte Schwemmholzfracht  $V_{est}$  zu schliessen.

| $f_{abm}$     | SH <sub>«30»</sub> | SH <sub>100</sub> | SH <sub>«300»</sub> |
|---------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| Gerinneholz   | 0.1                | 0.3               | 0.7                 |
| Seitenerosion | 0.05               | 0.1               | 0.2                 |
| Rutschungen   | 0.01               | 0.05              | 0.1                 |
| Murgang       | 0.05               | 0.1               | 0.3                 |

Methode wurde von Ruiz-Villanueva et al. (2014a) entwickelt. Die Fuzzy-Set-Theorie ist ein sehr flexibler Ansatz und erlaubt daher eine einfache Anpassung und Verwendung bei einer Vielzahl von Problemen (Mazzorana und Fuchs, 2010).

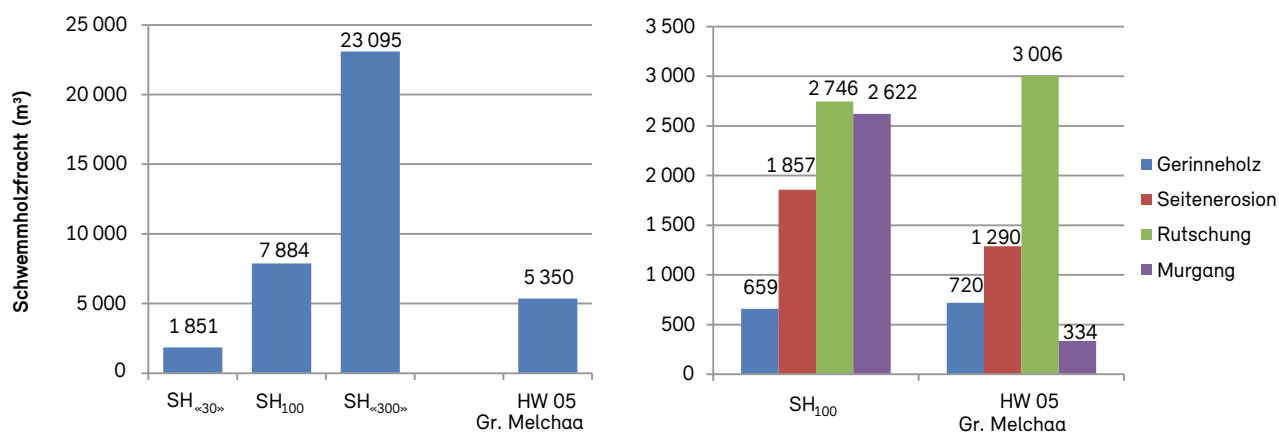
Der hier verwendete Ansatz ist in folgende Schritte unterteilt:

- Geländeanalyse zur Ermittlung der potenziellen Eintragsflächen durch Ufererosion, Rutsch- und Murgangprozesse
- Analyse der Waldbedeckung und Vegetationsdichte
- Ermittlung des potenziellen und geschätzten Schwemmholzvolumens für verschiedene Szenarien

Wie in Kap. 1.1.3 beschrieben, wurden drei Szenarien unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit und Intensität berücksichtigt. Die Szenarien stehen für ein häufiges, ein seltenes und ein sehr seltenes Ereignis (SH<sub>«30»</sub>, SH<sub>100</sub>, SH<sub>«300»</sub>). Die von den Eintragsprozessen betroffenen Flächen wurden mit verschiedenen Ansätzen modelliert. Für die Rutsch- und Murgangprozesse wurden die betroffenen Gebiete basierend auf den Trajektorien des SilvaProtect-CH Datensatzes definiert. Da die SilvaProtect-Daten keine Intensitäten ausweisen, wurden diese aus der Dichte der Linien, basierend auf Klassengrenzen nach Jenks (natural breaks), abgeleitet. Je dichter die Trajektorien,

**Abb. 6: Vergleich von geschätzten und beobachteten Schwemmholzfrachten am Beispiel der Grossen Melchaa (Kanton Obwalden)**

Geschätzte Schwemmholzfrachten  $V_{est}$  je nach Szenario (links) und Vergleich mit den nach dem Hochwasser 2005 dokumentierten Schwemmholzmengen  $V_{obs}$  je nach Eintragsprozess (Abflussmenge damals ca. 100-jährlich) am Beispiel der Grossen Melchaa ( $E = 76 \text{ km}^2$ , rechts).



desto höher die entsprechende Intensität. Da die folgende Analyse rasterbasiert ist, müssen die Linien in Pixelflächen umgewandelt werden. Nebst der Intensität der Eintragsprozesse spielt für die Rekrutierung von Schwemmholz auch die Konnektivität der betroffenen Eintragsflächen zum Gewässernetz eine wichtige Rolle. So gelten Flächen, die sich in einer Entfernung von mehr als 100 m vom Gerinne befinden und/oder eine Hangneigung von  $<40^\circ$  aufweisen, als nicht verbunden und werden ausgeschlossen (Abb. 9).

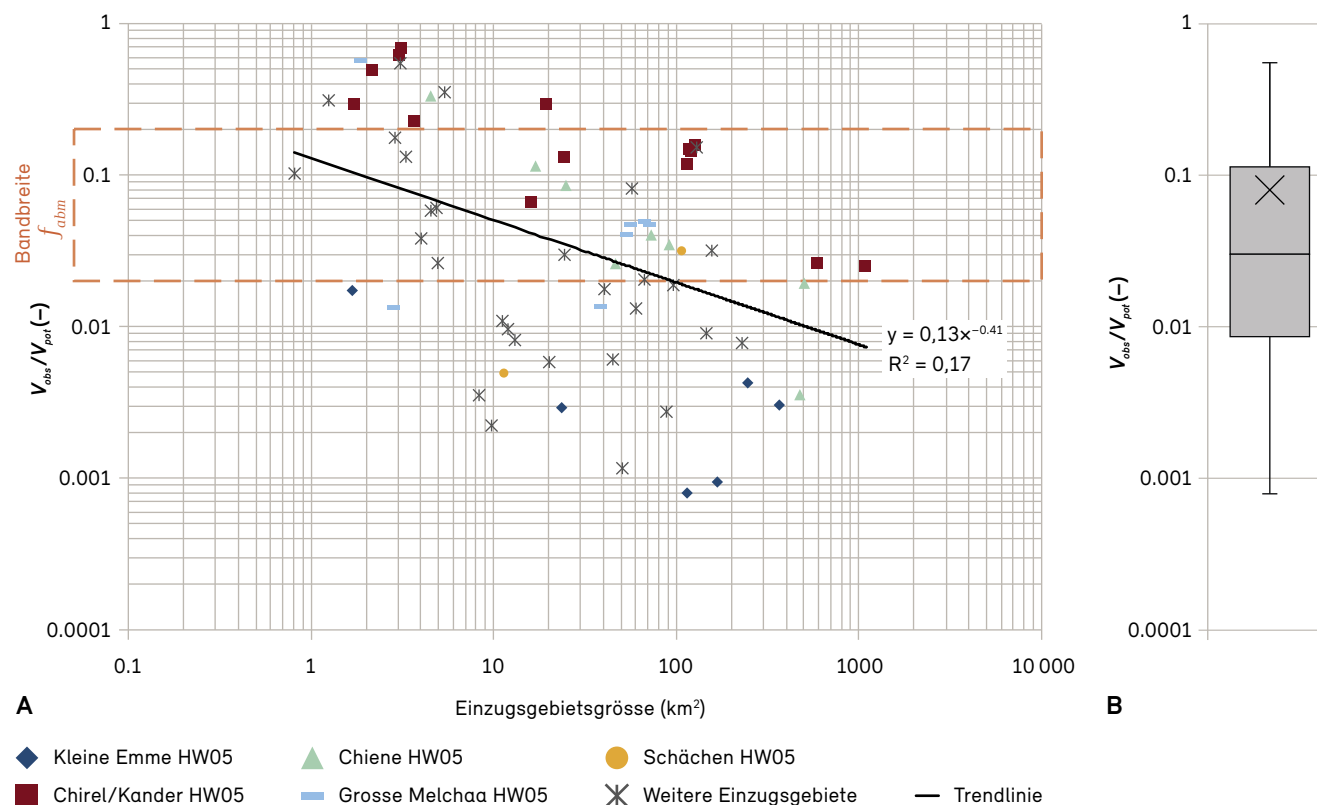
Da SilvaProtect-CH den Prozess der Seitenerosion nicht abbildet, wurde ein eigenes Modell zur Ermittlung der potenziell von Seitenerosion betroffenen Flächen entwickelt. Das Modell berücksichtigt die Sinuosität des Gerinnes, die Gerinneneigung als Annäherung für die Transportkapazität und einen Breitenverhältniswert, der den Quotienten der bestehenden Gerinnebreite zur mög-

lichen durch Seitenerosion im Hochwasserfall aufgeweiteten Gerinnebreite beschreibt. Für die Berechnung des Breitenverhältniswertes wurde eine europäische Datenbank mit Hochwasserereignissen an mehreren Flüssen in der Schweiz und sechs weiteren Ländern analysiert (Ruiz-Villanueva et al., 2019a). Es wurden drei Kategorien basierend auf dem ersten und dritten Quartil sowie dem Median definiert, wobei verschiedene Gerinnebreitenklassen berücksichtigt wurden. Für die Zuweisung des Breitenverhältniswertes zu den einzelnen Fließgewässern wurden die Angaben der Sohlenbreite aus den bestehenden Ökomorphologie-Daten des BAFU verwendet.

Die Eintragsflächen, die von den Prozessen Rutschung, Murgang und Seitenerosion betroffen sind, werden durch den Fuzzy-Logic Ansatz klassiert. Als Resultat erhält man für jedes Szenario ein Raster mit Möglichkeitswerten zwischen 0 und 1. Überlappungsflächen der verschiedenen

**Abb. 7: Anwendung des empirischen GIS-Modells auf insgesamt 34 Testgebiete**

Für gewisse Testgebiete konnten auch Daten bezogen auf Teileinzugsgebietsflächen verwendet werden (Ereignisanalyse Hochwasser 2005). (A) Es zeigt sich die Tendenz, dass das Verhältnis von beobachteter zu potenzieller Schwemmholzfracht,  $V_{obs}/V_{pot}$ , mit zunehmender Einzugsgebietsgrösse im Durchschnitt abnimmt. (B) Ein Boxplot illustriert die Verteilung der Werte  $V_{obs}/V_{pot}$  für alle Testgebiete ( $x$  = Mittelwert).



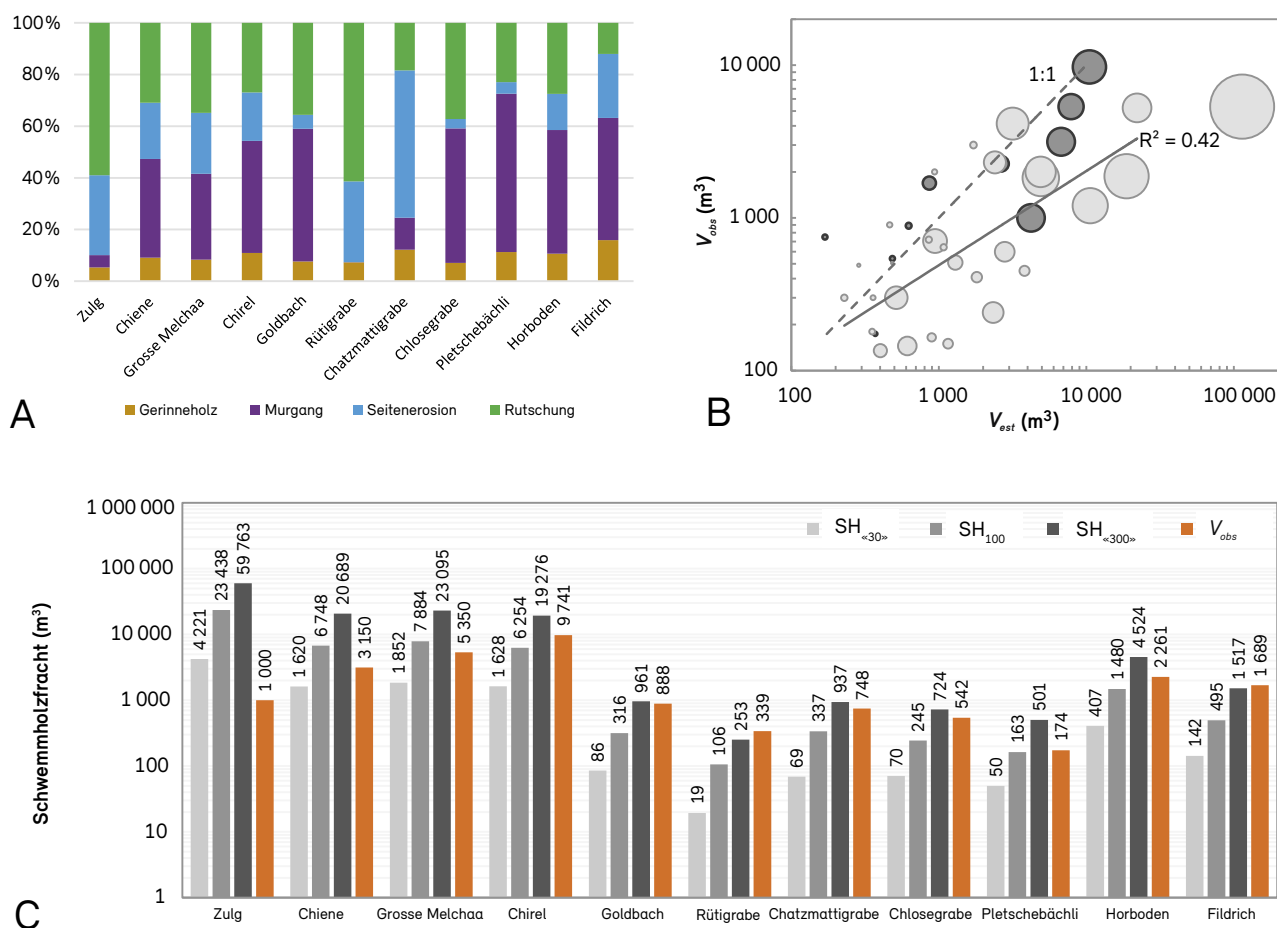
Prozesse wurden wie folgt korrigiert: Wo sich Murgang- und Rutschprozesse überschneiden, wurden erstere entfernt, und beide wurden bei Überlappungen mit Seitenerosionsflächen gelöscht. Mittels dieser Raster und der Holzvorratskarte VHMV wurde die Schwemmholzfracht (Frischholz) berechnet. Zusätzlich wurde das auf dem Waldboden vorhandene Totholz pauschal mit 5 % des Frischholzes abgeschätzt, was auf Erhebungen des LFI basiert. Für die Berücksichtigung des im Gerinne liegenden Totholzes wurden je nach Gewässerordnungszahl unterschiedliche Werte angenommen (vgl. Abb. 38

in Kap. 2.3), die mittels Angaben aus Ruiz-Villanueva et al. (2016c) und den Beobachtungen von Rickli et al. (2018) verifiziert werden konnten. Im Gegensatz zum EGA wird die Mobilisierung von Gerinneholz nicht als eigenständiger Eintragsprozess dargestellt (vgl. Abb. 8A und Abb. 10A), sondern in die Volumenangabe des Holzvorrats integriert.

Der FGA wurde auf mehrere Einzugsgebiete der Schweiz angewendet, namentlich am Chirel, der Chiene, der Kleinen Emme, der Landquart, der Grossen Melchaa und der Zulg. Die Validierung erfolgte mittels der Beobachtungs-

**Abb. 8: Resultate des empirischen GIS-Ansatzes**

(A) Prozentsatz der Schwemmholzfracht je Eintragsprozess (Gerinneholz, Murgang, Seitenerosion und Rutschung) für verschiedene Einzugsgebiete; (B) geschätzte Schwemmholzfracht und Vergleich mit den für das Hochwasser 2005 (bzw. 2012 für die Zulg) dokumentierten Schwemmholzmengen. Die Grösse der Kugeln zeigt die Grösse des Einzugsgebiets. Die dunkel eingefärbten Datenpunkte sind in (A) und (C) weiter aufgeschlüsselt und entsprechen den selben Fallbeispielen wie in Abb. 10 (Vergleich mit dem Fuzzy-Logic GIS-Ansatz). Die hellgrauen Kreise beziehen sich auf Berechnungen für andere Einzugsgebiete, die nur mit dem EGA durchgeführt wurden; (C) Schwemmholzfracht für die drei Szenarien  $SH_{\approx 30\%}$ ,  $SH_{100}$ ,  $SH_{\approx 300\%}$  und die verschiedenen Untersuchungsgebiete.

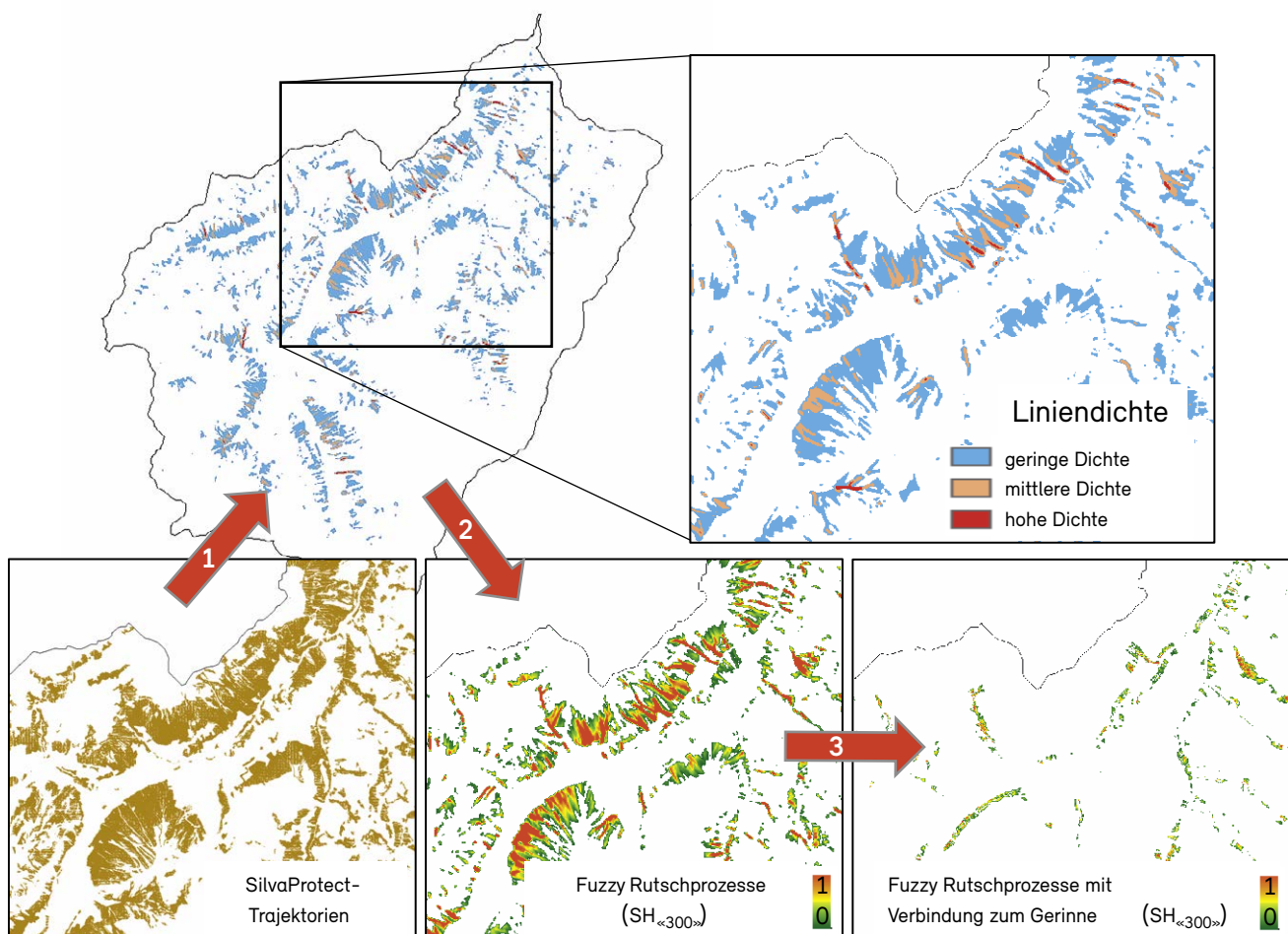


daten des Hochwassers im August 2005 bzw. 2012 für die Zulag (Abb. 10). Das Einzugsgebiet des Chirel wurde im Detail analysiert, da es auch als Fallbeispiel für den Vergleich mit den anderen Ansätzen in Kap. 1.7 verwendet wurde. Die geschätzten Schwemmholzfrachten des mittleren Szenarios ( $SH_{100}$ ) zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen, die nach dem Hochwasser im Jahr 2005 gemacht wurden (Waldner et al., 2009; Kuratli, 2017; Steeb et al., 2017). Die Seitenerosion ist gemäss den Resultaten der massgebliche Prozess für den Eintrag von Schwemmholz ins Gewässernetz, gefolgt von den Rutsch- und den Murgangprozessen; letztere variieren je nach Einzugsgebiet. Es muss jedoch beachtet werden, dass die von Seitenerosion betroffenen Flächen tendenziell überschätzt werden, da mög-

liche Längsverbauungen des Gerinnes, die gegen eine Verbreiterung des Flussbettes wirken, nicht berücksichtigt werden. Dieser Fehler ist geringer in unverbauten Einzugsgebieten, wie z. B. beim Chirel, der im Hochwasser 2005 tatsächlich grosse Gerinnebettverlagerungen erfahren hat. Dies unterstreicht die grosse Herausforderung, die die systematische Abschätzung von Seitenerosion und Gerinnebettverlagerungen darstellt. Mit dem FGA werden alle Gebiete entlang des Gewässernetzes ermittelt, die potenziell von Seitenerosion betroffen sein können. Die daraus abgeleiteten Werte sollten als Maximalwerte für jedes Szenario verstanden werden, die im Ereignisfall möglicherweise nicht erreicht werden. Die Weiterentwicklung und Verbesserung dieses Aspekts ist vorgesehen.

**Abb. 9: Einzugsgebiet des Chirel**

Karten aus dem Einzugsgebiet des Chirel, die den Arbeitsfluss von den SilvaProtect-Trajektorien (links unten) zu der Dichte der Linien (1) und zu den unscharfen Erdrutschgebieten zeigen (2), die dann gemäss ihrer Konnektivität zum Gewässernetz zugeschnitten werden (3).



Die Berechnung der geschätzten Schwemmholzfracht weist, wie oben erwähnt, mehrere Schritte auf, wobei die Benutzerin bzw. der Benutzer jeden Schritt einzeln und direkt steuern kann. Es müssen lediglich die erforderlichen Eingabedaten eingegeben und die Ausgabedateien abgespeichert werden, die für den darauffolgenden Modellierungsschritt notwendig sind. Das Modell FGA zur Ermittlung potenzieller Eintragsflächen wurde im ESRI ArcGIS 10.1 erstellt und umfasst eine .tbx-Datei sowie eine Dokumentation mit einer Kurzanleitung. Das Modell erfordert die Erweiterungen des Spatial Analyst und 3D Analyst. Zudem wird ein Python-Skript zur Berechnung der Sinuosität des Gerinnes bereitgestellt. Der FGA ist in der Anwendung flexibel und kann an verschiedene Eingabedaten angepasst werden. So können beispielsweise Rutschprozesse und Murgänge unabhängig von

SilvaProtect-CH implementiert werden oder zusätzliche Eintragsprozesse von Schwemmholz (z. B. Lawinen oder Stürme) berücksichtigt werden.

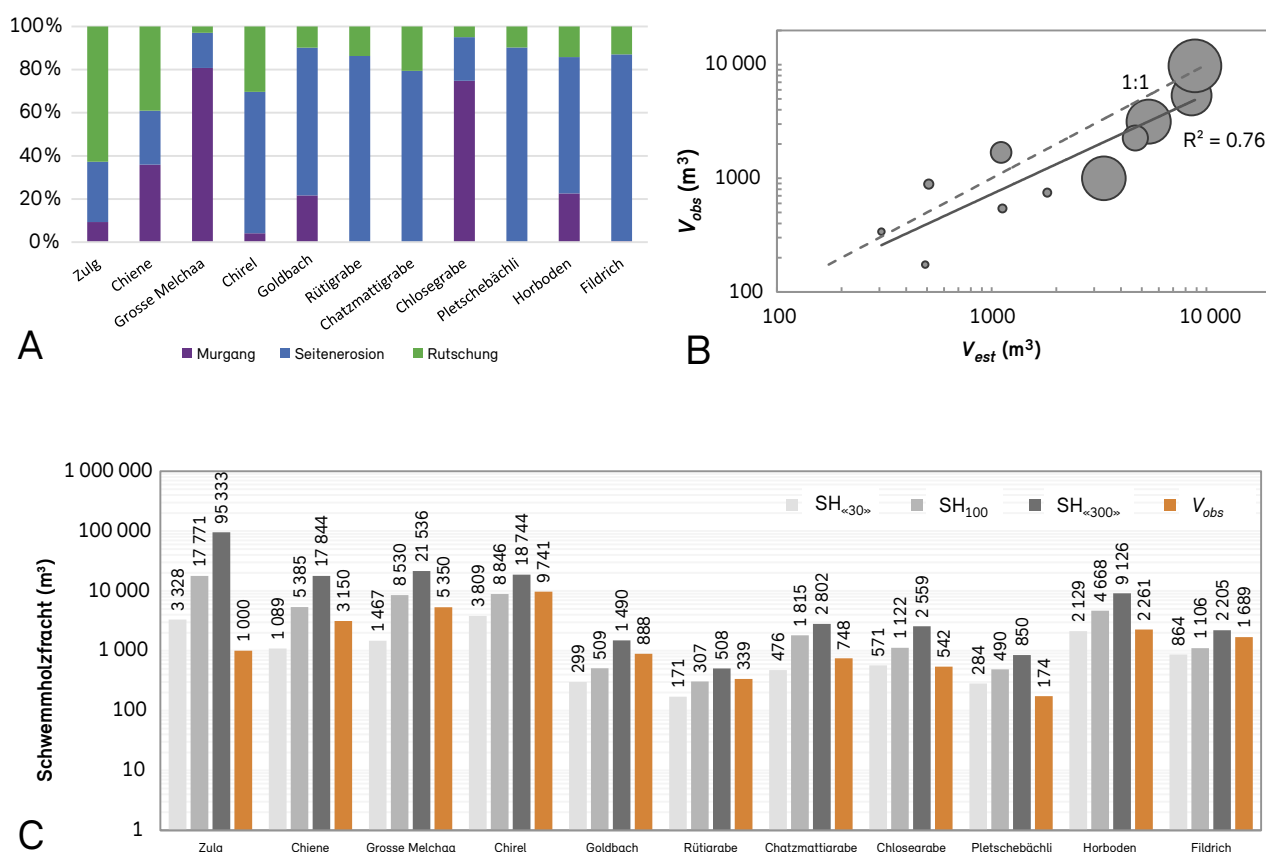
## 1.4 Probabilistischer Ansatz: *SlideforMAP* und *BankforMAP*

### 1.4.1 Numerische Modellierung der Eintragsprozesse

In den vergangenen Jahrzehnten wurde eine Vielzahl von Methoden entwickelt, um den Schwemmholzeintrag quantitativ abzuschätzen, jedoch werden die Vegetationseffekte auf die Schwemmholzdynamik selten oder nie berücksichtigt. In physikalischen und numerischen Modellen zur Abschätzung der Hangstabilität wurden die mechanischen Eigenschaften der Vegetation anfänglich

**Abb. 10: Resultate des Fuzzy-Logic GIS-Ansatzes**

(A) Prozentsatz der Schwemmholzfracht je Eintragsprozess (Rutschung, Murgang und Seitenerosion; Gerinneholz ist implizit in der Gesamtfracht berücksichtigt) für verschiedene Einzugsgebiete; (B) geschätzte Schwemmholzfracht und Vergleich mit den während des Hochwassers 2005 (bzw. 2012 für die Zulg) dokumentierten Schwemmholzmengen. Die Grösse der Kugeln zeigt die Grösse des Einzugsgebiets; (C) Schwemmholzfracht für die drei Szenarien  $SH_{<30m}$ ,  $SH_{100m}$ ,  $SH_{<300m}$  und die verschiedenen Untersuchungsgebiete.



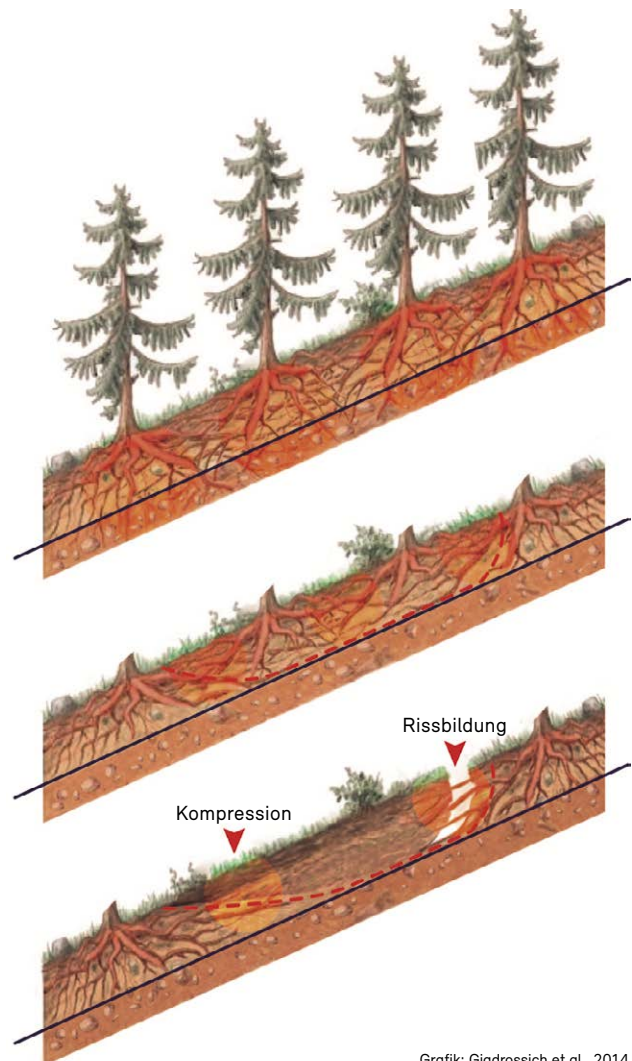
so implementiert, dass Pfahlwurzeln, welche den Scherhorizont durchdringen, die scheinbare Bodenkohäsion erhöhen und so die Hänge stabilisieren. Später wurde die laterale Wurzelverstärkung in Modellen mitberücksichtigt, da Lateralwurzeln auch unter Zug und Druck den Hang stabilisieren (Abb. 11). Für Ufererosionsmodellierungen wird oft die Schleppspannung in Pascal (Pa) oder die Strömungsleistung in Watt pro Quadratmeter ( $W/m^2$ ) berechnet. Wenn die von der Strömung angewandte Schleppspannung oder Strömungsleistung einen materialabhängigen Grenzwert überschreitet, wird Ufermaterial abgetragen. Die Vegetation erhöht die Grenzscheppspannung bzw. die Grenzströmungsleistung, wobei quantitative Informationen über vegetationspezifische Grenzwerte selten sind, was wiederum deren Implementierung in Modellen erschwert.

Für die Quantifizierung, Visualisierung und die verbesserte Abschätzung der Vegetationseinwirkung auf die Hang- und Uferstabilität wurden zwei numerische Modelle entwickelt: *SlideforMAP* (landSlide-forest-MAP) und *BankforMAP* (Bank-forest-MAP).

*SlideforMAP* (Schwarz et al., 2010, 2012, 2013) modelliert räumlich explizit (darum «MAP» genannt) die Hang- und Uferrutschwahrscheinlichkeit und die Schutzeffizienz des Waldes unter Berücksichtigung des aktuellen oder eines idealen Waldzustandes. Abb. 12B zeigt exemplarisch die Rutschwahrscheinlichkeit bei einem 100-jährlichen Niederschlagsereignis (gemäss Hydrologischem Atlas der Schweiz HADES; Jensen et al., 1997). Die Position und die Dimension der Bäume werden mit dem Einzelbaumerkennungsalgorithmus FINT (Find Individual Trees; Dorren, 2017; Menk et al., 2017) bestimmt, um die Wirkung der Vegetation standortspezifisch zu quantifizieren (Abb. 12A). Die Wurzelverstärkung wird aufgrund baumartenspezifischer Datensätze in *SlideforMAP* berechnet (z. B. Dazio et al., 2018; Abb. 12D).

*BankforMAP* modelliert ebenfalls räumlich explizit die Ufererosionswahrscheinlichkeit (Abb. 12C) und berücksichtigt dabei abflussbildende Parameter sowie die Effekte der Vegetation. Ufererosion ist das Ergebnis hydrodynamischer Kräfte, die auf das Ufer wirken (Julien, 2002). Dabei werden Sedimentablagerungen am Fusse des Ufers lateral abgetragen und als Sedimentfracht

Abb. 11: Die Vegetation stabilisiert die Hänge aufgrund von Lateral- und Pfahlwurzeln und erhöht die haltenden Zug-, Scher- und Kompressionskräfte



Grafik: Giadrossich et al., 2014

(Geschiebe und Suspension) wegtransportiert. Bei der Berechnung der Grenzscheppspannung wird in *BankforMAP* der Shields Parameter bestimmt, um die überschüssige Schleppspannung pro Querprofil zu eruiieren. Dabei wird der Erodibilitätskoeffizient stochastisch bestimmt. So modelliert *BankforMAP* die räumliche Ufererosionswahrscheinlichkeit mit und ohne Vegetation. Der Waldzustand kann ebenfalls angepasst werden, um die (Stabilisierungs-)Effizienz von idealen und aktuellen Waldzuständen gegenüber der Situation ohne Wald aufzuzeigen. Für die Ermittlung der Baumpositionen und -dimensionen wird

ebenfalls FINT benutzt. In *BankforMAP* wurde der Einfluss der Vegetation so implementiert, dass – falls die Uferfläche, welche direkt hydrodynamischen Kräfte ausgesetzt ist, durchwurzelt ist – sich der Grenzscheppspannungswert erhöht und folglich die Erosionswahrscheinlichkeit reduziert wird. Bei der Modellierung und Betrachtung eines bewaldeten bzw. eines nicht bewaldeten Ufers lässt sich so aufzeigen, wie hoch der Einfluss der Vegetation auf die Erosionswahrscheinlichkeit ist und wo das Schutzpotenzial optimiert werden kann.

Die beiden Modelle *SlideforMAP* und *BankforMAP* können u. a. verwendet werden, um die stabilisierende Wirkung des aktuellen und idealen Waldzustands aufzuzeigen. Dieser

räumliche Modellierungsansatz ermöglicht es, Standorte in einem Einzugsgebiet zu bestimmen, wo waldbauliche Massnahmen umgesetzt werden sollten. Die Effizienz, oder quasi das Schutzpotenzial, bildet sich schliesslich aus der Differenz der modellierten Rutschwahrscheinlichkeit bei aktuellem oder idealem Waldzustand und ohne Wald (Abb. 13). Je höher die Effizienz, desto grösser ist das Potenzial, mit waldbaulichen Massnahmen die Rutschwahrscheinlichkeit zu verringern. Je tiefer die Werte liegen, desto höher ist die bereits bestehende Schutzwirkung des Waldes bzw. kann die Effizienz mit waldbaulichen Eingriffen nur geringfügig verändert werden. Das heisst, wenn die Differenz der modellierten Rutschwahrscheinlichkeit zwischen z. B. idealem Waldzustand und

**Abb. 12:** Anwendung von *SlideforMAP*/*BankforMAP* an einem Teileinzugsgebiet des Chirel bei Rothbad (Kanton Bern)

Einzelbaumerkennung mit FINT (A), Rutschungswahrscheinlichkeit bei einem 100-jährlichen Niederschlagsereignis bei aktuellem Waldzustand (B), Ufererosionswahrscheinlichkeit bei einem 100-jährlichen Abflussereignis (C) und der stabilisierende Einfluss durch Wurzelverstärkung für den aktuellen Waldzustand (D).

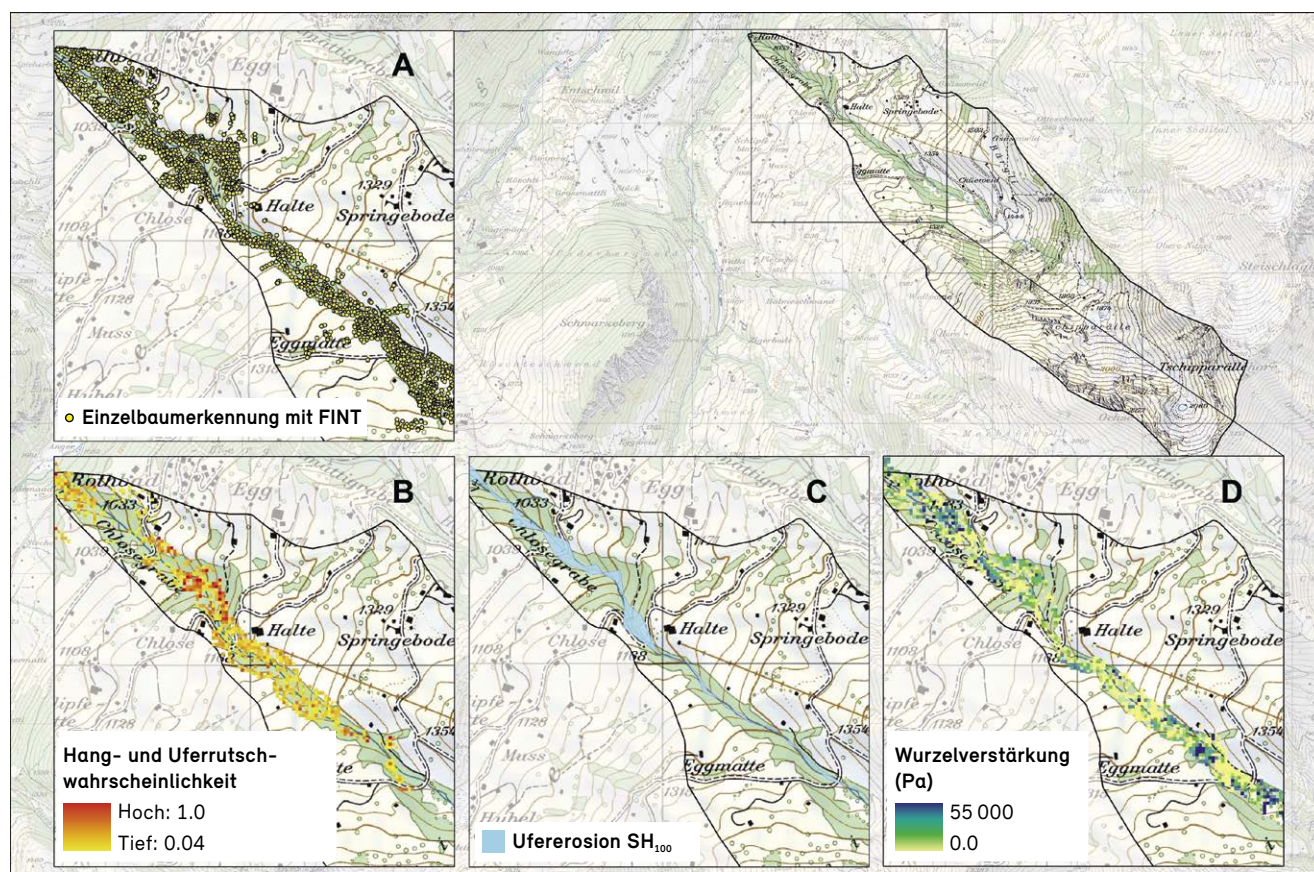
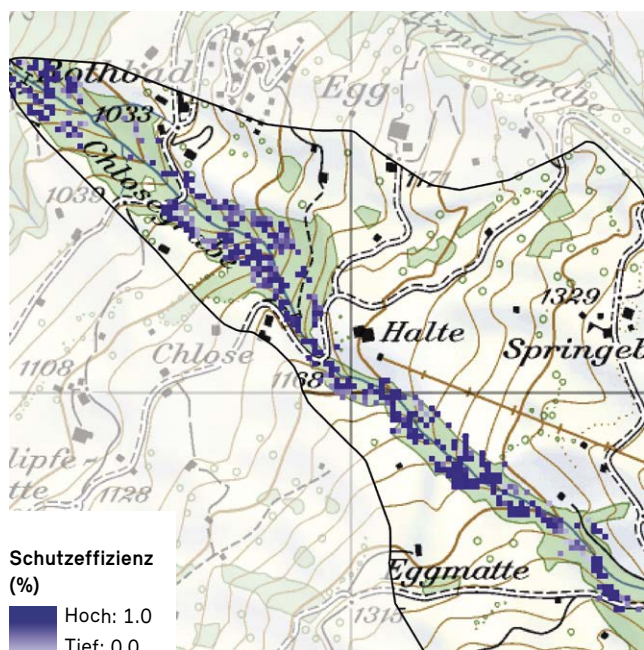


Abb. 13: Schutzeffizienz bei aktuellem Waldzustand bei Rothbad (BE)



Hintergrundkarte: PK25, swisstopo

ohne Wald hoch ist, kann die «Verbesserung» des Waldzustands aufgrund waldbaulicher Massnahmen einen grossen Einfluss auf die Disposition von Eintragsprozessen haben, da ein idealer Waldzustand die Rutschwahrscheinlichkeit im Verhältnis zur Rutschwahrscheinlichkeit ohne Wald deutlich reduziert. So lässt sich unter der Annahme eines idealen Waldprofils visualisieren, wo eine bessere Schutzwirkung durch gezielte waldbauliche Massnahmen erreicht werden kann. Der ideale Waldzustand wurde in *SlideforMAP* so definiert, dass die Wurzelverstärkung bei 5 Kilopascal (kPa) liegt. Dieser Wert ist aber baumarten-spezifisch und variiert dementsprechend.

#### 1.4.2 Abschätzung des Schwemmholzpotenzials mit *SlideforMAP* und *BankforMAP*

Analog zu den beiden GIS-Ansätzen (Kap. 1.2 & 1.3) berechnet *Slide/BankforMAP* das Schwemmholzpotenzial in einem Einzugsgebiet für drei verschiedene Szenarien (hypothetisches 30, 100 und 300jähriges Niederschlagsereignis:  $SH_{\llcorner 30\gg}$  |  $SH_{100}$  |  $SH_{\llcorner 300\gg}$ ). Die modellierten Flächen mit Ufer- und Hangrutschwahrscheinlichkeiten und der Ufererosionswahrscheinlichkeiten werden mit der Position der Bäume verschnitten (mit geschätztem Baumvolumen), um so den potenziellen Schwemmholzeintrag der entspre-

chenden Eintragsprozesse zu bestimmen. Da *SlideforMAP* die Auslaufdistanz der modellierten Rutschkörper nicht berechnet, werden nur diejenigen Bäume berücksichtigt, welche innerhalb der Rutschflächen und innerhalb einer Distanz von 50m zum Gerinne liegen. Mithilfe der modellierten Eintragsprozesswahrscheinlichkeit kann das Schwemmholzpotenzial weiter eingegrenzt werden. Die berechneten Eintretenswahrscheinlichkeit können demnach als Korrekturfaktor verstanden werden, um vom potenziellen Eintrag  $V_{pot}$  auf die geschätzte Schwemmholzfracht  $V_{est}$  zu schliessen.

Die benötigten Daten und Eingabeparameter für *Slide/BankforMAP* sind ein digitales Geländemodell (DGM), ein digitales Oberflächenmodell (DOM), eine Schätzung der Niederschlagsintensität und -dauer (gemäss HADES) und eine Schätzung des Bodentyps (Kohäsion, Reibungswinkel). Der Zeitaufwand für die Modellanwendung variiert je nach Einzugsgebietsgrösse. Die grössten Unsicherheiten entstehen aufgrund der Heterogenität der Bodeneigenschaften und der raumzeitlichen Niederschlagsverteilung.

Für die Praxis ermöglichen *Slide/BankforMAP* eine rasche Abschätzung von Eintragsprozessen und deren Eintretenswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der Vegetation, ohne dass viele Eingabeparameter benötigt werden. Einzig die Schätzung des Bodentyps kann sich als zeitaufwendig erweisen. Weiter können für kleine bis mittelgrosse Einzugsgebiete a) das Schwemmholzpotenzial und die Schwemmholzfracht abgeschätzt und b) die Schutzeffizienz des Waldes räumlich aufgezeigt werden. An Standorten, wo die Eintragswahrscheinlichkeit hoch ist und die Effizienz verbessert werden kann, sollten waldbauliche Massnahmen in Betracht gezogen werden, um den Waldzustand auf eine möglichst gute Schutzwirkung auszulegen.

Eine räumlich nicht explizite Version von *SlideforMAP* steht auf [www.ecorisq.org](http://www.ecorisq.org) für die Praxis zur Verfügung. Das Werkzeug *SlideforNET* (auf dem InterNET verfügbar) schätzt die Hangstabilität pro Standort mit Berücksichtigung des aktuellen Waldzustandes ab. Analog dazu ist geplant, eine räumlich nicht explizite Version von *BankforMAP* (genannt *BankforNET*) auf der Plattform EcorisQ zur Verfügung zu stellen, sobald die Validierung des Modells abgeschlossen ist.

## 1.5 Empirische Schätzformeln

Eine schnelle und einfache Methode für die Abschätzung der Schwemmholzfracht ist die Verwendung empirischer Schätzformeln, wie sie beispielsweise von Rickenmann (1997) oder Uchiogi et al. (1996) entwickelt wurden. Diese Gleichungen werden in der Praxis häufig verwendet, um die Größenordnung der potenziell transportierten Schwemmholzmenge im Falle eines Hochwassers abzuschätzen. Das Problem ist, dass bereits existierende Schätzformeln auf einer relativ kleinen Datengrundlage beruhen, was deren Vorhersagekraft einschränkt.

Im Kontext des Forschungsprogramms *WoodFlow* wurde eine umfangreiche Datenbank erarbeitet, welche eingetragene und transportierte Schwemmholz mengen sowie relevante Parameter der Einzugsgebiete bzw. der betreffenden Hochwasserereignisse dokumentiert. Die verwendeten Schwemmholzangaben stammen aus diversen Informationsquellen (Steeb et al., 2019b), u. a. aus StorMe-Formularen, Ereignisanalysen, Fernerkundungsdaten, wissenschaftlichen Publikationen sowie selbst erhobenen Daten (GIS-Analysen, Felddaten usw.). Insgesamt besteht die für das Projekt *WoodFlow* erstellte Schwemmholzdatenbank aus 210 Datensätzen. Der überwiegende Teil der Daten stammt aus Hochwasserereignissen in der Schweiz. Zwei Drittel der dokumentierten Schwemmholz mengen stammen aus Ablagerungen, während der Rest aus Eintragsflächen rekonstruiert wurde. Alle Angaben zur Schwemmholzmenge wurden für die weitere Analyse vereinheitlicht und in Festmetern ( $\text{m}^3$ ) konvertiert, wobei die Umrechnung von Locker- in Festvolumen an Lange & Bezzola (2006) angelehnt ist. Generell wurde dafür mit einem Auflockerungsfaktor  $\alpha = 3.3$  gerechnet. Bei Schwemmholzablagerungen in Seen (d. h. schwimmende Schwemmholzteppiche) wurde ein kleinerer Auflockerungsfaktor angenommen ( $\alpha = 1.4$ ), da eine grössere Packungsdichte bzw. ein geringeres Porenvolumen zu erwarten ist. Mit 64 Einträgen am häufigsten vertreten ist das Hochwasser vom August 2005. Die Einzugsgebiete der untersuchten Fließgewässer liegen vor allem im voralpinen und alpinen Raum – es handelt sich demnach hauptsächlich um Gebirgsflüsse und Wildbäche. Mithilfe dieser Datengrundlage wurden bestehende empirische Ansätze getestet und weiterentwickelt sowie neue

Abhängigkeiten aufgezeigt. Folgende Forschungsfragen sollen damit beantwortet werden:

- Wie viel Schwemmholz in Festmeter ( $\text{m}^3$ ) ist während eines Hochwassers in einem bestimmten Einzugsgebiet zu erwarten?
- Welche Kontrollvariablen eignen sich zur Abschätzung der Schwemmholzfracht?

### 1.5.1 Kontrollvariablen zur Quantifizierung der Schwemmholzfracht

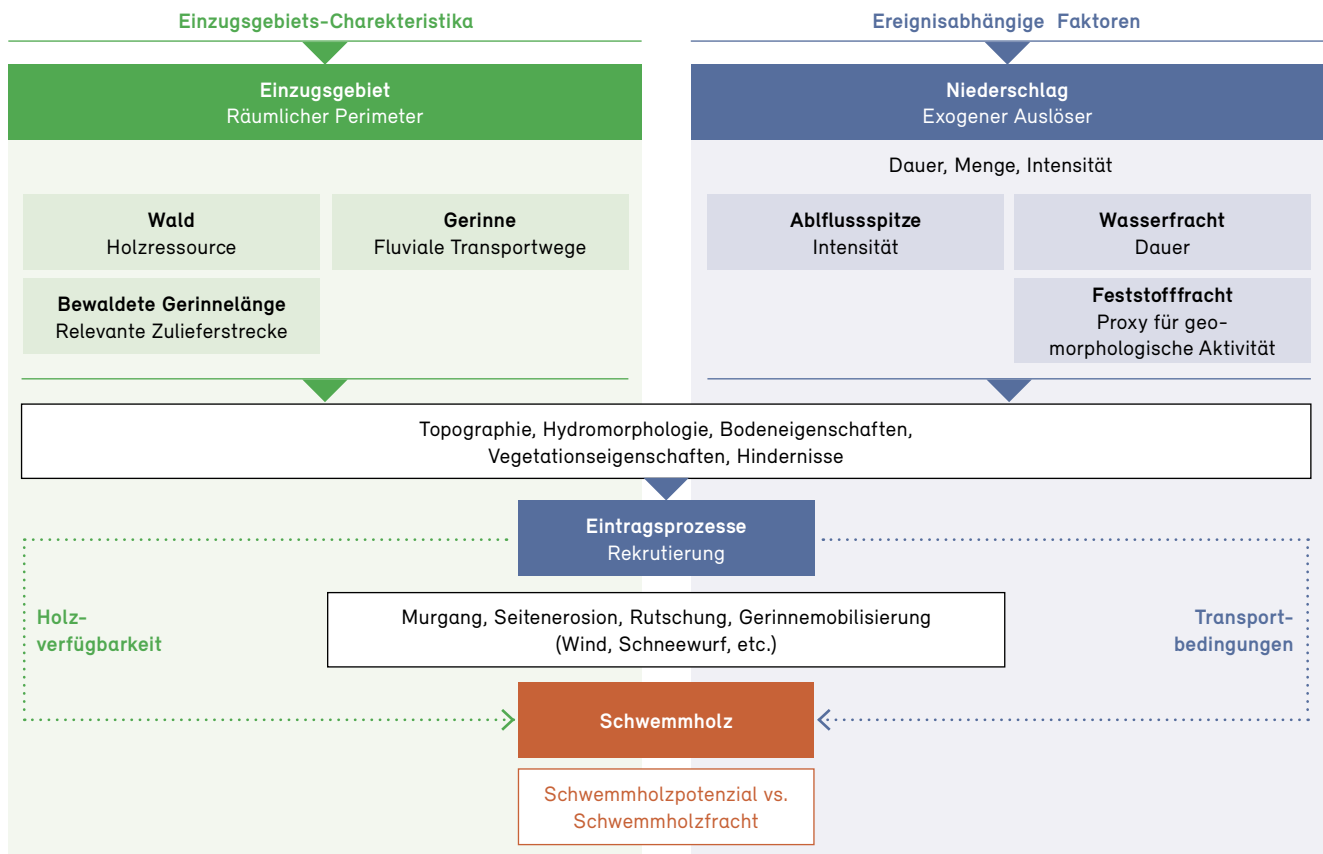
Die Kontrollvariablen zur Beschreibung der Schwemmholzfracht wurden in Einzugsgebiets-Charakteristika und ereignisabhängige Faktoren unterteilt (Abb. 14). Die hier vorgestellte Auswahl an Variablen hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern umfasst diejenigen, die anhand der Ereignisanalysen zuverlässig rekonstruiert werden konnten. Für jeden Datenbankeintrag wurde versucht, alle Kontrollvariablen möglichst vollständig zu eruieren bzw. abzuschätzen. Abbildung 15 fasst die verwendeten Kontrollvariablen sowie deren Kürzel und Einheiten für die Berechnung der empirischen Schätzformeln zusammen.

Die Variablen eignen sich unterschiedlich gut für die Vorhersage der Schwemmholzfracht. Die Korrelationsmatrix in Abb. 15 gibt einen ersten Eindruck über den Einfluss der verschiedenen Parameter auf das Schwemmholzvorkommen (Korrelationskoeffizient  $r = \pm 1$  entspricht einer perfekten Korrelation; je näher  $r$  bei 0, umso kleiner der statistische Zusammenhang). Für die meisten Variablen ist eine signifikante ( $p \leq 0.05$ ), mittlere bis hohe positive Korrelation mit der Schwemmholzmenge feststellbar. Aus der Korrelationsmatrix lässt sich auch ableiten, dass die Kontrollvariablen untereinander nicht unabhängig sind und zum Teil eine hohe Korrelation aufweisen. Als dominante Kontrollvariable kann die Einzugsgebietsfläche angesehen werden, da der Untersuchungsperimeter sowohl die topographischen Gegebenheiten bestimmt (je grösser die Fläche, umso mehr Wald und Gerinne) als auch die hydrologischen Bedingungen stark beeinflusst (je grösser die Fläche, umso höher der Abfluss im Allgemeinen).

### 1.5.2 Anwendungsempfehlungen für die empirischen Schätzformeln

Anhand diverser statistischer Verfahren wurden die zehn besten Schätzformeln für die Quantifizierung der

**Abb. 14: Konzeptuelles Schema der Kontrollvariablen, die einen Einfluss auf die Mobilisierung von Schwemmholtz haben**



**Abb. 15: Spearman-Korrelationsmatrix der untersuchten Parameter**

Die Zahlen entsprechen dem jeweiligen Korrelationskoeffizienten. Signifikante Werte ( $p \leq 0.05$ ) sind eingefärbt.

[illegible]

Schwemmholzfracht definiert. Da die Datenpunkte meist über mehrere Größenordnungen streuen, wurden diese grundsätzlich mit Potenzfunktionen angenähert. Wo vorhanden, wurden die neu berechneten Regressionen mit früheren Schätzformeln verglichen (z. B. aus Rickenmann, 1997), um deren Gültigkeit im Hinblick auf die vergrößerte Datengrundlage zu überprüfen. Zusätzlich wird für jede Funktion eine Bandbreite zwischen dem 10 %- und dem 90 %-Perzentil angegeben sowie ein Worst-Case-Szenario definiert, entsprechend einer konservativen Schätzung aus Sicht der Naturgefahrenprävention (Abb. 16). Eine ausführliche Beschreibung der Methodik und der Ergebnisse ist in Steeb et al. (2019b) aufgeführt.

Wie in Abb. 16 ersichtlich, sind räumliche Skaleneffekte bezüglich der Schwemmholzfracht vorhanden. Generell

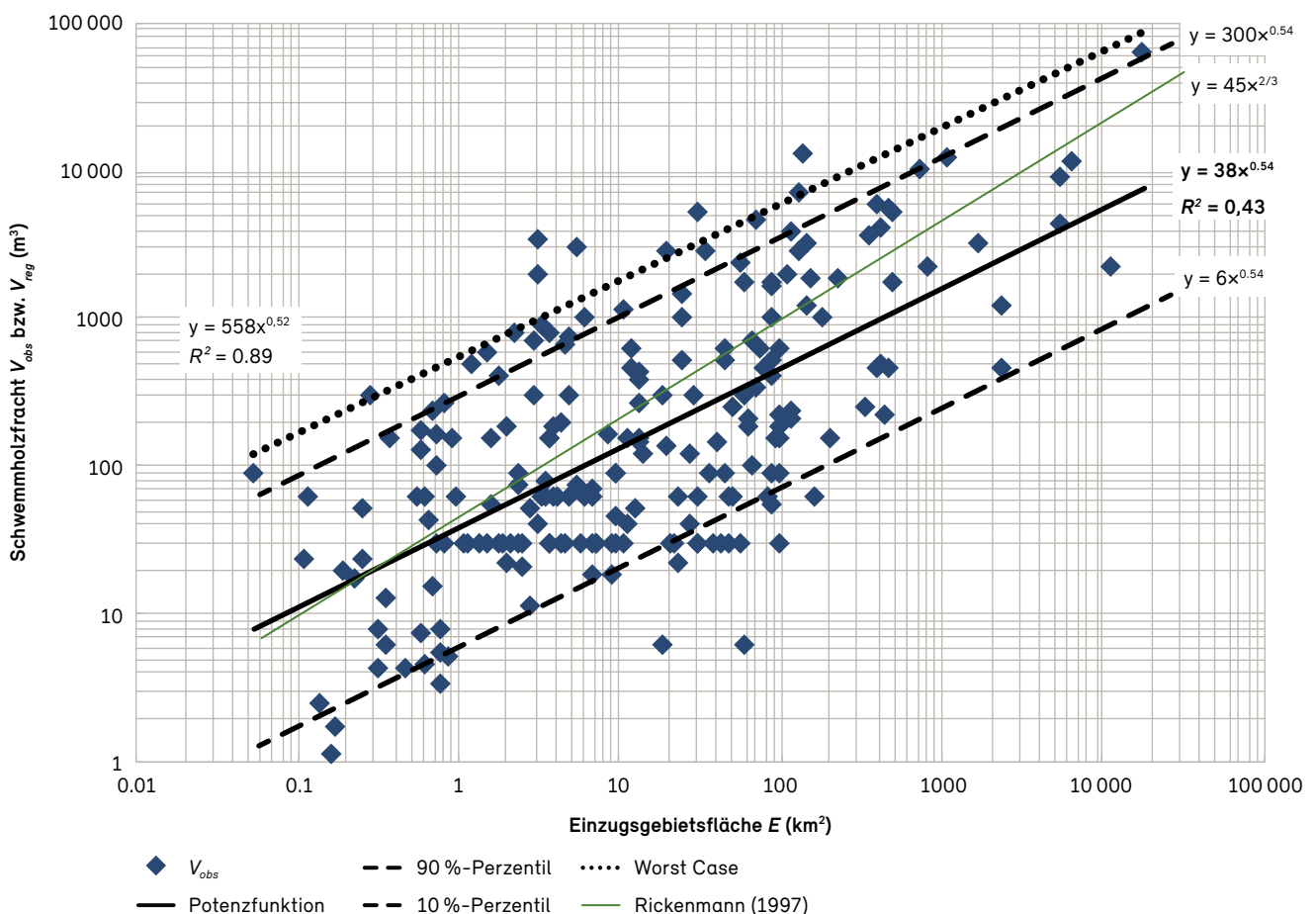
steigt die absolute Schwemmholzmenge mit zunehmender Einzugsgebietsgröße. Bei Betrachtung der spezifischen Schwemmholzfracht ( $V_{obs}/E$ ) zeigt sich, dass insbesondere Wildbäche bis 25 km<sup>2</sup> die grössten Schwemmholzlieferanten sind. Ein Grossteil der Schwemmholzfrachten in Abb. 16 weisen eine Wiederkehrperiode von ca. 50 – 150 Jahren auf (bzgl. Niederschlag und/oder Abflussspitze), wobei Schwemmholzmengen < 50 m<sup>3</sup> oftmals eine kleinere Jährlichkeit als 50 Jahre aufweisen.

Die zehn im Projekt *WoodFlow* entwickelten Gleichungen zur Abschätzung der Schwemmholzfracht sind in Tab. 4 zusammengefasst. Basierend auf einer multikriteriellen Entscheidungsanalyse (Steeb et al., 2019b) wurden vier verschiedene Bewertungskriterien verwendet, um die Anpassungsgüte der zehn Schätzformeln zu differenzie-

**Abb. 16: Schwemmholzfracht in Abhängigkeit der Einzugsgebietsfläche  $E$**

Dargestellt sind die gemäss Tab. 4 bzw. Gl. (1.4) definierten Regressionsgleichungen  $V_{reg}$ .

Die Datenpunkte  $V_{obs}$  entsprechen der dokumentierten Schwemmholzmenge aus vergangenen Hochwasserereignissen.



ren: 1) die Anzahl  $n$  der verwendeten Datenpunkte für die Herleitung der Formeln, 2) das Bestimmtheitsmass  $R^2$ , 3) das Faktorverhältnis der Perzentilgleichungen  $\frac{P_{90}}{P_{10}}$  (bei gleichem Exponent ein Indikator für den Streubereich der Formeln), 4) die Prozentzahl der Datenpunkte, welche innerhalb einer Grössenordnung liegen beim Vergleich der modellierten zur beobachteten Schwemmholzmenge ( $0.33 \leq \frac{V_{reg}}{V_{obs}} \leq 3.33$ ). Die Asteriske neben den Gleichungen (1.3) bis (1.12) fassen die Anpassungsgüte schliesslich zusammen, wobei drei Asteriske (\*\*\*) der besten Bewertung entsprechen.

Das Verhältnis der modellierten zur beobachteten Schwemmholzfracht ( $V_{reg}/V_{obs}$ ) zeigt, dass trotz der grossen Streuung der Datenpunkte bei allen zehn Schätzformeln rund 50 % der Verhältniswerte innerhalb einer Grössenordnung liegen. Die besten Prognosen ergaben sich mit den Schätzformeln für Mengen von ca. 50 bis 500 m<sup>3</sup> Schwemmholz, wobei die modellierte SH-Menge maximal um einen Faktor 2 unter- oder überschätzt wird. Kleinere SH-Mengen (<50 m<sup>3</sup>) werden eher überschätzt, während grössere SH-Mengen (>500 m<sup>3</sup>) eher unterschätzt werden. Diese Tendenz besteht grundsätzlich für alle zehn Regressionsgleichungen. Um dieser Unsicherheit in der Abschätzung der SH-Fracht gerecht zu wer-

**Tab. 4: Übersicht der Bandbreiten und Worst-Case-Szenarien je Schätzformel, inklusive Bewertungskriterien**

*Je dunkler ein Bewertungsfeld eingefärbt ist, desto besser ist die Anpassungsgüte.*

| Gleichung |        |                                           |                | Faktor | Exponent    | $n$ | $R^2$ | $\frac{P_{90}}{P_{10}}$ | $\frac{V_{reg}}{V_{obs}}$ |
|-----------|--------|-------------------------------------------|----------------|--------|-------------|-----|-------|-------------------------|---------------------------|
| ***       | (1.3)  | $V_{reg} = 38 E^{0.54}$                   | 10 %-Perzentil | 6      | 0.54        | 209 | 0.43  | 50                      | 50                        |
|           |        |                                           | 90 %-Perzentil | 300    | 0.54        |     |       |                         |                           |
|           |        |                                           | Worst Case     | 558    | 0.52        |     |       |                         |                           |
| **        | (1.4)  | $V_{reg} = 77 W^{0.56}$                   | 10 %-Perzentil | 13     | 0.56        | 179 | 0.35  | 55                      | 52                        |
|           |        |                                           | 90 %-Perzentil | 720    | 0.56        |     |       |                         |                           |
|           |        |                                           | Worst Case     | 1460   | 0.46        |     |       |                         |                           |
| *         | (1.5)  | $V_{reg} = 49 L_w^{0.5}$                  | 10 %-Perzentil | 7      | 0.50        | 175 | 0.24  | 71                      | 44                        |
|           |        |                                           | 90 %-Perzentil | 500    | 0.50        |     |       |                         |                           |
|           |        |                                           | Worst Case     | 925    | 0.50        |     |       |                         |                           |
| *         | (1.6)  | $V_{reg} = 40 L^{0.48}$                   | 10 %-Perzentil | 5.5    | 0.48        | 177 | 0.23  | 73                      | 41                        |
|           |        |                                           | 90 %-Perzentil | 400    | 0.48        |     |       |                         |                           |
|           |        |                                           | Worst Case     | 860    | 0.44        |     |       |                         |                           |
| ***       | (1.7)  | $V_{reg} = 0.2 F^{0.65}$                  | 10 %-Perzentil | 0.04   | 0.65        | 196 | 0.45  | 35                      | 56                        |
|           |        |                                           | 90 %-Perzentil | 1.4    | 0.65        |     |       |                         |                           |
|           |        |                                           | Worst Case     | 1.4    | 0.7         |     |       |                         |                           |
| *         | (1.8)  | $V_{reg} = 0.3 V_w^{0.47}$                | 10 %-Perzentil | 0.04   | 0.47        | 167 | 0.34  | 65                      | 50                        |
|           |        |                                           | 90 %-Perzentil | 2.6    | 0.47        |     |       |                         |                           |
|           |        |                                           | Worst Case     | 6.2    | 0.45        |     |       |                         |                           |
| ***       | (1.9)  | $V_{reg} = 5.7 Q_{max}^{0.91}$            | 10 %-Perzentil | 0.65   | 0.91        | 77  | 0.42  | 46                      | 58                        |
|           |        |                                           | 90 %-Perzentil | 30     | 0.91        |     |       |                         |                           |
|           |        |                                           | Worst Case     | 115    | 0.72        |     |       |                         |                           |
| **        | (1.10) | $V_{reg} = 0.3 P_{vol}^{0.46}$            | 10 %-Perzentil | 0.04   | 0.46        | 164 | 0.32  | 55                      | 51                        |
|           |        |                                           | 90 %-Perzentil | 2.2    | 0.46        |     |       |                         |                           |
|           |        |                                           | Worst Case     | 8      | 0.41        |     |       |                         |                           |
| **        | (1.11) | $V_{reg} = 0.4 Q_{max}^{0.46} V_w^{0.33}$ | 10 %-Perzentil | 0.3    | 0.35   0.25 | 166 | 0.32  | 47                      | 51                        |
|           |        |                                           | 90 %-Perzentil | 14     | 0.35   0.25 |     |       |                         |                           |
|           |        |                                           | Worst Case     | 87     | 0.26   0.19 |     |       |                         |                           |
| ***       | (1.12) | $V_{reg} = 0.2 E^{0.23} F^{0.6}$          | 10 %-Perzentil | 0.06   | 0.22   0.56 | 196 | 0.49  | 30                      | 56                        |
|           |        |                                           | 90 %-Perzentil | 1.8    | 0.22   0.56 |     |       |                         |                           |
|           |        |                                           | Worst Case     | 1.7    | 0.23   0.61 |     |       |                         |                           |

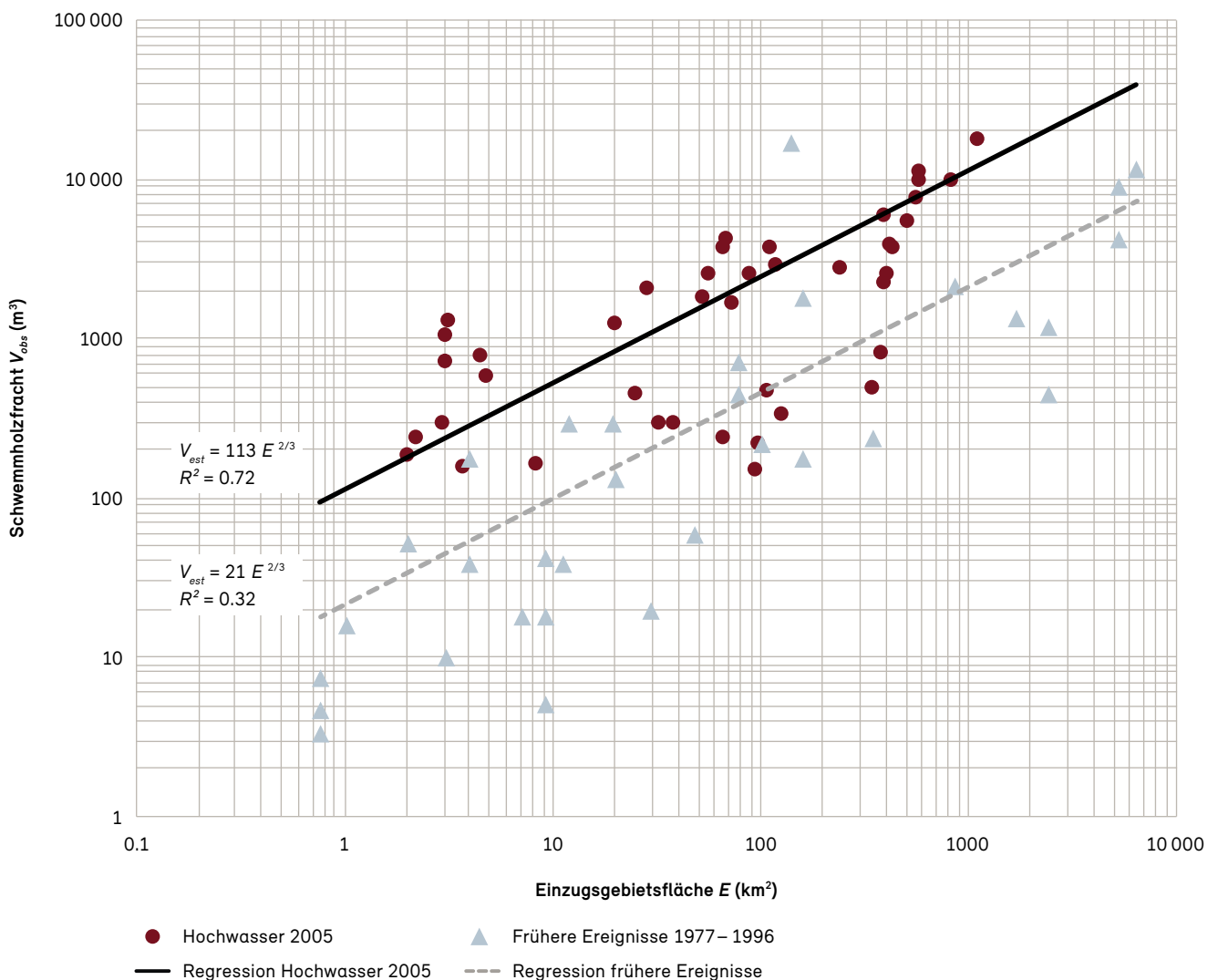
den, sollten die entsprechenden Formeln auch mit den Perzentil-Gleichungen bzw. dem Worst-Case-Szenario gerechnet werden, um die Bandbreite der möglichen Schwemmholzvolumen quantifizieren zu können.

Die zehn hier vorgestellten Schätzformeln liefern eine Auswahlmöglichkeit, die es dem Anwender erlauben, je nach Datenverfügbarkeit eine für ihn geeignete Gleichung zu wählen. Die auf Einzugsgebietscharakteristika basierenden Gleichungen (1.3) bis (1.6) sind in der Praxis am einfachsten anzuwenden, da die entsprechenden Parameter mithilfe von GIS relativ schnell und zuverlässig

bestimmt werden können (Methodik siehe Steeb et al., 2019b). Für die Anwendung der ereignisspezifischen Gleichungen (1.7) bis (1.12) sind Messungen und/oder Abschätzungen der entsprechenden Parameter nötig, die beispielsweise aus Ereignisanalysen oder durch hydrologische Modellierung des Untersuchungsgebiets abgeleitet werden können. Durch die Abschätzung von  $F$ ,  $Q_{max}$ ,  $V_w$ ,  $P_{vol}$  wird jedoch eine zusätzliche Unsicherheit in der Quantifizierung der Schwemmholzfracht eingeführt.

**Abb. 17: Einfluss der Hochwasserdauer auf das Schwemmholzaufkommen**

Schwemmholzfrachten des dreitägigen Hochwassers vom August 2005 in ausgewählten Einzugsgebieten (rote Punkte) und Vergleich mit früheren Ereignissen mit kürzerer Dauer (hellblaue Punkte; adaptiert aus Steeb et al., 2017).



### 1.5.3 Interpretationshilfe zu den empirischen Schätzformeln

Die empirischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Schwemmholzfracht von diversen Faktoren abhängig ist. Ganz allgemein weisen die empirischen Gleichungen eine grosse Streuung auf, weshalb die quantitative Abschätzung der Schwemmholzfracht generell mit entsprechender Unsicherheit behaftet ist. Eine Studie zum Hochwasser vom August 2005 hat gezeigt, dass die Schwemmholzfrachten während dieses Ereignisses rund 5-mal grösser waren im Vergleich zu früheren Ereignissen mit vergleichbarer Wiederkehrperiode (Abb. 17; Steeb et al., 2017; Steeb et al., 2019b). Dies zeigt, dass die Jährlichkeit eines Hochwasserereignisses allein basierend auf der Abflussspitze nicht für eine Beurteilung ausreicht. Neben der Abflussspitze ist auch die Dauer des Hochwassers von grosser Bedeutung. Gleichung (1.11) widerspiegelt im Prinzip eine solche Abhängigkeit. Bekanntermassen besteht eine solche Abhängigkeit auch beim fluvialen Geschiebetransport, und bei der Bildung von Murgängen sind analog die Intensität und die Dauer des Niederschlages von Bedeutung. Beim Hochwasser 2005 regnete es drei Tage lang, und entsprechend waren die Abflüsse über einen längeren Zeitraum sehr hoch, was schliesslich zu den ausserordentlich grossen Schwemmholzfrachten führte. Da alle wichtigen Rekrutierungsprozesse von Schwemmholz stark von der geomorphologischen Aktivität bzw. von Sedimenttransportprozessen abhängen, ist es nicht erstaunlich, dass die Regressionsgleichungen (1.7) und (1.12) mitunter die besten statistischen Bewertungen aufweisen (Tab. 4).

## 1.6 Vegetationswirkung und Bachtypisierung

Den Einfluss der Vegetation (Gehölze) auf die Ufer- und Hangstabilität zu quantifizieren ist schwierig. Daher besteht in der Praxis das Bedürfnis, einen einfachen, aber quantitativ-basierten Ansatz zu haben, um objektiv diesen Einfluss im Feld grob beurteilen zu können. Die Herausforderung dabei ist es abzuschätzen, in welchen Bereichen eines Gerinnes das Gehölze eine positive Wirkung auf schwemmholzrelevante Prozesse hat, d. h. eine Schutzwirkung aufweist, und in welchen Bereichen der mögliche negative Einfluss durch Schwemmholzeintrag im Vordergrund steht.

Die hier vorgestellte Typisierung von Bachabschnitten und Gerinneabhängigkeiten folgt auf Basis von einfachen im Feld zu bestimmenden Parametern. Die Wahl der Parameter sowie deren Schwellenwerte beruhen auf Literaturdaten, neuen Forschungsergebnissen und Erfahrungen aus der Praxis (Gasser et al., 2019). In diesem Unterkapitel werden somit Beurteilungsmatrizen vorgestellt, welche hauptsächlich für folgende Anwendungsarten gedacht sind:

- Beurteilung der Wirkung von Gehölzen entlang von Bächen und in Gerinneabhängigkeiten: Die Typisierung hilft bei der Beurteilung, ob Gehölze an einem bestimmten Bachabschnitt eine positive (stabilisierende) Wirkung haben oder ob sie zur Schwemmholzproduktion beitragen können.
- Gezielte Durchführung waldbaulicher Eingriffe: Die Typisierung kann helfen, am richtigen Ort die richtigen waldbaulichen Massnahmen herzuleiten, um damit die Schutzwirkung des Waldes zu optimieren.

Diese Anwendungen können, komplementär zu den Modellierungsansätzen bzgl. Schwemmholzpotenzial und -fracht (Kap. 1.1 bis 1.5), direkt im Feld zum Einsatz kommen und dienen auch der Herleitung von Handlungsbedarf in Einzelbeständen. Zum Beispiel kann die Typisierung bei der Verifizierung der modellierten Eintragsprozesse im Feld verwendet werden oder, um den aktuellen Zustand des Gehölzes und dessen Einfluss auf die Eintragsprozesse abzuschätzen.

### 1.6.1 Relevante Prozesse für die Bachtypisierung und Einfluss des Gehölzes

Die Typisierung unterscheidet hydraulische Prozesse (hydraulische Ufererosion, Bereich 1 in Abb. 18) und gravitative Prozesse (Ufer- und Hangrutschung, Bereiche 2 und 3 in Abb. 18). Andere Eintragsprozesse, welche durch biotische (z. B. Insekten, Pilze, Biber) oder abiotische (z. B. Stürme, Feuer) Faktoren beeinflusst werden können, werden in der Typisierung nicht berücksichtigt, weil a) diese Faktoren waldbaulich wenig beeinflussbar sind und b) sie eine untergeordnete Rolle beim potenziellen Schwemmholzeintrag spielen. Weiter sind bei der Schwemmholzmobilisierung grundsätzlich drei wichtige Faktoren entscheidend: 1) Die Art der Fließprozesse (fluvial oder murgangartig), 2) die Intensität der Fließprozesse (z. B. angewandte Schleppspannung oder Strömungsleistung)

und 3) die Dimensionen des mobilisierbaren Schwemmholzes relativ zur Gerinnebreite und Fliesstiefe.

Der Einfluss des Gehölzes auf die Ufer- und Hangstabilität ist je nach Eintragsprozess unterschiedlich. Die Vegetation übt vor allem durch die Wurzeln einen stabilisierenden Einfluss auf die Hänge, Böschungen und Ufer aus (Abb. 19). Die Morphologie der Wurzelsysteme (Teller- oder Flachwurzelsystem, Herzwurzelsystem oder Pfahlwurzelsystem) und deren Einfluss auf die Stabilität sind baumarten- und standortabhängig. So ist der Einfluss des Gehölzes je nach Prozessmagnitude, Baumartenmischung, Vegetationsdichte und Standort entweder:

(1) **hoch**: Die positive Vegetationswirkung überwiegt, mögliche negative Auswirkungen (z. B. Schwemmholzeintrag) sind nicht relevant;

(2) **variabel**: Die Vegetationswirkung ist abhängig vom Waldzustand. Bei idealem Waldzustand ist der Einfluss

positiv, bei ungenügendem Waldzustand kann der Einfluss negativ sein;

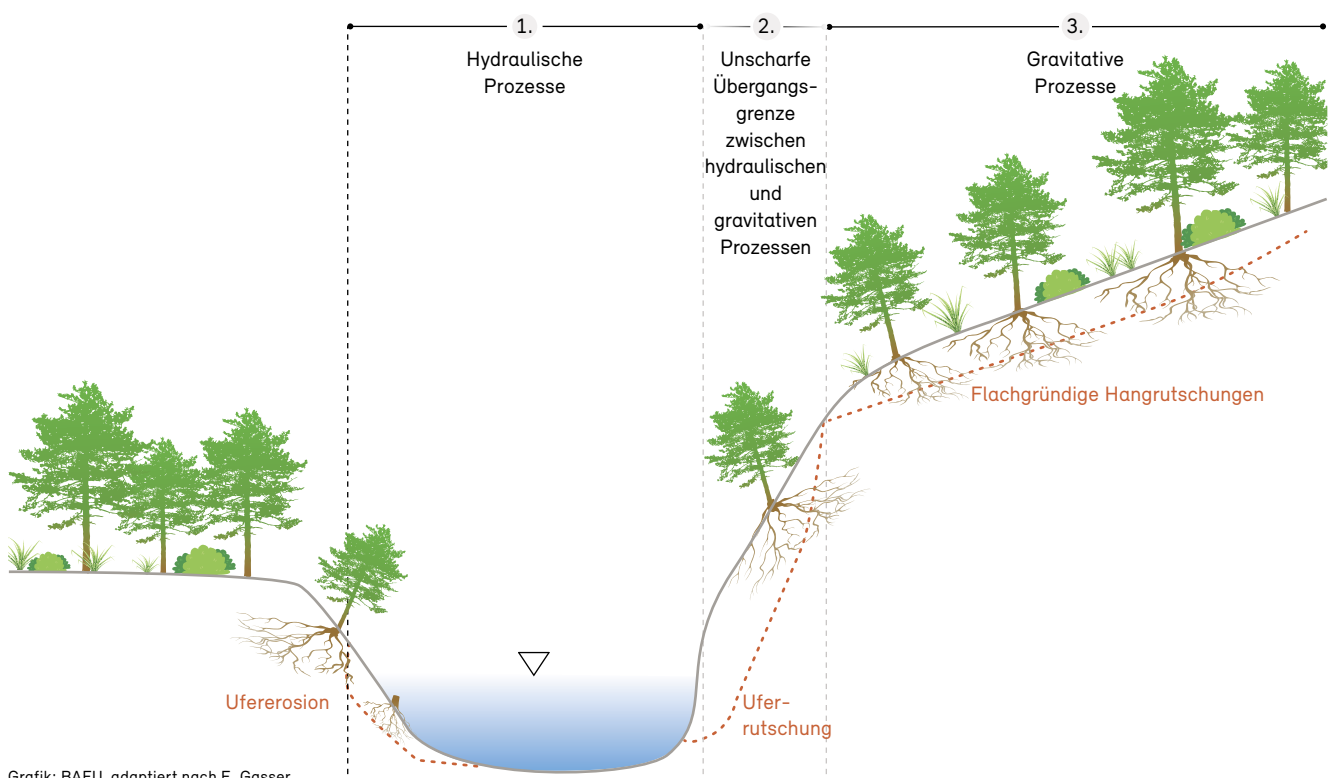
(3) **gering**: Ein idealer Zustand der Vegetation wirkt mäßig stabilisierend, und negative Einflüsse (z. B. potenzielle Schwemmholzlieferrung) können dominieren.

### 1.6.2 Ablauf der Bachtypisierung

Der Ablauf der Bachtypisierung umfasst folgende Schritte: (1) Abschätzung der potenziellen Schwemmholzmobilisierung aufgrund der Gewässer- und Vegetationseigenschaften, (2) Beurteilung der Vegetationswirkung auf die Ufererosion sowie (3) Beurteilung der Vegetationswirkung auf Uferrutschungen und flachgründige (Hang-) Rutschungen.

**1. Beurteilung potenzielle Schwemmholzmobilisierung aufgrund von Gerinne- und Schwemmholzeigenschaften:** Bei Gerinnebreiten < 2 m wird angenommen, dass diese nicht SH-mobilisierungsfähig sind. Diese Annah-

Abb. 18: Unterscheidung zwischen hydraulischen und gravitativen Eintragsprozessen



Grafik: BAFU, adaptiert nach E. Gasser

me basiert auf der Definition von Schwemmholz (Länge  $> 1$  m) und auf Beobachtungen aus der Praxis. Weiter haben Holzgewächse in murgangfähigen Gerinnen mit Breiten  $< 2$  m einen stabilisierenden und bremsenden Effekt. Bei Breiten  $\geq 2$  m und ab einer Gerinneneigung  $\geq 15^\circ$  ist ein Gerinne oft murgangfähig (Haeberli et al., 1991; siehe auch Abb. 33 in Kap. 2.1.2). In diesen Fällen ist der stabilisierende und bremsende Effekt des Gehölzes je nach Zustand der Vegetation variabel. Weiter haben Ruiz-Villanueva et al. (2016c) den spezifischen Schwemmholzspeicher mit Gerinnebreiten verglichen und konnten aufzeigen, dass Gerinnebreiten  $< 5$  m den höchsten spezifischen Schwemmholzspeicher aufweisen (Abb. 38 in Kap. 2.3). Daraus lässt sich schliessen, dass bei Gerinnebreiten zwischen 2 und 5 m die Schwemmholzmobilisierung begrenzt ist. Wie in Kap. 2.2.3 weiter ausgeführt, gelten SH-Stücke mit Längen grösser als die Gerinnebreite prinzipiell nicht als mobilisierungsfähig (gilt insbesondere für den fluvialen Transport; bei Murgängen können auch grössere Holzstücke mobilisiert werden).

**2. Beurteilung des Vegetationseinflusses auf Ufererosion:** Die direkte Strömungserosion kann durch die Schleppspannung oder durch die Strömungsleistung bestimmt werden, wobei in der Literatur mehr quanti-

tative Informationen über kritische Schleppspannungswerte vorhanden sind. Wenn die von der Strömung verursachte Schleppspannung einen Grenzwert überschreitet, kommt es zur Erosion. Gemäss Angaben aus der Literatur liegt die Grenzscheppspannung für bewaldete Ufer zwischen 50 und 300 Pa (z. B. Magilligan, 1992; Fischenich, 2001; Bloemer et al., 2015), was stark abhängig ist von Material- (Kohäsion, Reibungswinkel, Korngrößenverteilung, Porenwasserdruck) und Vegetationseigenschaften (Baumartendichte und Mischung). Dieser Wertebereich wurde als Kriterium verwendet, um den Vegetationseinfluss zu beurteilen. Basierend auf dem Konzept der «hydraulischen Geometrie» (Leopold & Maddock, 1953), erlauben die Gerinnebreite und die Gerinneneigung eine grobe Abschätzung der kritischen Schleppspannung (Abb. 20); diese zwei Parameter sind im Feld einfach zu erheben. Bei der Abschätzung hydraulischer Prozesse sollten nicht nur die Gerinnebreite und die Gerinneneigung, sondern auch lokale gerinnemorphologische Eigenschaften wie z. B. der Einfluss von grossen Blöcken und Gerinneholz auf die Strömungsumlenkung betrachtet werden. Bei einer Gerinnebreite zwischen beispielsweise 15 und 30 m können die Bäume je nach Waldzustand deutlich zu einer Uferstabilisierung füh-

**Abb. 19: Positiver stabilisierender Einfluss der Vegetation auf Erosionsprozesse**

Die Wurzeln stabilisieren das Ufer gegen hydraulische Erosion, und die Vegetation übt so einen positiven Einfluss auf die Uferstabilität aus. (B) Bei Erosion der Uferböschung kann die Vegetation je nach Zustand potenzielle Uferabbrüche stabilisieren.



ren, da sie die kritische Schleppspannung erhöhen (Tal et al., 2004). Gerinne mit einer Breite ab 30 m und steiler als 15 % sind nicht realistisch und befinden sich somit in einer grauen (nicht definierbaren) Zone.

**3. Beurteilung der Vegetationswirkung auf Ufer- und Hangrutschung:** Baumwurzeln können mit basaler oder lateraler Wurzelverstärkung die Uferstabilität in den obersten ca. 50 cm in der Regel stabilisieren (Schwarz et al., 2012; Schwarz et al., 2016). Wenn die potenzielle Scherfläche bzw. Anrisskante in einer Tiefe > 50 cm liegt, ist der Einfluss des Gehölzes variabel. Ab einer gewissen Grenzhangneigung und Tiefe der Scherfläche können je nach Bodenmaterial, Wassersättigungsgrad, Waldzustand und Baumartenmischung Rutschungen entstehen. Der positive Einfluss des Gehölzes ist bei Neigungen zwischen ca. 20° und 35° hoch (Abb. 21; Rickli & Graf, 2009; Schwarz et al., 2018). Weiter haben Wynn et al. (2004) gezeigt, dass Bäume am Fusse von steilen Ufern das Auftreten von Uferrutschungen und die Kolkbildung deutlich reduzieren. Folglich ist der Einfluss der Vegetation je nach Zustand hoch, variabel oder gering.

Zusammengefasst müssen für die Bachtypisierung im Feld die Gerinnebreite, die Gerinneneigung, die Hangneigung und eine Abschätzung der Tiefe der Scherfläche (Ufer- und Hangrutschungen) erhoben werden. Die Bachtypisierung kann so im Feld vorgenommen werden, um pro

Gerinneabschnitt den Einfluss des Gehölzes für die drei erwähnten Eintragsprozesse abzuschätzen.

### 1.6.3 Waldbauliche Umsetzung

Je nach Eintragsprozess ist der Einfluss des Gehölzes unterschiedlich. Mithilfe der Bachtypisierung können waldbauliche Massnahmen kleinräumig (pro Gerinneabschnitt) angepasst werden. Wenn zum Beispiel bei einem Gerinneabschnitt der Einfluss des Gehölzes in die Kategorie «hoch» fällt, überwiegen die positiven Einflüsse der Vegetation. In diesem Fall wären waldbauliche Massnahmen zur Verminderung des potenziellen Schwemmholzeintrags nicht relevant, und die waldbaulichen Ziele können Synergien zu anderen Waldfunktionen berücksichtigen, sofern im Schutzwald die Anforderungen nach NaiS (Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald; Frehner et al., 2005) erfüllt werden. Bei einem als «variabel» kategorisierten Abschnitt können waldbauliche Massnahmen einen grossen Einfluss auf die Disposition von Eintragsprozessen haben. Das Ziel soll sein, waldbauliche Massnahmen auf eine möglichst gute Schutzwirkung auszulegen, analog zu den Anforderungen von NaiS. Bei einem als «gering» kategorisierten Abschnitt überwiegen die negativen Einflüsse des Gehölzes (potenzielles Schwemmholz). In solchen Fällen kann eine gezielte Entfernung von Gehölzen zur Verminderung von potenziellem Schwemmholzeintrag bzw. die Definition eines maximal

Abb. 20: Grad des Vegetationseinflusses in Abhängigkeit von Gerinneneigung und Gerinnebreite auf die Ufererosion

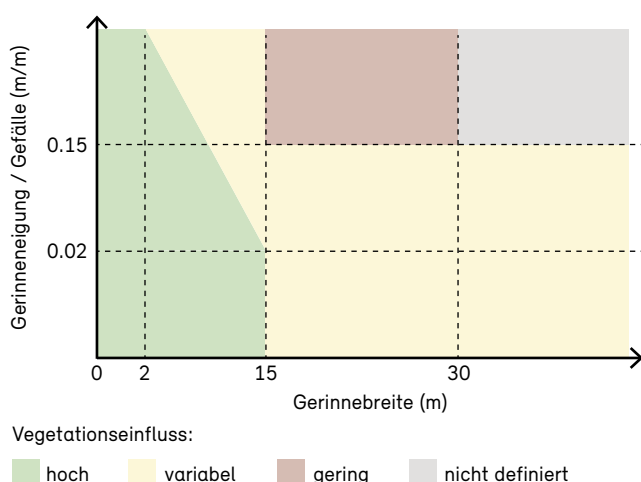
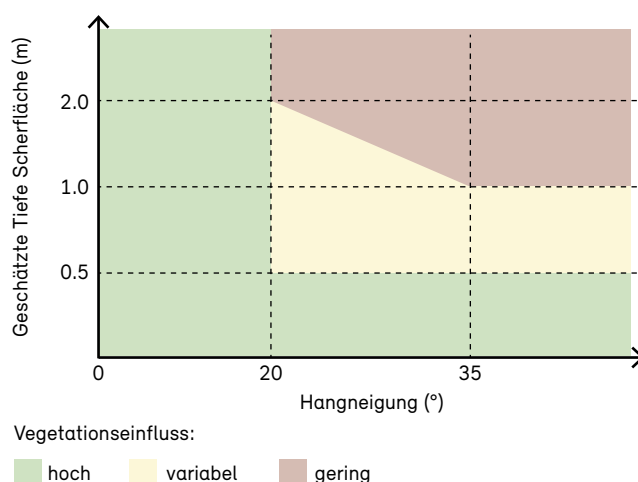


Abb. 21: Grad des Vegetationseinflusses von geschätzter Tiefe der Scherfläche und Ufer- bzw. Hangneigung bei schwemmholzrelevanten Rutschungen in Gerinnenähe



zu tolerierenden Baumdurchmessers zielführend sein. Die Förderung einer ufernahen Strauchvegetation kann ebenso ein guter und nachhaltiger Kompromiss sein.

## 1.7 Anwendungsbeispiel Chirel (Kanton Bern)

Anhand ausgewählter Fallbeispiele und Berechnungen werden im Folgenden die in Kap. 1 vorgestellten Ansätze zur Abschätzung des Schwemmholzpotenzials bzw. der Schwemmholzfracht einander gegenübergestellt. Als Fallbeispiel wurden drei (Teil-)Einzugsgebiete des Chirel im Berner Oberland gewählt. Für den Vergleich der beiden GIS-Ansätze wurden noch weitere Untersuchungsgebiete modelliert.

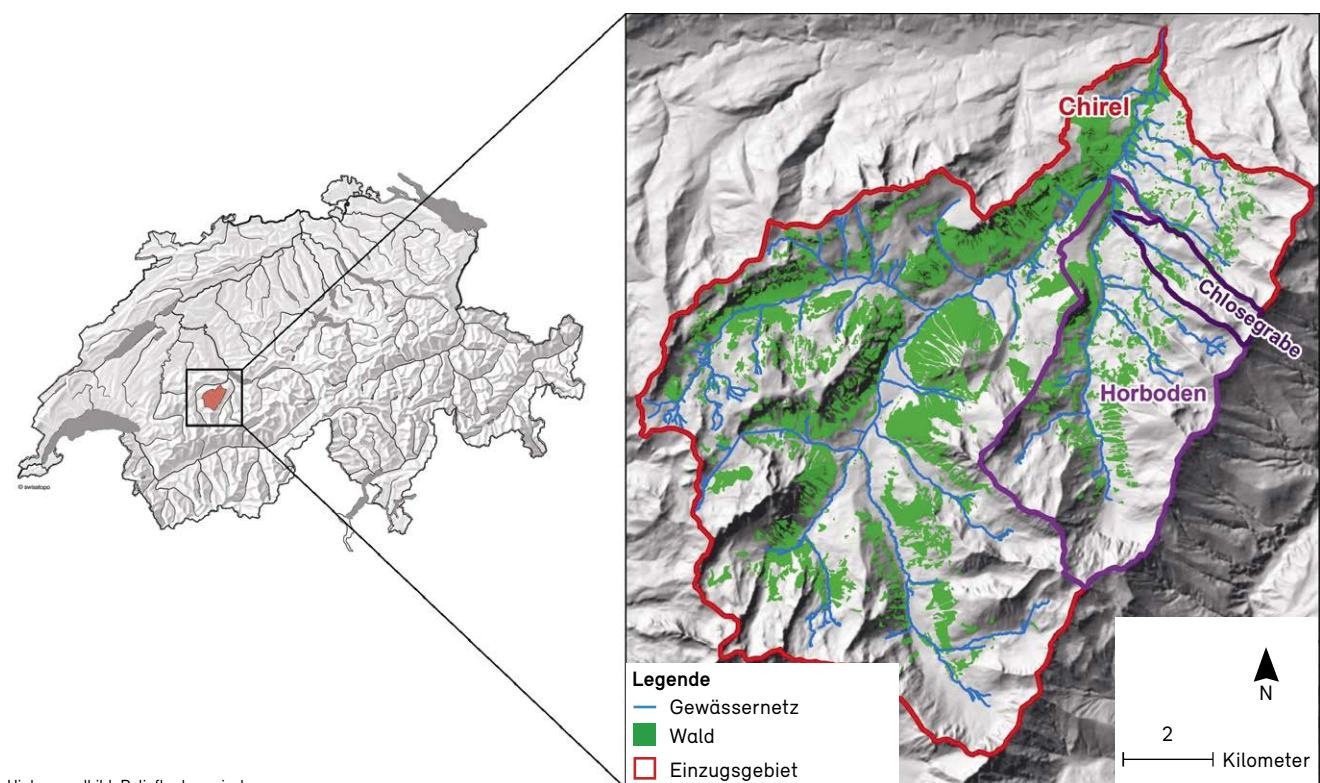
### 1.7.1 Schwemmholzaktivität im EZG des Chirel während des Hochwassers 2005

Der Gebirgsfluss Chirel und seine Seitenbäche (Abb. 22) im Einzugsgebiet der Kander eignen sich besonders gut für einen Vergleich der hier vorgestellten Ansätze. Das

Gebiet war während des Hochwassers vom August 2005 von den intensiven Niederschlägen besonders stark betroffen, was zu sehr hohen Abflüssen und entsprechender Schwemmholzaktivität führte. Nach dem Jahrhunderthochwasser wurden detaillierte Ereignisanalysen erarbeitet (LLE Diemtigtal, 2006; Waldner et al., 2009), wobei auch die Schwemmholzdynamik im Einzugsgebiet genau untersucht wurde.

Vom 20. bis 22. August 2005 fielen in weiten Teilen der Alpennordseite grosse Niederschlagsmengen. Im Einzugsgebiet des Chirel fielen in diesem Zeitraum grossflächig 150 – 170 mm Niederschlag (maximale Intensität 8 mm/h). Die statistische Einordnung des Ereignisniederschlags zeigt, dass beim 1-Tages-Niederschlag ein neuer Maximalwert mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren erreicht wurde (für mehrtägige Niederschläge wurden bereits 1970 ähnlich hohe Werte registriert). Die daraus resultierende Abflussspitze des Chirel betrug rund 100 m<sup>3</sup>/s (spezifischer Abfluss 0.77 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>). Seitenerosion und Gerinneverlagerung sind im Chirel in einem bisher noch selten

Abb. 22: Übersichtskarte des Chirel mit den drei (Teil-)Einzugsgebieten



gesehenen Ausmass aufgetreten. Die Erosionsprozesse wurden durch die Vorbedingungen und den Ablauf des Ereignisses begünstigt: Die intensiven Niederschläge fielen auf bereits feuchte Böden und hatten Böschungen destabilisiert. Diese wurden durch die Hochwasserabflüsse während langer Zeit hydraulisch belastet. Davon betroffen waren vor allem die Seitenbäche des Chirel, wo u. a. auch diverse Murgänge und murgangähnliche Prozesse stattfanden. Aufgrund der langen Ereignisdauer sind in den Seitenbächen phasenweise sowohl Erosionsprozesse (Tiefenerosion und Seitenerosion) als auch Ablagerungsprozesse aufgetreten. Die markanten Seitenerosionen führten zu einer deutlichen Verbreiterung des Gerinnebettes. Heute dürfte die Gerinnesohle stellenweise rund zwei- bis dreimal so breit sein wie vor dem Ereignis. Im Hauptgerinne des Chirel fand ebenfalls eine massive Seitenerosion statt (Gerinneverlagerung durch Mäanderbildung und Verzweigung). Im Unterlauf des Chirel wurden insgesamt 170 000 m<sup>3</sup> Geschiebe umgelagert: Ungefähr 70 000 m<sup>3</sup> wurden aus dem Oberlauf des Chirel herangeführt, weitere 30 000 m<sup>3</sup> von den Seitenbächen eingetragen. Die Seitenerosion in den Mäander- und Verzweigungsstrecken hat die restlichen 70 000 m<sup>3</sup> mobilisiert. Mit der Erosion der Böschungen in den Seitenbächen und der alluvialen Schotterterrassen im Hauptfluss sind grosse Mengen an Holz mobilisiert worden. Beträchtliche Schwemmholzmengen wurden dabei aus dem Einzugsgebiet exportiert (Tab. 5).

Für die Gegenüberstellung der Abschätzverfahren aus Kap. 1 wurde die Schwemmholzbilanz im Einzugsgebiet des Chirel während des Hochwassers vom August 2005 detailliert rekonstruiert. Die dokumentierten Schwemmholzfrachten sind in Tab. 5 zusammengefasst. Datengrundlage für die Rekonstruktion der Schwemmholzbilanz war einerseits die Ereignisanalyse im Auftrag des Kantons Bern (LLE Diemtigtal, 2006) sowie kantonale LiDAR-Aufnahmen (Laserscans aufgenommen im Dezember 2005 bzw. Januar 2006). Nach neustem Erkenntnisstand sind die in der Ereignisanalyse geschätzten Schwemmholzfrachten für die Seitenbäche wegen eines deutlichen Umrechnungsfehlers klar überschätzt worden. Deshalb wurde die Schwemmholzbilanz für den Chirel hier neu berechnet anhand der LiDAR-Aufnahmen und mithilfe der Holzvorratskarte (vgl. Kap. 1.1.2).

Für die Fallbeispiele wurden drei (Teil-)Einzugsgebiete unterschiedlicher Grösse ausgewählt (Abb. 22):

- Chlosegrabe: Seitenbach Chlosegrabe (3.1 km<sup>2</sup>)
- Horboden: Chirel bis Horboden (28.6 km<sup>2</sup>, inkl. Seitenbäche Chlosegrabe, Pletschbächli und Schreiendgrabe)
- Chirel: gesamtes Einzugsgebiet des Chirel (129 km<sup>2</sup>)

### 1.7.2 Vergleich der Modellierungsansätze

Die Resultate der drei Modellierungsansätze (EGA, FGA und *Slide/BankforMAP*) sind in Anhang A4 zusammenge-

**Tab. 5: Schwemmholzbilanz im Einzugsgebiet des Chirel**  
Hochwasser August 2005

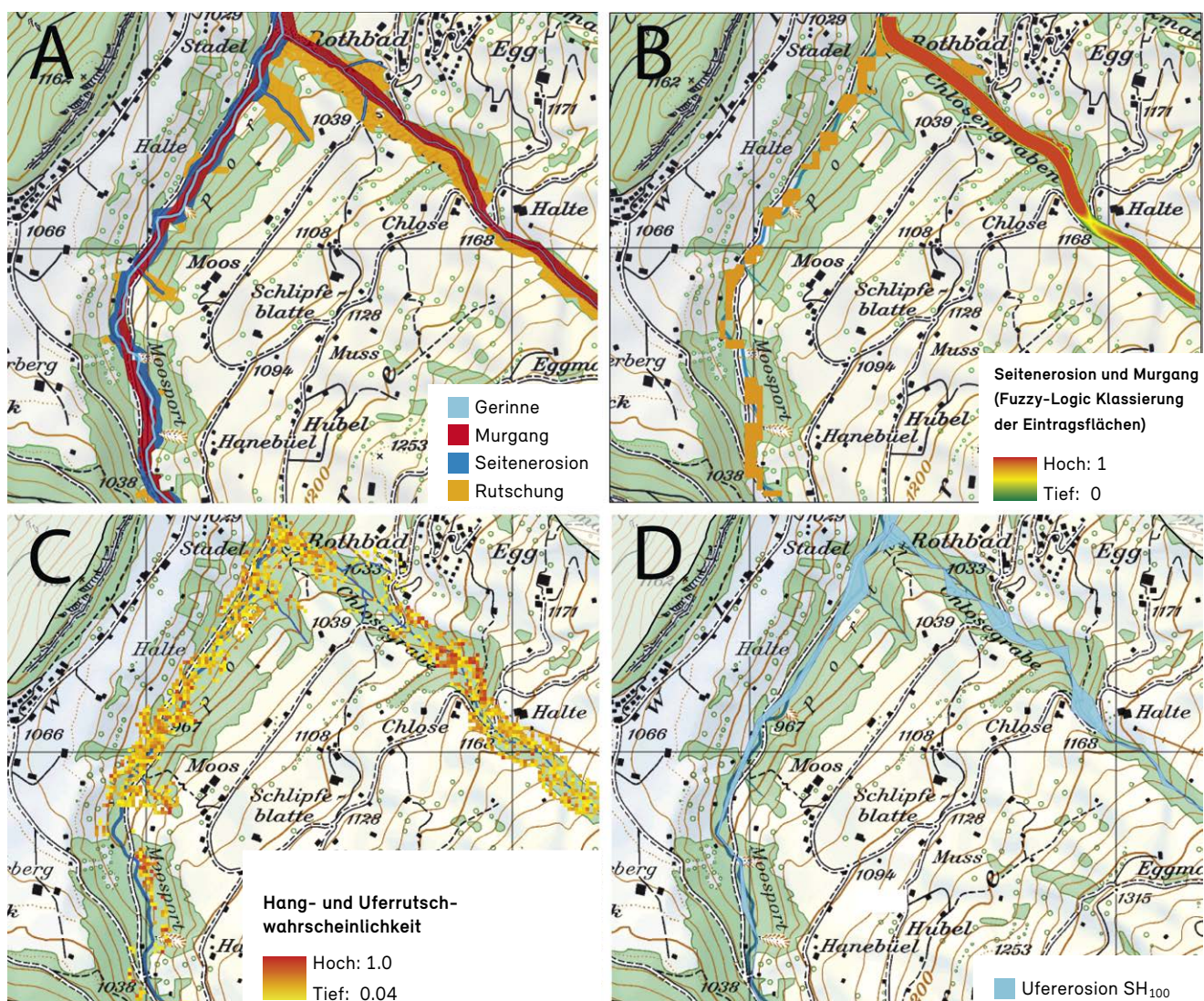
| Bach                     | Eintragsfläche (ha) | Holzvorrat (m <sup>3</sup> /ha) | SH-Eintrag (m <sup>3</sup> ) | SH-Ablagerung (m <sup>3</sup> ) | Holzaustrag (%) | SH-Export (m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------|---------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------|-----------------------------|
| Goldbach                 | 2.92                | 304                             | 888                          | 710                             | 20              | 178                         |
| Rütigrabe                | 1.22                | 277                             | 339                          | 271                             | 20              | 68                          |
| Chratzmattigrabe         | 2.55                | 294                             | 748                          | 374                             | 50              | 374                         |
| Chlosegrabe              | 2.76                | 196                             | 542                          | 325                             | 40              | 217                         |
| Pletschbächli            | 0.74                | 235                             | 174                          | 122                             | 30              | 52                          |
| Schreiendgrabe           | 0.63                | 202                             | 126                          | 101                             | 20              | 25                          |
| <b>Total Seitenbäche</b> | <b>10.81</b>        | <b>261</b>                      | <b>2817</b>                  | <b>1903</b>                     | <b>32</b>       | <b>914</b>                  |
| Fildrich                 | 5.63                | 300                             | 1689                         | 500                             | 70              | 1189                        |
| Chirel bis Horboden      | 7.04                | 321                             | 2261                         | 1900                            | 16              | 361                         |
| Horboden bis Oey         | 9.33                | 319                             | 2975                         | 665                             | 78              | 2310                        |
| <b>Total EZG</b>         | <b>32.81</b>        | <b>297</b>                      | <b>9741</b>                  | <b>4968</b>                     | <b>49</b>       | <b>4773</b>                 |

fasst. Dabei sind für alle drei Szenarien ( $SH_{30}$  |  $SH_{100}$  |  $SH_{300}$ ) und Untersuchungsperimeter (Chlosegrabe, Horboden, Chirel) die berechneten Schwemmholzvolumen für  $V_{pot}$  und  $V_{est}$  zusammen mit den entsprechenden potenziellen Eintragsflächen  $F_{pot}$  aufgelistet. Prinzipiell unterscheiden sich die drei Ansätze (i) in der Ausscheidung der potenziellen Eintragsflächen, (ii) in der Quantifizierung des Schwemmholzpotenzials sowie (iii) in der Schätzung der Schwemmholzfracht. Diese Unterschiede werden im Folgenden dargelegt.

Abb. 23 zeigt exemplarisch die potenziellen Eintragsflächen  $F_{pot}$  der drei Ansätze für das Szenario  $SH_{100}$  am Beispiel des Chlosegrabe bei Rothbad (Kanton Bern). Man sieht, dass  $F_{pot}$  grösstenteils gut übereinstimmt, wobei der EGA tendenziell grössere Flächen ausscheidet als *Slide/BankforMAP* (vgl. Anhang A4). Technisch gesehen, scheiden der EGA und *BankforMAP* die potenziellen Eintragsflächen als Polygon/Shapefile aus, während der FGA und *SlideforMAP* Rasterkarten produzieren.

Abb. 23: Vergleich der drei Ansätze zur Modellierung des Schwemmholzpotenzials

Standort: Zusammenfluss vom Seitenbach Chlosegrabe mit dem Chirel bei Rothbad, Kanton Bern. (A) Empirischer GIS-Ansatz, (B) Fuzzy-Logic GIS-Ansatz, (C) *SlideforMAP* und (D) *BankforMAP*.



Die geschätzten Schwemmholzfrachten  $V_{est}$  der drei Ansätze sind in Abb. 24 visualisiert. In der Grafik grau hinterlegt sind die dokumentierten Schwemmholzfrachten von allen Ereignissen der Schwemmholzdatenbank (Kap. 1.5). Die Daten sind nach Einzugsgebietsgrösse aufgeschlüsselt, und die daraus abgeleitete Schätzformel (Gl. (1.3)) bzw. Untervarianten davon sind abgebildet. Das gesamte Einzugsgebiet des Chirel ist für die numerische Modellierung mit *Slide/BankforMAP* zu gross und konnte deshalb nicht berechnet werden. Die Resultate zeigen, dass der FGA die höchsten Schwemmholzfrachten schätzt, gefolgt vom EGA und *Slide/BankforMAP*. Im Vergleich zu den mittels empirischer Schätzformeln bestimmten (mittleren) Schwemmholzfrachten aus Kap. 1.5 berechnen die drei räumlichen Modellierungsansätze im Allgemeinen höhere Werte. Dies hängt teilweise mit der langen Ereignisdauer des Hochwassers 2005 zusammen, welches im Durchschnitt zu grösseren SH-Mengen führte als andere Hochwasser-Ereignisse (siehe auch Kap. 1.5), und mit der Tatsache, dass die Ansätze hauptsächlich anhand von Ereignissen des Hochwassers 2005 kalibriert wurden.

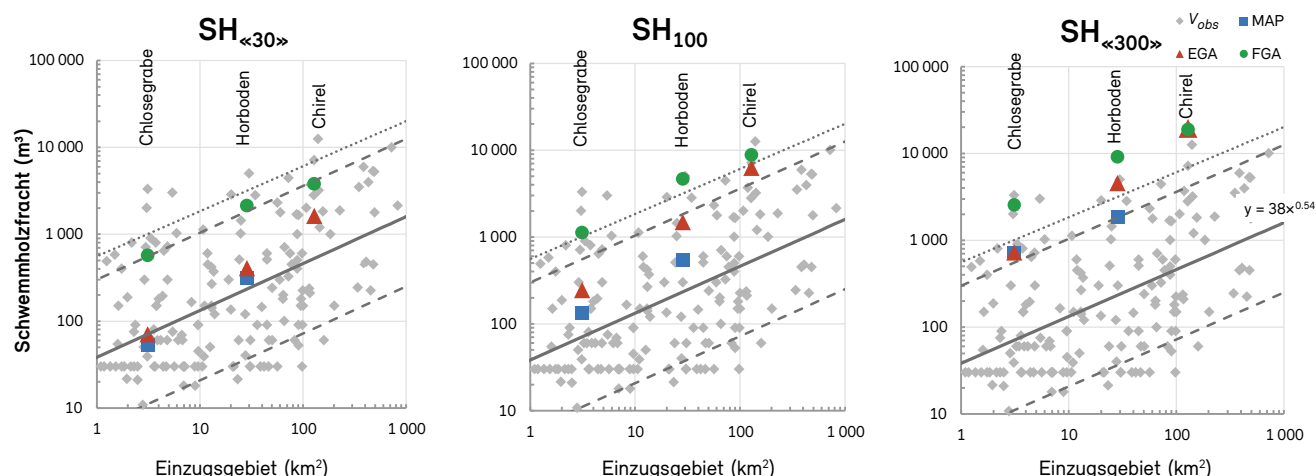
Wie in Kap. 1.2 und 1.3 bereits dargelegt, sind die beiden GIS-Ansätze grundsätzlich so kalibriert, dass  $V_{obs}$  eher überschätzt als unterschätzt wird. Im Fall des Chirel, welches bezüglich Schwemmholzfracht ein Extrembeispiel darstellt (vgl. Abb. 27), ist diese Tendenz zur Überschät-

zung jedoch nicht allgemein ersichtlich. Für das gesamte Einzugsgebiet des Chirel unterschätzen sowohl der EGA als auch der FGA die Schwemmholzfracht des Hochwassers 2005. In den kleineren Einzugsgebieten von Horboden und Chlosegrabe wird  $V_{obs}$  von *Slide/BankforMAP* und vom EGA unterschätzt, während der FGA  $V_{obs}$  deutlich überschätzt (Abb. 25). Ein Grund für die Differenz von  $V_{obs}$  und  $V_{est}$  ist der Waldverlust durch das Hochwasser vom August 2005. Die Inputdaten (Waldfläche und Waldvorrat) für das GIS-Modell beruhen auf Erhebungen nach diesem Ereignis, weshalb die potenziellen Eintragsflächen und somit auch die geschätzte Schwemmholzfracht kleiner ausfallen. Eine weitere grosse Unsicherheit liegt in den Angaben zur dokumentierten Schwemmholzfracht, die letztlich auch auf groben Schätzungen beruhen. Schlüsselt man die geschätzten Schwemmholzfrachten (Szenario SH<sub>100</sub>) nach dem Anteil der beitragenden Eintragsprozesse auf und vergleicht sie mit den dokumentierten Frachten  $V_{obs}$  während des Hochwassers 2005, sind ebenfalls Unterschiede zwischen den drei Ansätzen feststellbar (Abb. 25):

- **Beobachtete Schwemmholzfracht 2005:** Im Chlosegrabe wirkten Murgänge und/oder Rutschungen als Eintragsprozess. In den beiden grösseren Einzugsgebieten Horboden und Chirel war die Seitenerosion der massgebende Eintragsprozess.

Abb. 24: Vergleich der drei Ansätze zur Abschätzung der Schwemmholzfracht

Geschätzte Schwemmholzfrachten  $V_{est}$ , unterschieden nach Testeinzugsgebiet und Szenario, gemäss den drei Ansätzen (farbige Punkte, siehe Legende). Eingezeichnet sind zudem die empirischen Schätzformeln für  $V_{reg}$  nach Gl. (1.3) in Kap. 1.5, die ausgezogene Linie steht für die Regressionslinie aller Daten, punktiert für Worst Case, gestrichelt für «90%-Perzentil» und für «10%-Perzentil».



- **Fuzzy-Logic GIS-Ansatz (FGA):** Proportional zu  $V_{obs}$  sind die Schwemmholzvolumen je Eintragsprozess gut nachgebildet. Tendenziell neigt der Ansatz zu einem hohen Anteil des SH-Eintrags durch Seitenerosion (vgl. Abb. 10A).
- **Empirischer GIS-Ansatz (EGA):** Der Anteil der jeweiligen Eintragsprozesse ist relativ ausgeglichen, wobei Murgänge dominieren, gefolgt von Rutschungen, Seitenerosion und Gerinneholz-Mobilisierung.
- **Slide/BankforMAP:** Hydraulische Ufererosion macht den Grossteil der geschätzten Schwemmholzfracht aus.

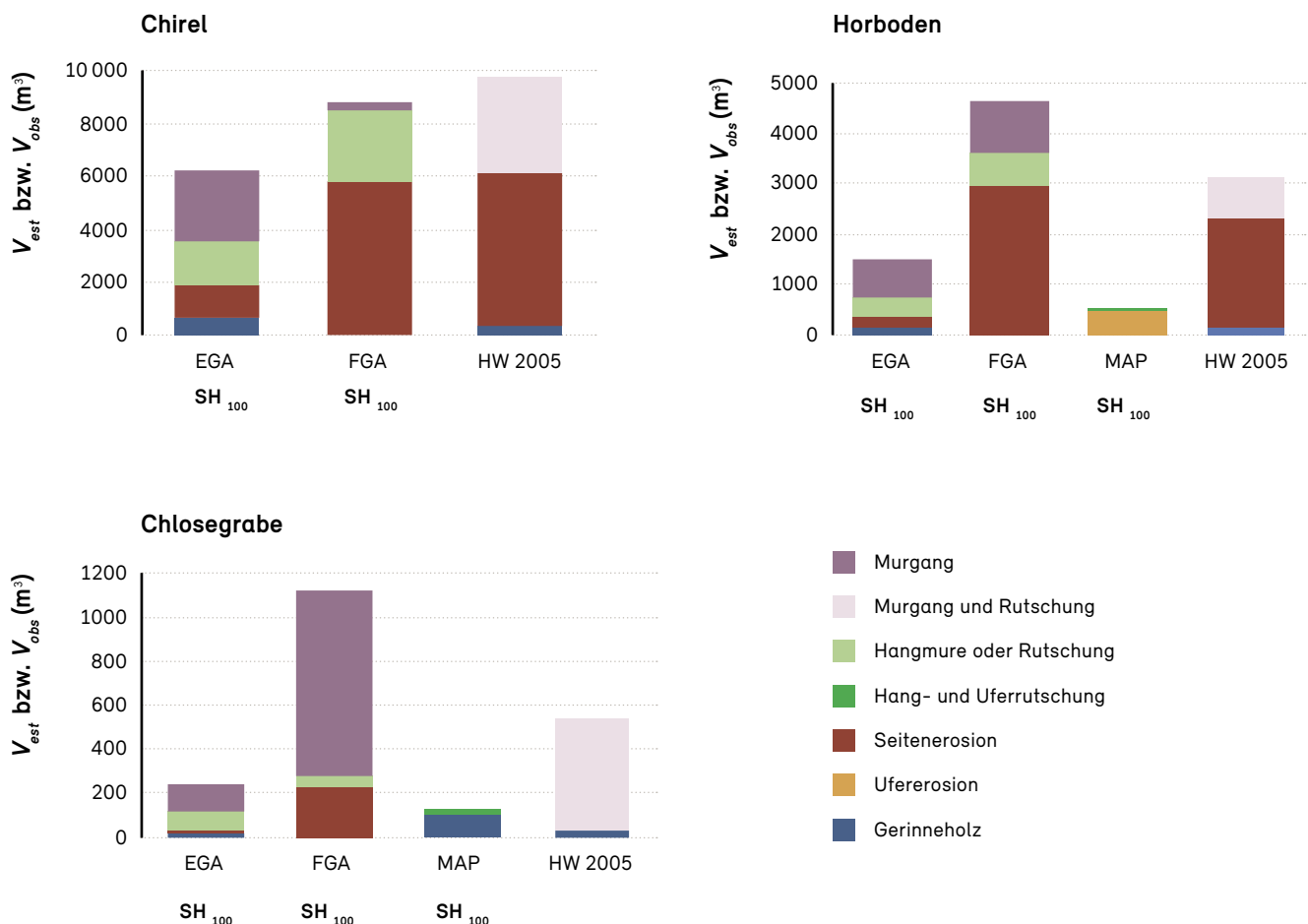
### Prozessdifferenzierung

Es ist festzuhalten, dass sich die Unterscheidung der Schwemmholzfracht nach Eintragsprozess generell

als schwierig gestaltet. Bezüglich der beobachteten SH-Fracht ist die eindeutige Zuweisung auf einen einzigen Eintragsprozess häufig nicht machbar. In Abb. 25 sind Murgang und Rutschung deswegen zusammen ausgewiesen. Bezüglich der drei Ansätze gibt es auch Unterschiede in der Zuordnung der Eintragsprozesse: *BankforMAP* modelliert ausschliesslich (hydraulische) Ufererosion, während die Seitenerosion in den beiden GIS-Ansätzen (EGA und FGA) sowohl Ufererosion als auch Ufer-rutschungen beinhaltet. *SlideforMAP* hingegen modelliert sowohl (geotechnische) Hang- als auch Ufer-rutschungen, während in den beiden GIS-Ansätzen die Hangmuren/Rutschungen aus SilvaProtect-CH implementiert sind (Tab. 6). In Abb. 25 wird diesen fließenden Übergängen der Eintragsprozesse Rechnung getragen.

**Abb. 25: Unterscheidung der Schwemmholzfrachten nach Eintragsprozessen**

Resultate der verschiedenen Modellierungsansätze: Geschätzte Schwemmholzfracht  $V_{est}$ , unterschieden nach Eintragsprozessen für ein 100-jährliches Szenario ( $SH_{100}$ ), bestimmt für drei unterschiedlich grosse (Teil-) Einzugsgebiete des Chirel, und Vergleich mit den beobachteten Schwemmholzfrachten für das Hochwasser im August 2005.



Tab. 6: Prozessdifferenzierung der verschiedenen Modellierungsansätze in *WoodFlow*

| Eintragsprozess                 | Ufererosion | Uferrutschung | Hangrutschung |
|---------------------------------|-------------|---------------|---------------|
| <b>Modellierungsansatz</b>      |             |               |               |
| <i>BankforMAP</i>               | •           |               |               |
| <i>SlideforMAP</i>              |             | •             | •             |
| EGA & FGA<br>Seitenerosion      | •           | •             |               |
| EGA & FGA<br>Hangmure/Rutschung |             |               | •             |

### Vergleich von Fuzzy-Logic und empirischem GIS-Ansatz

Die verschiedenen Eintragsprozesse von Schwemmholz sind sehr komplex und zeigen eine grosse zeitliche und räumliche Variabilität, was die Vorhersage von Schwemmholzfrachten im Allgemeinen schwierig macht. Die beiden hier vorgestellten GIS-Ansätze unterscheiden sich sowohl in der Modellierung des Schwemmholzpotenzials als auch in der Abschätzung der Schwemmholzfracht. Folgende Diskussion veranschaulicht die verschiedenen Annahmen, welche bei der Modellierung der Eintragsprozesse getroffen wurden.

Das Fallbeispiel des Chirel erlaubt alleine noch keine allgemeinen Aussagen in Bezug auf die Qualität der Resultate. Abbildung 26 vergleicht die geschätzten Schwemmholzfrachten der beiden GIS-Ansätze basierend auf den weiteren Fallbeispielen aus Abb. 8 und Abb. 10. Im Allgemeinen sind die geschätzten Schwemmholzfrachten beim FGA grösser als beim EGA (Abb. 26A). Dieser Trend nimmt für grössere beobachtete Schwemmholzfrachten tendenziell ab. Für das Szenario SH<sub>«30»</sub> ist der Unterschied am grössten, beim Szenario SH<sub>«300»</sub> am kleinsten. Wie bereits erwähnt, sind die beiden GIS-Ansätze grundsätzlich so kalibriert, dass  $V_{obs}$  tendenziell überschätzt wird (Abb. 26B). Für den EGA ist dies in Abb. 26B nicht direkt ersichtlich (Werte < 1 betreffen alle Teileinzugsgebiete des Chirel). Der Vergleich basiert hier auf dem Szenario SH<sub>100</sub>. Für das Szenario SH<sub>«300»</sub> stimmen die geschätzten Schwemmholzfrachten des EGA deutlich besser mit den Fallbeispielen des Chirel überein (vgl. Abb. 8C in Kap. 1.2). Für die Gesamtheit aller 33 mit dem EGA untersuchten Gebiete ist im Grundsatz ebenfalls eine Überschätzung von  $V_{obs}$  ersichtlich (Abb. 26C). Der Verhältniswert von

$V_{est}/V_{obs}$  schwankt demnach zwischen 0.3 und 10 (entspricht knapp zwei Grössenordnungen). Im Vergleich zu den empirischen Schätzformeln (vgl. die Anpassungsgüte anhand der Spalten  $\frac{P_{90}}{P_{10}}$  bzw.  $\frac{V_{reg}}{V_{obs}}$  in Tab. 4) sind die Vorhersagen der Schwemmholzfracht mit den GIS-Modellen leicht besser, aber immer noch mit erheblicher Unsicherheit verbunden.

Der Anteil der Eintragsprozesse an der geschätzten Schwemmholzfracht unterscheidet sich ebenfalls zwischen den GIS-Ansätzen. Beim FGA ist häufig die Seitenerosion der massgebende Eintragsprozess, während beim EGA auch Murgänge oder Rutschungen eine wichtige Rolle spielen können (vgl. Abb. 8A in Kap. 1.2 bzw. Abb. 10A in Kap. 1.3). Tendenziell ist der Anteil der Murgänge beim FGA variabler als beim EGA. Hier ist auf die Unterschiede in der Bestimmung der potenziellen Eintragsflächen hinzuweisen. Beim EGA wird sowohl bei den Murgängen als auch bei den Rutschungen durch die gutachterlich definierte Pufferung entlang der SilvaProtect-Trajektorien gewissermassen eine Umhüllende (potenzielle Eintragsfläche) bestimmt, und die geschätzte SH-Fracht hängt dann von den pauschalen Abminderungsfaktoren ab. Im Unterschied dazu wird beim FGA für diese zwei Rekrutierungsprozesse die räumliche Dichte und Verteilung der SilvaProtect-Trajektorien berücksichtigt, und diese Information führt mit einer Entscheidungsmatrix zur geschätzten SH-Fracht (bzw. den «effektiv» beitragenden Flächenanteilen). Bei der Seitenerosion gibt es keine Basisinformation aus SilvaProtect-CH. Beim EGA wird je nach Szenario eine Rückgriffweite proportional zur Gewässerbreite angenommen (Steeb et al., 2019a), und die geschätzte SH-Fracht hängt wiederum von den pau-

schalen Abminderungsfaktoren ab. Beim FGA hängt die seitliche Einflussbreite von der Gerinneneigung und der Sinuosität ab, welche je nach Szenario mit unterschiedlichen Regeln in der Entscheidungsmatrix die geschätzte SH-Fracht bestimmen.

### Empirische Schätzformeln

Das Fallbeispiel des Chirel mit dem Hochwasser vom August 2005 ist ein Extremereignis mit einer ausserordentlich hohen (spezifischen) Schwemmholzfracht (Abb. 27), ausgelöst durch die hohe Intensität, aber auch durch die lange Dauer der Abflüsse (Steeb et al., 2017). Im Vergleich zu anderen Schwemmholzereignissen liegt das Chirel-Beispiel am oberen Rand der Beobachtungen. Mit den allgemeinen Schätzformeln der Gleichungen (1.3) bis (1.12) sind diese Schwemmholzfrachten nicht rekonstruierbar. In diesem Fall erfolgt die Abschätzung besser mit der 90 %-Perzentil-Formel oder sogar mit der entspre-

chenden Worst-Case-Formel (vgl. Tab. 7), deren Werte  $V_{reg}$  grundsätzlich näher bei den geschätzten Schwemmholzfrachten  $V_{est}$  der räumlichen Modellierungsansätze in Abb. 24 liegen (v. a. für die Szenarien  $SH_{100}$  und  $SH_{\infty 300}$ ).

## 1.8 Empfehlungen und wichtige Anmerkungen

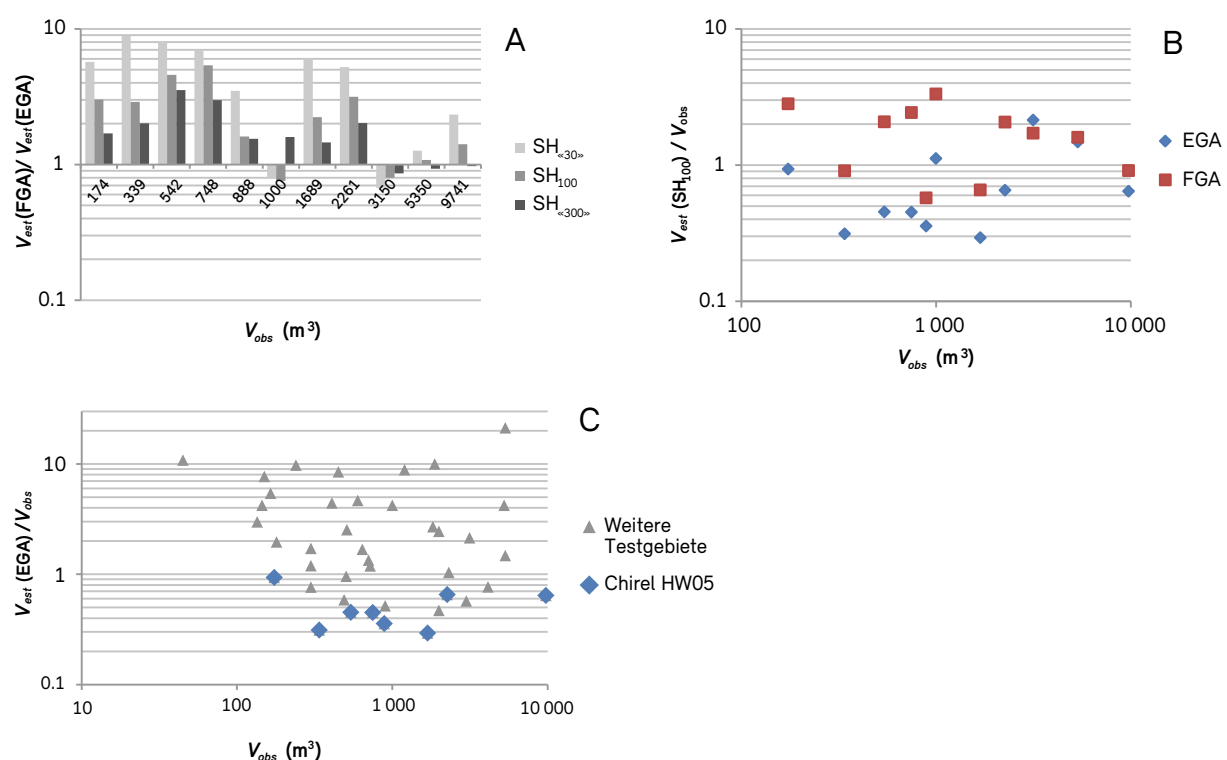
In diesem Abschnitt werden die Anwendungsempfehlungen für die in Kap. 1 vorgestellten Ansätze zusammengefasst. Anhang A3 zeigt zudem eine Übersichtstabelle zu den praktischen Anwendungsbedingungen aller Werkzeuge und Ansätze aus dem Projekt *WoodFlow*.

### Datengrundlage und Anwendungsziele

Die Abschätzverfahren in Kap. 1 eignen sich im Allgemeinen dazu, die potenziellen Eintragsflächen bei einem Hochwasserereignis zu identifizieren sowie die zu erwar-

**Abb. 26: Vergleich der geschätzten Schwemmholzfrachten**

(A) Verhältnis  $V_{est}$  (FGA) zu  $V_{est}$  (EGA) für die drei verschiedenen Szenarien, geordnet nach beobachteten SH-Frachten; (B) Verhältnis  $V_{est}/V_{obs}$  unterschieden nach GIS-Ansatz für das Szenario  $SH_{100}$ ; in Abhängigkeit von  $V_{obs}$ ; (C) Verhältnis  $V_{est}/V_{obs}$  für den EGA in Abhängigkeit von  $V_{obs}$ ; neben den Datenpunkten zum Fallbeispiel Chirel sind auch die Datenpunkte zu den weiteren mit dieser Methode berechneten Testgebieten dargestellt.



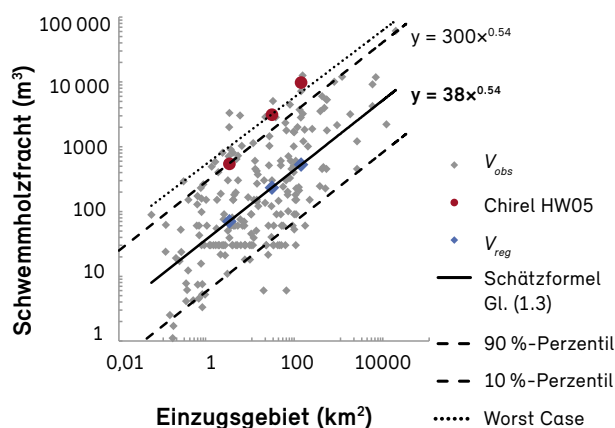
tende Schwemmholzfracht abzuschätzen. Aus praktischer Sicht können solche Abschätzverfahren als Grundlage für wasserbauliche und/oder waldbauliche Massnahmen dienen (Anhang A3). Die hier vorgestellten Ansätze können zudem auch im Zusammenhang mit der Rekonstruktion vergangener Hochwasserereignisse (Ereignisanalysen) angewendet und mit beobachteten Schwemmholzfrachten verglichen werden, wobei jedoch raum-zeitliche Veränderungen der Gerinnemorphologie und der Vegetationsfläche berücksichtigt werden müssen. Des Weiteren werden die Resultate aus Kap. 1 als Input für weiterführende Arbeiten in den Blöcken 2 und 3 verwendet (vgl. Abb. 56 in Anhang 2). Die beiden GIS-Ansätze (EGA und FGA) sowie der probabilistische Ansatz (*Slide/BankforMAP*) führen eine räumlich explizite Analyse durch (Abb. 28), wobei (i) potenzielle Eintragsflächen identifiziert werden, (ii) mithilfe von Holzvorratsangaben das Schwemmholzpotenzial berechnet wird und (iii) durch unterschiedliche Korrekturverfahren auf die Schwemmholzfracht geschlossen wird. Einschränkend ist allerdings anzumerken, dass beim EGA die Eintragsflächen bzw. Schwemmholzfrachten der verschiedenen Rekrutierungsprozesse nur bis auf Stufe Gerinneabschnitt räumlich zugeordnet sind; pro Gerinneabschnitt wird jeweils mit den Abminderungsfaktoren eine pauschale (räumlich nicht explizite) Reduktion der potenziellen Eintragsflächen bestimmt. Beim FGA werden die Entscheidungskriterien für die Prozesswahrscheinlichkeiten hingegen auf der räumlichen Skala der Pixelgrösse angewendet. Die empi-

rischen Gleichungen aus Kap. 1.5 nutzen für die Abschätzung der Schwemmholzfracht verschiedene Kontrollvariablen, die mit  $V_{obs}$  korrelieren, und ergeben einen pauschalen Schätzwert, der nur einem Punkt im Raum zugeordnet ist.

Die GIS-Modelle und probabilistischen Ansätze berechnen jeweils drei verschiedene Szenarien ( $SH_{<30>}$  |  $SH_{100}$  |  $SH_{<300>}$ ), die sich nach der Eintretenswahrscheinlichkeit bzw. Wiederkehrperiode der involvierten Prozesse orientieren. Die beiden GIS-Ansätze modellieren die Eintragsprozesse nicht selbst, sondern basieren auf SilvaProtect-Trajektorien als Inputdaten für die Prozesse Murgang und Rutschung sowie auf einer statistischen (empirischen) Ableitung von Rückgriffweiten für die Seitenerosion und für die Mobilisierung von Gerinneholz. Beim probabilistischen Ansatz (*Slide/BankforMAP*) hingegen wird die Rutschungs- und Ufererosionswahrscheinlichkeit aufgrund

Abb. 27: Einordnung des Chirel-Fallbeispiels

Vergleich zu anderen Schwemmholzereignissen ( $V_{obs}$ ), zusammen mit den Regressionen von Gl. (1.3).



Tab. 7: Anwendung einiger Schätzformeln auf Fallbeispiele

Vergleich der beobachteten Schwemmholzmengen  $V_{obs}$  beim Hochwasser vom August 2005 anhand dreier Teileinzugsgebiete des Chirel und Vergleich mit ausgewählten empirischen Schätzformeln. Die blau eingerahmten Werte von Gl. (1.3) sind auch in Abb. 27 eingetragen.

| $V_{obs}$      |           | Eintrag        | 542      | 3102   | 9741 |
|----------------|-----------|----------------|----------|--------|------|
|                |           | Ablagerung     | 325      | 2448   | 4968 |
|                |           | Export         | 217      | 654    | 4773 |
| Einzugsgebiete |           | Chlosegrabe    | Horboden | Chirel |      |
| Gl. (1.3)      | E         | $V_{reg}$      | 70       | 232    | 524  |
|                |           | 90 %-Perzentil | 555      | 1835   | 4133 |
|                |           | 10 %-Perzentil | 11       | 37     | 83   |
|                |           | Worst Case     | 1008     | 3192   | 6976 |
| Gl. (1.7)      | F         | $V_{reg}$      | 186      | -      | 332  |
|                |           | 90 %-Perzentil | 1305     | -      | 2325 |
|                |           | 10 %-Perzentil | 37       | -      | 66   |
|                |           | Worst Case     | 2207     | -      | 4112 |
| Gl. (1.9)      | $Q_{max}$ | $V_{reg}$      | -        | -      | 377  |
|                |           | 90 %-Perzentil | -        | -      | 1982 |
|                |           | 10 %-Perzentil | -        | -      | 43   |
|                |           | Worst Case     | -        | -      | 3167 |
| Gl. (1.12)     | E * F     | $V_{reg}$      | 143      | -      | 574  |
|                |           | 90 %-Perzentil | 836      | -      | 3117 |
|                |           | 10 %-Perzentil | 28       | -      | 104  |
|                |           | Worst Case     | 1351     | -      | 5467 |

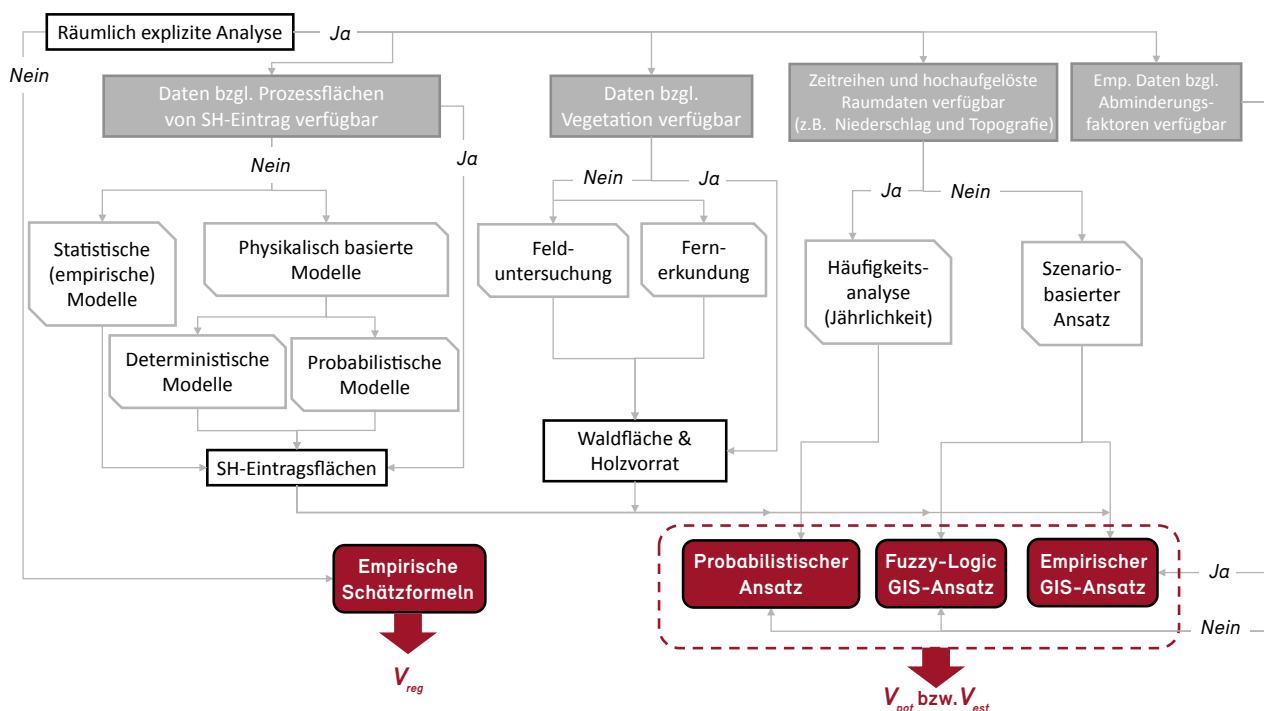
von physikalisch basierten Modellen stochastisch berechnet. Der Bearbeitungsaufwand ist bei diesem Ansatz entsprechend höher. Weiter unterscheiden sich die beiden GIS-Ansätze in Bezug auf die Quantifizierung des Holzvorrats vom probabilistischen Ansatz. *Slide/Bankfor-MAP* verwenden dafür das Einzelbaumerkennungstool FINT, wohingegen für die GIS-Ansätze auf die Holzvorrat-Rasterkarte VHMV zurückgegriffen wird. Das daraus abgeleitete Schwemmholzpotenzial kann entsprechend unterschiedlich ausfallen.

### Potenzielle Fehlerquellen

Die Modellierung von Eintragsprozessen und die Abschätzung von Schwemmholzpotenzial und -fracht sind mit vielen Unsicherheiten verbunden. Die Ansätze aus Kap. 1 erlauben es, die Grössenordnung der zu erwartenden Schwemmholzfracht in einem Einzugsgebiet zu quantifizieren und dabei aus Sicht der Gefahrenbeurteilung eine konservative Schätzung zu machen (d. h. besser eine Überschätzung als eine Unterschätzung der Holzmenge zu machen). Die mit der Abschätzung der Schwemmholzfracht verbundenen Unsicherheiten haben verschiedene Gründe:

- **Dokumentierte Schwemmholzfracht  $V_{obs}$ :** Auch die dokumentierte Schwemmholzfracht ist letztlich eine grobe Abschätzung, welche nicht sehr genau ist. Bei SH-Ablagerungen im Feld muss das Volumen und der entsprechende Holzanteil (bzw. das Porenvolumen) eines Haufens abgeschätzt werden. Falls  $V_{obs}$  aufgrund von Waldverlustflächen bestimmt wird, muss ein Holzvorratswert angenommen werden. In Ereignisberichten fehlt häufig die Angabe, ob es sich bei der dokumentierten Holzmenge um Locker- oder Festvolumen handelt. Ersteres kann je nach Porenvolumen bis zu fünf Mal mehr sein.
- **Waldverlust:** Nach Extremereignissen wie dem August 2005 Hochwasser können beträchtliche Waldflächen, insbesondere entlang des Gerinnes, erodiert worden sein. Solche Verlustflächen dürfen bei einer aktuellen Zustandsanalyse nicht mehr als Schwemmholzpotenzial berücksichtigt werden, falls man mit räumlichen Inputdaten arbeitet (z. B. die Waldfläche als Polygon), die vor dem Ereignis erhoben wurden. Vor der Modellierung müssen solche Waldverlustflächen ausgeschieden werden. Falls die Inputdaten im umgekehrten Fall aktueller sind als das zu rekonstruierende Ereignis,

Abb. 28: Entscheidungsdiagramm für die Anwendung der verschiedenen Ansätze aus Kap. 1



muss die fehlende Waldfläche vor der Modellierung hinzugefügt werden.

- **Eintragsprozesse:** Schwemmholz ist am Ende einer langen Prozesskette. Eine zuverlässige Modellierung der entsprechenden Eintragsprozesse ist mit vielen Unsicherheiten behaftet. Dabei ist es sehr schwierig zu bestimmen, welche potenziellen Eintragsflächen während eines Ereignisses tatsächlich aktiviert werden. Der Anteil der jeweiligen Eintragsprozesse an der Gesamtfracht ist ebenfalls anspruchsvoll nachzubilden. Der Unterscheidung nach Eintragsprozessen sollte aus praktischer Sicht nicht eine zu hohe Priorität gegeben werden. Vielmehr ist für die Gefahrenbeurteilung ist die Gesamtmenge an Schwemmholz relevant.
- **Holzvorrat:** Mit dem Werkzeug FINT und der Holzvorratskarte VHMV stehen zwei räumlich explizite Methoden zur Bestimmung des Holzvorrats in Einzugsgebieten zur Verfügung. Auch hier sind jedoch Unsicherheiten in der Quantifizierung zu erwarten. Basierend auf lokal hoch aufgelösten digitalen Höhenmodellen (DHMs) identifiziert FINT einzelne Bäume als Punkt-Features. VHMV hingegen ist eine schweizweite Rasterkarte, welche jeweils einen Holzvorratswert pro  $25 \times 25$  m Pixel definiert. Tendenziell führt Letzteres zu einem grösseren SH-Potenzial. Das in den Ansätzen berücksichtigte Erhebungsjahr spielt ebenfalls eine Rolle, d. h. je aktueller der Datensatz bzw. je älter der Wald, umso grösser ist tendenziell der Holzvorrat, falls keine forstlichen Eingriffe im Wald stattgefunden haben. Für FINT wurden DHMs aus dem Jahr 2013 benutzt, während VHMV auf digitalen Stereoluftbildern von 2007 bis 2016 basiert (Ginzler et al., 2019).
- **Umrechnung von  $V_{pot}$  zu  $V_{est}$ :** Die Bestimmung des Anteils am modellierten SH-Potenzial das tatsächlich als Fracht im Gerinne transportiert wird, ist ebenfalls mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Während der EGA dazu Erfahrungswerte aus früheren Ereignissen (Abminderungsfaktoren je Szenario) nutzt, verwendet der FGA Entscheidungsmatrizen. Beide Ansätze können flexibel angepasst werden. *Slide/BankforMAP* verwendet für die Umrechnung von  $V_{pot}$  zu  $V_{est}$  die berechneten Rutschungs- und Ufererosionswahrscheinlichkeiten.
- **Szenarien:** Um den oben aufgelisteten Unsicherheiten gerecht zu werden, berechnen die Modelle unterschiedliche Szenarien. Auf diese Weise lässt sich die Bandbreite der möglichen Schwemmholzfrachten aufzeigen.

Dazu ist anzumerken, dass lediglich das Szenario SH<sub>100</sub> mit empirischen Daten abgestützt ist (vgl. Abschnitt 1.1.3). Die Szenarien SH<sub>30</sub> und SH<sub>300</sub> beinhalten Ad-hoc-Annahmen. Wie am Beispiel des Hochwassers 2005 dargelegt, ist die Abflussspitze eines Ereignisses nicht alleine für die auftretenden Schwemmholzfrachten ausschlaggebend. Auch die Dauer des Hochwassers ist von grosser Bedeutung (vgl. auch Abb. 17 und Diskussion dazu in Kap. 1.5).

### Gültigkeitsbereiche/Skalen

Der EGA zeigt für Einzugsgebiete einer Grösse von 5 bis 200 km<sup>2</sup> die besten Resultate. In kleineren Gebieten können sporadisch auftretende Eintragsprozesse (Rutschungen oder Murgänge) zu einer Unterschätzung der tatsächlichen SH-Fracht führen. Bei grösseren Einzugsgebieten nimmt die Unsicherheit zu, und das SH-Potenzial wird sehr gross, was tendenziell zu einer Überschätzung der Schwemmholzfracht führt. In solchen Fällen sind gutachterliche Beurteilungen und/oder Feldbegehungen hilfreich, um die schwemmholzrelevanten Teileinzugsgebiete weiter eingrenzen zu können. Typische Fragen in diesem Zusammenhang sind: Ist die Konnektivität des Fließgewässers gegeben bzw. gibt es Rückhaltestrukturen (Rechen, Geschiebebecken oder Seen als Schwemmholzspeicher)? Welche Gebiete sind geomorphologisch besonders aktiv? Für aktivere Teileinzugsgebiete wie z. B. Wildbäche empfiehlt sich für eine genauere Beurteilung der möglichen Schwemmholzfracht eine Feldbegehung mit einer detaillierten Einschätzung der potenziellen geomorphologischen Prozessaktivitäten, so wie das typischerweise auch für die Abschätzung der Geschiebe- bzw. Murgangfracht eines Wildbachereignisses gemacht wird.

Beim FGA ist bei grossen Einzugsgebieten (> 100 km<sup>2</sup>) generell auch eine Überschätzung der Schwemmholzfracht feststellbar. Bei kleineren Einzugsgebieten (< 30 km<sup>2</sup>) zeigt sich, je nach Ereignis, sowohl Unter- als auch Überschätzung der Schwemmholzfracht. Solche Differenzen zwischen  $V_{obs}$  und  $V_{est}$  sind bis zu einem gewissen Grad zu erwarten, da die hier vorgestellten GIS-Methoden nicht ein spezifisches Schwemmholzereignis zu rekonstruieren versuchen.

Im Vergleich zu den GIS-Ansätzen wird *Slide/BankforMAP* vor allem für kleinräumige Modellierungen angewendet. Aufgrund der Rechenzeit eignet sich das probabilistische Modell für Einzugsgebiete mit einer Fläche von ca. 1 bis 50 km<sup>2</sup>.

Der Gültigkeitsbereich der empirischen Schätzformeln aus Kap. 1.5 lässt sich im Allgemeinen durch die Bandbreite der verwendeten Kontrollvariablen eingrenzen. So liegt z. B. der Anwendungsbereich von Gl. (1.3) bei Einzugsgebietsgrößen zwischen 0.1 bis ca. 5000 km<sup>2</sup>. Genauere Angaben zum Gültigkeitsbereich der zehn empirischen Schätzformeln sind in Steeb et al. (2019b) zu finden.

#### Allgemeine Bemerkungen zum empirischen GIS-Ansatz

Mit zunehmender Einzugsgebietsgröße nimmt das Verhältnis von beobachteter zu potenzieller Schwemmholzfracht ( $V_{obs}/V_{pot}$ ) tendenziell ab (Abb. 8, Kap. 1.2). Diese Verhältniswerte können mit den Abminderungsfaktoren  $f_{abm} = V_{est}/V_{pot}$  verglichen werden, welche pro Teilprozess (und Szenario) als konstant angenommen wurden (d. h. sie sind von der Einzugsgebietsgröße unabhängig). Dadurch ergibt sich eine Tendenz, dass das Modell die Schwemmholzfrachten bei Gebieten größer als ca. 200 km<sup>2</sup> hauptsächlich überschätzt. Ein Problem bei den Modellannahmen liegt darin, dass mit zunehmender Größe eines Einzugsgebiets nicht alle Bereiche mit der gleichen (lokal stärksten) Niederschlagsintensität überregnet werden. Eine räumlich variable Niederschlagsintensität führt auch zu räumlich unterschiedlich starken geomorphologischen Intensitäten der beiden wichtigen Eintragsprozesse Murgänge und Hangrutschungen. Die Ufererosion hingegen hängt mehr vom Abfluss und von den lokalen Gerinnecharakteristika ab. Das ist der Grund, weshalb für den Prozess Murgang eine generelle Reduktion der potenziellen Eintragsflächen auf etwa 5 bis 30 % implementiert ist. Im Gegenzug kann dies bei sehr kleinen Einzugsgebieten zu einer Unterschätzung der Schwemmholzfracht führen: Gemäss Abb. 7 werden für kleinere Gebiete bis 5 km<sup>2</sup> die Schwemmholzfrachten bei einem mittleren Abminderungsfaktor von 0.05 bis 0.1 für ein SH<sub>100</sub> Szenario in den meisten Fällen unterschätzt. Tatsächlich sind in solchen Fällen die Werte von  $V_{obs}/V_{pot}$  mehrheitlich größer als dieser mittlere Abminderungsfaktor.

#### Allgemeine Bemerkungen zum Fuzzy-Logic GIS-Ansatz

Der Fuzzy-Logic GIS-Ansatz erlaubt eine Definition der potenziellen Eintragsflächen basierend auf der Wahrscheinlichkeit, dass aus diesen Flächen Schwemmholz mobilisiert wird. Der Mobilisierungsgrad wiederum wird durch die drei definierten Szenarien festgelegt. Insofern eignet sich die Fuzzy-Logic Theorie vorab bei ungenauen Daten, grossen Unsicherheiten, der Modellierung von nichtlinearen Funktionen beträchtlicher Komplexität und für die Berücksichtigung von gutachterlichen Experten-kriterien. Die Festlegung der Fuzzy-Logic Regeln basierte auf vorhandenen Eingangsdaten und einer Kalibration mittels der beobachteten Schwemmholzfrachten während der Hochwasser im August 2005. Da der FGA sehr flexibel ist, können die Regeln und Eingangswerte jederzeit angepasst werden. Der Vergleich der modellierten mit den beobachteten Schwemmholzfrachten  $V_{est}/V_{obs} > 0.3$  (Abb. 26B) deutet darauf hin, dass der Ansatz verlässliche Resultate liefert, wenn auch Volumina tendenziell überschätzt werden, besonders in kleineren Einzugsgebieten (< 30 km<sup>2</sup>). Bei der Definition der Eintragsflächen aus Hangrutschungen und Murgängen wurden die SilvaProtect-Trajektorien verwendet (so wie beim EGA), alternative Eingangsdaten sind jedoch auch denkbar. Die größten Unsicherheiten bestehen bei der Ufererosion, deren Rolle im Modell allgemein überschätzt wird. Hier könnten zusätzliche Daten die Unsicherheiten abmildern. Denkbar wären etwa der Einbezug geomorphologischer Karten mit Angaben zur Mächtigkeit der Uferböschungen und die maximale Abflusskorridorbreite als Indikatoren der maximal erodierbaren Flächen, oder Verbauungen entlang der Ufer, welche seitliche Ausdehnungen verhindern können.

#### Allgemeine Bemerkungen zu *SlideforMAP* und *BankforMAP*

Die Ansätze *Slide/BankforMAP* modellieren die Prozesswahrscheinlichkeit von flachgründigen Rutschungen, Uferrutschungen und Ufererosion. Unscharfe Prozessgrenzen können durch die Verwendung probabilistischer Ansätze bis zu einem bestimmten Grad berücksichtigt werden. Zusätzlich werden bei der Abschätzung des Schwemmholzpotenzials und der Schwemmholzfracht spezifische Eigenschaften der Vegetation (Wurzelverstärkung) berücksichtigt, welche einen direkten Einfluss auf die Eintragsprozesse haben. Aufgrund der geringen Anzahl benötigter Inputdaten ermöglichen *Slide/Bank-*

forMAP eine rasche Abschätzung des SH-Eintrags für kleinere bis mittelgrosse Einzugsgebiete. Weiter können anhand der Modellergebnisse Standorte identifiziert werden, wo waldbauliche Massnahmen den potenziellen Eintrag zu reduzieren vermögen. Einzig die Schätzung des Bodentyps und der mittleren Korngrössenverteilung kann sich als zeitaufwendig erweisen, sodass sich eine Feldbegehung nicht vollumfänglich ersetzen lässt.

### Allgemeine Bemerkungen zu den empirischen Schätzformeln

Die hier vorgestellten Gleichungen (1.3) bis (1.12) in Form von Potenzfunktionen schätzen alle die Schwemmholzfracht in Festmetern ab. Frühere empirische Gleichungen von Rickenmann (1997) sind in Lockervolumen angegeben. Für die Umrechnung von Lockervolumen in Festvolumen eignet sich in diesem Fall ein Auflockerungsfaktor  $\alpha = 3.3$ . Zu beachten ist auch, dass gewisse Gleichungen von Rickenmann (1997) wie im vorliegenden Bericht die Schwemmholzfracht beschreiben, andere hingegen schätzen das potenziell mobilisierbare (Tot-) Holz ab, das im Gerinne oder in bachnahen Bereichen zur Mobilisierung bereitliegt. Mit der in *WoodFlow* erarbeiteten umfangreichen Schwemmholzdatenbank konnte die statistische Aussagekraft der Schätzformeln im Vergleich zu Rickenmann (1997) deutlich erhöht werden. Generell weisen die verwendeten Datensätze jedoch eine grosse Streuung auf. Schätzformeln für verschiedene Perzentilwerte (vgl. Tab. 4) erlauben die Abschätzung einer Bandbreite möglicher Schwemmholzfrachten. Diese Varianten können helfen, die Unsicherheit in der Quantifizierung der Holzmenge besser beurteilen zu können.

### Fazit

Im Rahmen von *WoodFlow* stehen für die Abschätzung von Schwemmholzpotenzial und -fracht verschiedene Ansätze und Werkzeuge zur Verfügung. Für eine zuverlässige Quantifizierung der Holzmenge sollten die verschiedenen Ansätze kombiniert angewendet werden, ähnlich wie dies auch bei der Hochwasserabschätzung in ungemessenen mittelgrossen sowie kleinen Einzugsgebieten vorgeschlagen wird (BWG, 2003). Am einfachsten und schnellsten erfolgt die Anwendung der empirischen Schätzformeln zwecks einer ersten Einordnung der Lage. Für eine räumlich explizite Modellierung potenzieller Eintragsflächen sowie eine detailliertere Abschätzung der Schwemm-

holzfracht eignen sich in einem nächsten Schritt die GIS-Ansätze sowie *Slide/BankforMAP*.

Von der Bearbeitungstiefe bzw. vom Detaillierungsgrad her entsprechen die räumlich expliziten Modellierungsansätze am ehesten einer Gefahrenhinweiskarte. Aufgrund der Unsicherheiten in der Prozessmodellierung handelt es sich somit um grobe räumlich explizite Abschätzungen potenzieller Eintragsflächen ohne genaue Angaben über die dabei auftretenden Intensitäten. Die geschätzten Schwemmholzfrachten hingegen sind für das Szenario SH<sub>100</sub> über die Reduktion des Schwemmholzpotenzials basierend auf den Daten von Ereignissen mit einer Jährlichkeit von ca. 50 bis 150 Jahren abgestützt. Die hier vorgestellten Werkzeuge sind Hilfsmittel für eine flächendeckende Übersicht und lenken den Blick auf Gebiete, in denen eine genauere Beurteilung der Schwemmholzsituation nötig ist, beispielsweise mithilfe der vorgeschlagenen Bachtypisierung (Kap. 1.6) oder im Zusammenhang mit einer Abschätzung der Feststofffrachten in Wildbachgebieten. Die verschiedenen Abschätzverfahren aus Kap. 1 können die Feldarbeit (z. B. Geländeaufnahmen oder gutachterliche Begehungen) somit nicht ersetzen, sondern sollten komplementär dazu angewendet werden.

## 2 Transport, Verkleinerung und Ablagerung von Schwemmholz

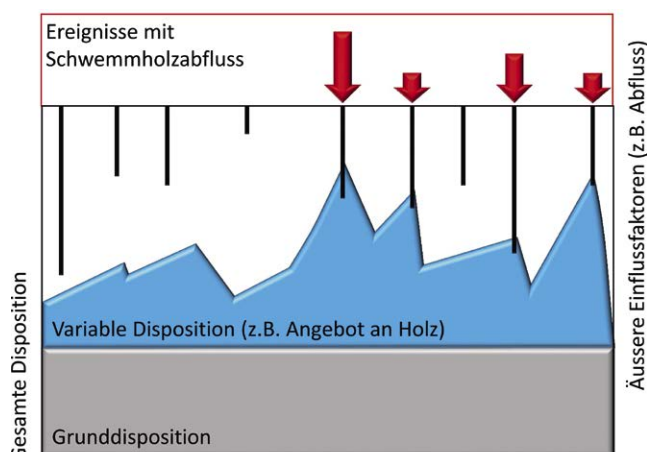
Das folgende Kapitel erarbeitet Grundlagen zur Schwemmholzdynamik im Gerinne und fokussiert auf die geomorphologischen und fluvialen Prozesse, welche die Mobilisierung, den Transport und die Ablagerungsprozesse innerhalb des Gewässernetzes steuern. Hier besteht nach wie vor Forschungsbedarf; die Resultate in Kap. 2 geben den aktuellen Stand der Forschung wieder. Die vorliegenden Erkenntnisse verbessern die wissenschaftlichen Grundlagen zu Transportregime und -kapazität (Kap. 2.1), dienen aber auch der Abschätzung der Holzabmessungen (z. B. Länge und Durchmesser) sowie der Verkleinerung von Schwemmholz während des Transports (Kap. 2.2) und können so als Eingangsgrößen in die Verklausungsberechnungen von Kap. 3 einfließen. Empirische Analysen zum Schwemmholzspeicher in Schweizer Flüssen (Kap. 2.3) dienen als Eingangsvariablen der GIS-Ansätze in Kap. 1. Des Weiteren werden Möglichkeiten der Schwemmholztransport-Modellierung mit Iber-Wood dargestellt (Kap. 2.4), wie sie bei Projekten zum Zug kommen könnten, in denen Modellversuche wie in Kap. 3 nicht vorgesehen sind. Schliesslich stellen die verschiedenen Monitoring-Methoden in Kap. 2.5 eine Alternative zu den Abschätzmethoden in Kap. 1 dar, insbesondere hinsichtlich der Beurteilung einzelner Gefahrenstellen. Die Ansätze und Methoden in Kap. 2 wurden entweder mit Hilfe weltweit verfügbarer Daten erarbeitet oder aber anhand von Fallbeispielen in der Schweiz getestet (vorab Zulg, Emme, und Sense).

### 2.1 Schwemmholztransport

Der Schwemmholztransport in Fließgewässern hängt von mehreren Faktoren ab. Dazu gehören die Hydraulik (Fließregime), die Geomorphologie des Gerinnes sowie des Vorlandes und die Grösse und Form der Baumstämme. Der Holztransport während eines Hochwassers lässt direkte Messungen nur bedingt zu, was zu einem lückenhaften Verständnis des Schwemmholztransports führt.

Da in den letzten Jahren vier Abflussereignisse (2012, 2013, 2015 und 2016) mit viel Schwemmholz bzw. mit Schwemmholzteppichen (engl.: wood-laden flows, WLFs, siehe auch Kap. 2.1.1) an der Zulg beobachtet werden konnten, bietet sich in diesem Untersuchungsgebiet eine einzigartige Gelegenheit zur Analyse dieser Ereignisse und zum besseren Verständnis der Kaskadenprozesse. Diese WLFs wurden unter Berücksichtigung von Niederschlags- und Abflussdaten detailliert dokumentiert. Die Niederschlagssummen und -verteilungen im Einzugsgebiet waren während der vier Ereignisse sehr unterschiedlich, sodass unterschiedliche Bereiche betroffen waren. Die Ereignisse der letzten Jahre an der Zulg zeigen, dass eine grosse Menge an Schwemmholz bei unterschied-

**Abb. 29: Konzeptuelles Modell für die Disposition von Schwemmholzteppichen (WLFs) in Anlehnung an das Dispositions-konzept für das Auftreten von Murgängen gemäss Zimmermann et al. (1997)**  
Das Auftreten von (WLFs) ergibt sich aus der Kombination der Grunddisposition (die über die Zeit konstant bleibt wie z. B. das Einzugsgebiet), der variablen Disposition (die sich in kurzen Zeitintervallen ändert wie z. B. die Verfügbarkeit von Schwemmholz oder die Lieferung von Holz ins Gerinne durch unterschiedliche Prozesse) und von externen Faktoren wie dem Abfluss im Gerinne. Die roten Pfeile stehen für WLFs unterschiedlicher Stärke.



lichen Strömungsbedingungen transportiert werden kann und dass der Abfluss nicht der einzige Faktor für den Schwemmholztransport ist. Auch zeitliche Faktoren wie der Verlauf der Hochwasserganglinie und die jüngste Geschichte hoher Abflüsse beeinflussen das Mobilisierungs- und Transportregime für Schwemmholz. Nach einem Holzschlag spielt das erste erhebliche Hochwasser in Bezug auf den Schwemmholzeintrag eine verhältnismässig grosse Rolle, während nachfolgende Hochwasserereignisse, unabhängig von ihrer Stärke, ohne grossen Effekt ausfallen können. Dies scheint beim Ereignis im Jahr 2015 der Fall gewesen zu sein, welches zwar einen höheren Abfluss aufwies als das Ereignis im Jahr 2012 (234 vs. 222 m<sup>3</sup>/s), bei dem aber weniger Schwemmholz transportiert wurde (350 vs. 600 m<sup>3</sup>). Aufgrund dieser Ergebnisse wurde das Konzept der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von WLFs entwickelt, welches auf einem für das Auftreten von Murgängen vorgeschlagenen Konzept der zeitlichen Disposition und Anfälligkeit basiert (Zimmermann et al., 1997; Abb. 29).

Der Schwemmholztransport nimmt nicht linear mit zunehmendem Abfluss zu, sondern steigt stufenweise. Er beginnt meist erst beim Erreichen eines gewissen Abflusses (Schwelle 1 in Abb. 30A), der als Verhältnis zum bordvollen Abfluss, als absoluter Wert oder als Hochwasserspitze eines bestimmten Ereignisses ausgedrückt werden kann. Dann nimmt der Schwemmholztransport bis zu einem bestimmten Abfluss, der in der Regel höher ist als die Abflusskapazität des Gerinnes (Schwelle 2 in Abb. 30A), graduell zu und flacht dann wieder ab. Für einen erneuten signifikanten Anstieg des Schwemmholztransports wäre nochmals ein deutlich stärkerer Abfluss notwendig. Der für den Transportbeginn notwendige Abfluss ist abhängig von der Länge und des Durchmessers der zu transportierenden Schwemmholzstücke (Abb. 30B). Im Allgemeinen werden kleine Stücke leichter transportiert als grössere Stücke. Nebst den Dimensionen des Schwemmholzes ist der Transport auch abhängig von den Fließbedingungen, die wiederum von der Gewässer-morphologie bestimmt werden (Abb. 30B), von der Holzdichte, die den Auftrieb beeinflusst sowie von möglichen vergangenen Hochwasserereignissen, bei denen Holz im Gerinne abgelagert wurde. Die Schwemmholztransportrate ist gekennzeichnet durch eine Hysterese, wobei mehr Holz während des aufsteigenden Astes der Hochwasser-

ganglinie transportiert wird als während des abfallenden Astes (Abb. 30C).

### 2.1.1 Transportregime: Eine neue Beschreibung des Schwemmholzabflusses

Die Ergebnisse des *WoodFlow*-Projekts lassen eine neue Beschreibung und Charakterisierung von Schwemmholzabflüssen (WLFs) zu. Das Phänomen war zwar schon vorher bekannt, wurde jedoch unterbewertet, was zu einem lückenhaften Prozessverständnis führte. Abgeleitet von einer systematischen Analyse diverser Amateurvideos (Ruiz-Villanueva et al., 2019b), können Schwemmholzabflüsse konzeptionell in vier Fließphasen eingeteilt werden (Abb. 31A–B). Diese neuartige Klassifikation wird auch in Kap. 3.5 verwendet für die Abschätzung des Teilfreibords aufgrund von Schwemmholztransport bei Brücken.

**Vollgesättigter Schwemmholzabfluss:** Das Holz bewegt sich als eine Masse, die die gesamte Abflussbreite umfasst und den Grossteil des Abflussprofils füllt. Die Holzstücke stehen in direktem Kontakt zueinander, wobei sie sich in der Masse drehen und bewegen. Die meisten Stücke sind senkrecht zur Fließrichtung ausgerichtet. In den Videos konnten zwei Kategorien des vollgesättigten Schwemmholzabflusses beobachtet werden:

**Nicht benetzte oder trockene Holzfront:** Aufgrund einer dichten, trockenen/nicht benetzten Holzfront und der kontinuierlich steigenden Ganglinie wird das Wasser quasi aufgestaut und schiebt das Holz wie eine Planierdraupe im Gerinnebett vor sich her. Das Wasser ist zu diesem Zeitpunkt von vorne kaum oder nicht sichtbar. Hinter der Holzfront folgt Wasser, welches die Stämme eintauchen oder sich drehen und wenden lässt. Die Masse setzt sich aus einer oder mehreren Schichten aus Holz zusammen, wobei sich die Holzstücke «schuppenartig» übereinander schieben.

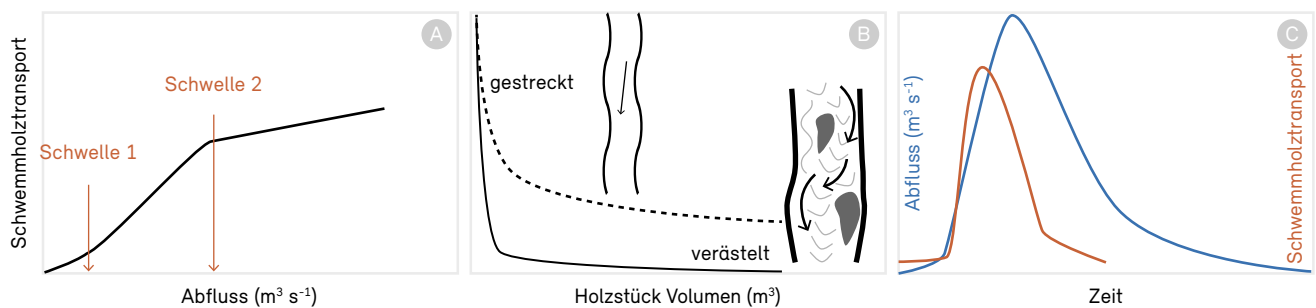
**Benetzte oder nasse Holzfront:** Der Holzfront geht eine Welle voraus (vorauslaufender Schwall). Die Ganglinie steigt rasch an, und das Schwemmholz beginnt auf dem Wasser aufzuschwimmen. Es beginnt sich eine im Wasser schwimmende, einheitliche Holzmasse zu bilden, wobei sich die einzelnen Stücke drehen und rotieren.

**Gesättigter Schwemmholzabfluss** oder kompakter Teppich: Dies ist die bekannteste Form des Schwemmholztransportes, in welcher Baumstämme eng beieinander und über eine grosse Fläche verteilt auf dem Wasser treiben. Sie wurde von Braudrick et al. (1997) definiert als Holz,

welches sich als eine Masse fortbewegt, die mindestens 33 % der Gerinnefläche einnimmt. Die Freiräume zwischen den einzelnen Stämmen sind klein, wobei sich die Stämme oft berühren und dadurch unfähig sind, sich unabhängig von der Masse zu bewegen. Rotation und Drehung einzel-

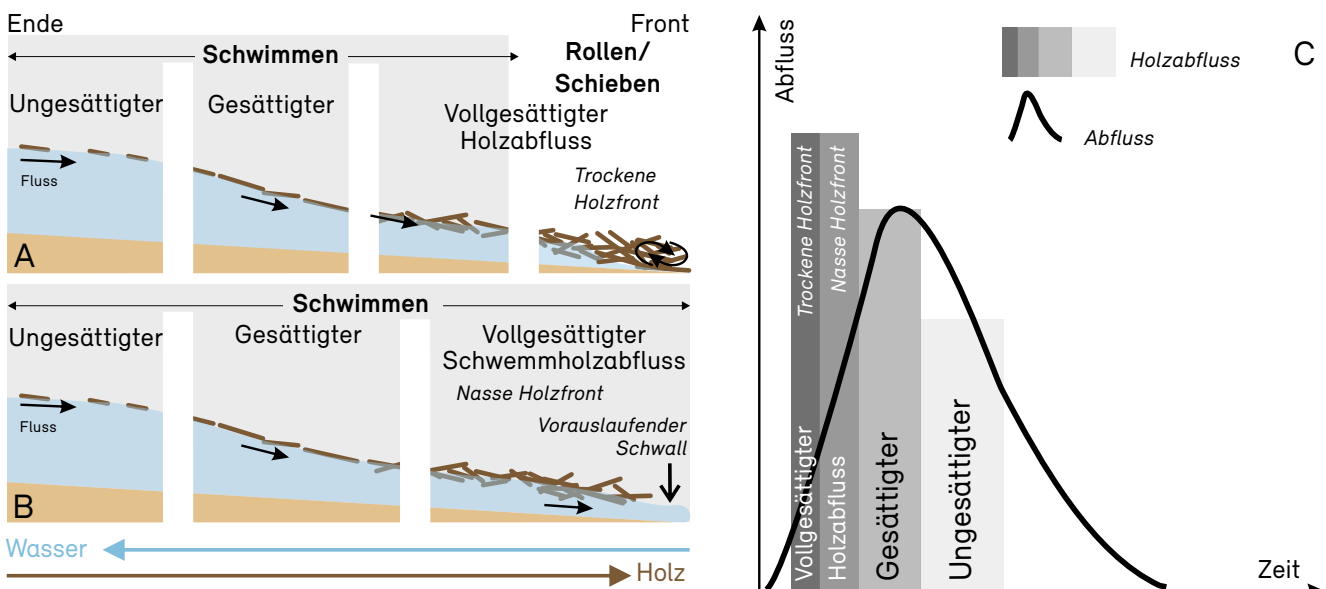
**Abb. 30: Konzeptionelles Modell für den Schwemmholztransport**

(A) Zusammenhang zwischen dem Hochwasserabfluss und dem Schwemmholztransport (im Text erläuterte Schwellenwerte); (B) Beziehung zwischen dem Holzvolumen (in  $m^3$  = Holz mit unterschiedlichen Grössen) und dem Schwemmholztransport; (C) Beziehung zwischen dem Abfluss (blau) und dem Schwemmholztransport (orange). Schwemmholztransport kann in diesem Zusammenhang gemessen werden als Verhältnis (Output/Input, gemäss Definition aus Ruiz-Villanueva et al., 2016c), als Anzahl transportierte Schwemmholzstücke oder als Transportdistanz.



**Abb. 31: Die vier Phasen des Schwemmholzabflusses**

(A) Mit trockener, rollender und gleitender Front und (B) wenn die Front benetzt ist und ihr eine Welle vorangeht. (C) Konzeptionelles Modell für die Beziehung zwischen der Abflussganglinie und dem Schwemmholzabfluss. Die vollgesättigte Phase bildet sich vor der Abflussspitze aus; knapp vor oder während der Hochwasserspitze findet der Transport der gesättigten Phase statt, und auf dem abfallenden Ast der Ganglinie fliesst das Holz ungesättigt ab.



ner Stämme sind daher selten. Viele der Holzstämme richten sich in Fließrichtung aus. Besonders an den Rändern können sie aber auch senkrecht dazu fließen.

**Teilgesättigter Schwemmholzabfluss** oder loser Teppich: Die gesättigte Phase kann graduell über eine teilgesättigte Phase, in welcher sich manche der Holzstämme als Individuen, andere als Gruppen fortbewegen, zur ungesättigten Phase übergehen (Braudrick et al., 1997). Die Schwemmholzmenge im Abflussquerschnitt verringert sich, und die scheinbar einheitliche Masse zerfällt.

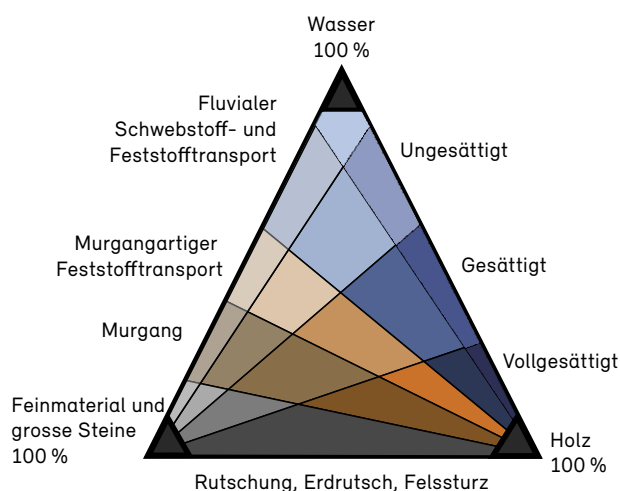
**Ungesättigter Schwemmholzabfluss** oder Einzelhölzer: In dieser Phase gibt es gemäss der Definition von Braudrick et al. (1997) nur wenige oder gar keine Berührungen zwischen den Holzstämmen, wobei diese weniger als 10 % der Gerinnefläche einnehmen. Die Holzstämme reagieren auf Hindernisse und auf über den Querschnitt variierende Fließgeschwindigkeiten mit Rotation und Drehung, wobei die Bewegungen unabhängig von anderen Holzstämmen erfolgen.

Gemäss der vorliegenden Ergebnisse können WLFs in unterschiedlichen Einzugsgebieten vorkommen. Häufig treten sie in steilen, stark eingegengten und nicht verästelten Gerinnen auf. WLFs sind in der Regel instabil und die Bewegungen der Baumstämme sind unregelmässig, was

auch bei anderen sedimenthaltigen Abflussphänomenen beobachtet werden kann. Aufgrund der Videos und der analysierten Ereignisse fand der grösste Holztransport bei ausnahmslos allen Ereignissen zeitlich vor der Hochwasserspitze statt. Basierend auf diesen Beobachtungen wurde ein konzeptionelles Modell für die Beziehung zwischen der Hochwasserganglinie und dem Schwemmholzabfluss entwickelt (Abb. 31C). Während des absteigenden Astes der Abflussganglinie eines Hochwassers ist der Schwemmholzabfluss in der Regel ungesättigt und weist bei ähnlichen Abflussmengen wie beim ansteigenden Ast kleinere Holzmengen auf. Diese Beobachtung impliziert eine Hysterese des Schwemmholztransportes in Funktion des Abflusses im Uhrzeigersinn.

Das Fließverhalten eines Abflusses ist unter anderem abhängig von den relativen Anteilen seiner Komponenten, und Holz sollte deshalb in eine entsprechende Klassifizierung einbezogen werden. Falls nämlich Holz als feste Komponente im Abfluss vorkommt, ist ein anderes Fließverhalten zu erwarten. Für die Klassifizierung wird deshalb ein dreiteiliges Diagramm vorgeschlagen, mit dessen Hilfe die Abflüsse nach ihrem Gehalt an Sedimenten, Wasser und Holz eingeordnet werden können (Abb. 32). Für das Einzugsgebiets- und Hochwasserrisikomanagement eines Fließgewässers ist das Wissen um die Disposition des Gerinnes zu Schwemmholzabflüssen unerlässlich. Die in Abb. 32 gezeigten Abflusstypen stellen auch für die Planung von Bauwerken für den Schwemmholzurückhalt (Lange & Bezzola, 2006; Piton & Recking, 2015) wie Rechen, Netze oder Sammler eine wichtige Grundlage dar. Für ein solides Hochwasserrisikomanagement ist jedoch eine ganzheitliche Betrachtung des gesamten Einzugsgebiets notwendig, einschliesslich der Berücksichtigung von nichtbaulichen Massnahmen.

**Abb. 32: Dreiecksdiagramm für verschiedene Abflusstypen mit Sediment, Wasser und Holz**



Grafik: Adaptiert nach Ruiz-Villanueva et al. (2019b)

### 2.1.2 Transportkapazität von Schwemmholz

Ein weiterer wichtiger Aspekt sind die räumlichen Unterschiede im Auftreten oder Vorkommen des Schwemmholztransports innerhalb des Gewässernetzes. Unter diesem Blickwinkel bietet das Konzept der Transportkapazität (Wainwright et al., 2015), das üblicherweise für den Transport von Geschiebe verwendet wird, einen hilfreichen Ansatz, um den Schwemmholztransport innerhalb des Flussnetzes zu analysieren. Die Geschiebetransportkapazität bezieht sich normalerweise auf die maximale

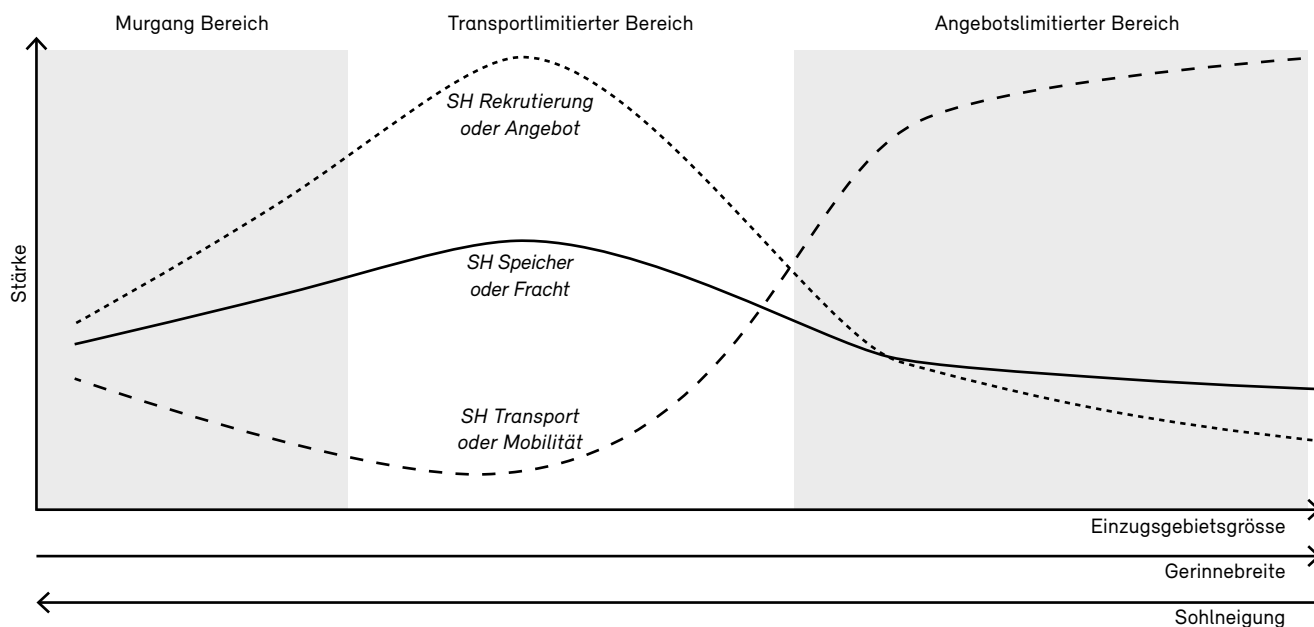
Geschiebemenge oder die maximale Korngrösse, die bei einem bestimmten Abfluss in einem definierten Gerinneabschnitt transportiert werden kann. Darüber hinaus kann die Geschiebetransportkapazität als das Gleichgewicht zwischen der Rate der Geschiebezufuhr und der Transportrate verstanden werden. Für die Berechnung der Transportkapazität von Schwemmholz wären Messungen und empirische Daten notwendig. Es gibt jedoch einfache Berechnungsansätze, mit denen das Transportpotenzial eines Gerinnes qualitativ abgeschätzt werden kann. Dafür wurden dimensionslose Verhältniszahlen definiert, die den Holztransport beschreiben, wie z. B. die relative Holzeintragsrate  $Q^*$ . Sie setzt sich zusammen aus der volumetrischen Holzeintragsrate dividiert durch den Reinwasserabfluss. Analog lässt sich die relative Stammlänge  $L^*$  (Stammlänge dividiert durch Gerinnebreite) und der relative Stammdurchmesser  $D^*$  (Stammdurchmesser dividiert durch die durchschnittliche Gerinnetiefe) definieren. Generell kann gesagt werden, dass die Transportkapazität von Schwemmholz für  $L^* < 0.5$  erhöht ist, was jedoch auch abhängig von der Gerinnemorphologie ist, die im Gewässernetz stark variieren kann. Zudem schwimmt Schwemmholz, solange  $D^*$  nicht unter einen kritischen

Wert fällt, der unter anderem auch von der Holzdichte abhängt. Unter der Annahme einer Holzdichte von etwa  $500 \text{ kg/m}^3$  liegt der kritische Wert z. B. bei rund 0.5, wobei er je nach Froude-Zahl variieren kann (Lange & Bezzola, 2006; Braudrick und Grant, 2001). Zusammen mit Angaben zum Schwemmholzeintrag können diese Berechnungsansätze für die Ermittlung der Transport- und Ablagerungsabschnitte entlang des Gewässernetzes verwendet werden.

Abb. 33 zeigt ein konzeptionelles Schema, mit welchem Schwemmholztransport- und Ablagerungsabschnitte innerhalb des Gewässernetzes in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgrösse, der Gerinnebreite und der Gerinneigung bestimmt werden können. Darin werden steile Wildbäche, in welchen Murgänge dominieren, ebenfalls berücksichtigt. Gemäss dem Schema sind in kleinen bis mittleren Einzugsgebieten nur bei relativ starken Hochwassern grössere Schwemmholzfrachten zu erwarten, da, obwohl genügend Schwemmholz vorhanden ist, der Transport durch die geringe Transportkapazität eingeschränkt ist (transportlimitierte Bereiche). In grösseren Fließgewässern nimmt hingegen die Transportkapazi-

**Abb. 33: Schwemmholztransport- und Ablagerungsabschnitte innerhalb des Gewässernetzes**

Konzeptionelles Modell zur Ermittlung von Transport- und Ablagerungsabschnitten von Schwemmholz innerhalb eines Gewässernetzes in Abhängigkeit von Einzugsgebietsgrösse sowie Gerinnebreite und -neigung. In kleinen und steilen Einzugsgebieten dominieren Murgänge, was den Schwemmholztransport begünstigen kann.



tät mit steigendem Abfluss zu, jedoch ist das Angebot an Schwemmholz begrenzt (angebotslimitierte Bereiche).

Abb. 33 ist vereinfacht und bildet ein allgemeines Muster ab, wobei sich die Prozesse bei extremen Ereignissen auch verändern können. So beispielsweise, wenn aufgrund hoher Abflüsse auch im oberen Einzugsgebiet viel Schwemmholz transportiert wird und sich dort das Vorkommen dadurch stark reduziert. Für die Charakterisierung des Gewässernetzes in Eintrags-, Transport- und Ablagerungsstrecken liefert das Modell jedoch eine gute Annäherung.

### 2.1.3 Empfehlungen und wichtige Anmerkungen

Die grösste Herausforderung bei der Quantifizierung der Schwemmholzmenge besteht im Fehlen von Daten. Da keine Messgeräte für das Monitoring des Schwemmholztransports existieren, fehlen systematische Beobachtungen, und damit fehlen Angaben bezüglich Menge und Häufigkeit dieses Prozesses. Damit diese Wissenslücke gefüllt werden kann, ist es wichtig, nicht nur die Menge an mobilisierbarem Schwemmholz in einem Einzugsgebiet zu betrachten, sondern auch die Transportkapazität sowie die verschiedenen Transportmechanismen (ist ein Transport möglich? Und falls ja, wie wird das Holz transportiert, und wo wird es wieder abgelagert?). Für ein besseres Verständnis dieser Prozesse ist deshalb ein Monitoring des Schwemmholztransports unerlässlich. Im Rahmen des

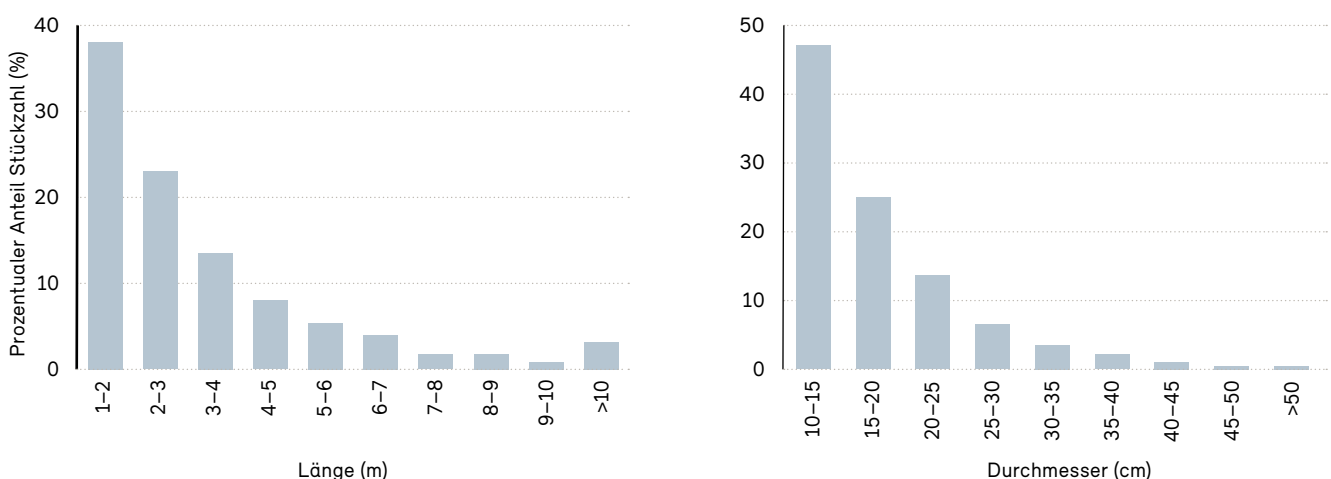
*WoodFlow*-Projekts wurden Feldaufnahmen, Videoüberwachungen und Instrumente der Fernerkundung für das Monitoring getestet (Kap. 2.5). Für detailliertere Analysen des Transports und der Ablagerung von Schwemmholz bieten sich aber auch numerische Modelle wie das Modell *Iber-Wood* an (Kap. 2.4).

## 2.2 Verkleinerung von Schwemmholz

Während eines Unwetterereignisses kann mitgeführtes Schwemmholz einen grossen Einfluss auf die ablaufenden Schadensprozesse haben. Das Schadenspotenzial, das von Schwemmholz ausgeht, hängt jedoch nicht nur von der transportierten Holzmenge ab, sondern auch vom Transportregime (ungesättigter oder gesättigter SH-Abfluss) sowie von Form und Grösse der einzelnen Schwemmholzstücke. Diese Faktoren haben einen Einfluss darauf, wie und wann Schwemmholz mobilisiert und transportiert wird, und des Weiteren beeinflussen sie die Verklausungswahrscheinlichkeit an kritischen Querprofilen. Um Rückhaltestrukturen in Fließgewässern (z. B. SH-Rechen) oder Brücken (Freibord, Pfeilerabstand) richtig dimensionieren zu können, sind Annahmen über die zu erwartende Grössenverteilung von Schwemmholz wichtig. Im Rahmen des Projekts *WoodFlow* wurden die Grössenverteilungen von transportierten Schwemmholzstücken näher betrachtet, mit dem Ziel, die Verkleinerung von

**Abb. 34: Grössenverteilung von abgelagerten Schwemmholzstücken**

Grössenverteilung von abgelagerten Schwemmholzstücken bezüglich Längenverteilung (links) und Durchmesserverteilung (rechts) für alle 6395 untersuchten Schwemmholzstücke.



Schwemmholz durch fluvialen Transport zu quantifizieren. Der Fokus liegt dabei auf den physikalischen Verkleinerungsprozessen, die im Zusammenhang mit Hochwasserereignissen dominieren. Darunter fallen der Bruch bei Hindernissen, Fragmentierung durch den Wasserdruck, Vermahlung und Abschleifen durch Geschiebekörner und der Bruch von bereits bestehenden Verkläusungskörpern.

### 2.2.1 Grössenverteilung der Schwemmholzstücke

Als Datengrundlage der Untersuchung dienten Schwemmholzablagierungen an 27 verschiedenen Standorten mit insgesamt 6395 transportierten Schwemmholzstücken, die jeweils kurz nach einem Hochwasserereignis (insbesondere dem Hochwasser im August 2005) analysiert wurden. Neben der Vermessung von Länge und Durchmesser der einzelnen Holzstücke, wurden weitere Parameter wie Baumart (Laub- oder Nadelholz) sowie Abrasions- und Verwitterungsgrad dokumentiert. Die Balkendiagramme in Abb. 34 zeigen die Häufigkeitsverteilung aller untersuchten Schwemmholzstücke mit Längen ( $\geq 1$  m) und Durchmesser ( $\geq 10$  cm). Es zeigt sich, dass kleine Schwemmholzstücke zahlenmässig stark dominieren. Rund 75 % des abgelagerten Holzes ist kürzer als 4 m und hat einen kleineren Durchmesser als 20 cm. Länger als 10 m sind nur 214 von 6395 dokumentierten Schwemmholzstücken (3.3 %).

Aus Sicht der Gefahrenprävention sind vor allem die grossen Schwemmholzstücke relevant. Von jedem der 27 Standorte wurden die jeweils 10% der grössten Stücke zusammengetragen und deren Längen- und Durchmesser- und -verteilung untersucht (Abb. 35). Bezüglich Länge liegt der Mittelwert dieser Auswahl bei rund 9 m (Median 8 m),

mit einzelnen Ausreissern zwischen 15 und 32 m. Deren Mobilität ist jedoch häufig gering und Transport nur in Talflüssen mit entsprechender Gerinnebreite und Abflusstiefe möglich. Der Durchmesser der entsprechenden Schwemmholzstücke liegt im Schnitt bei 22 cm (Median 20 cm), mit einzelnen Ausreissern zwischen 45 und 60 cm.

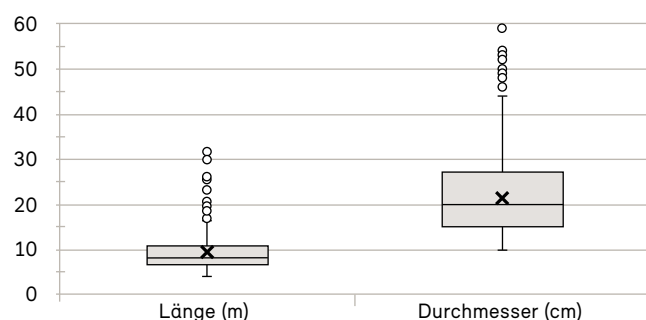
### 2.2.2 Verkleinerungskoeffizienten

Mithilfe der Tariffunktion des Schweizerischen Landesforstinventars LFI (Kaufmann, 2001) konnte für jedes Schwemmholzstück die ursprüngliche Baumhöhe rekonstruiert werden. Diese ist eine Funktion des Durchmessers eines abgelagerten Schwemmholzstückes, beruhend auf der überprüften Annahme, dass keine signifikante Abnahme des Durchmessers während des fluvialen Transportes stattfindet (Steeb et al., 2019c). Der Verkleinerungsfaktor wurde so bestimmt, dass die gemessene Länge eines Schwemmholzstückes durch dessen rekonstruierte Baumhöhe geteilt wurde. Der Mittelwert der Verkleinerungsfaktoren aller Holzstücke, welche an einem bestimmten Ort abgelagert und vermessen wurden, steht dann für die mittlere Verkleinerung des Schwemmholzes an diesem Ablagerungsort. Dieser gemittelte Verkleinerungskoeffizient  $V_k$  vermag die Grössenverhältnisse des transportierten Holzes gut abzubilden (Abb. 36).

Der mittlere Verkleinerungskoeffizient über alle 27 Untersuchungsstandorte beträgt  $V_k = 0.2$  (Median = 0.14), d. h. Bäume werden durch den Transport im Fließgewässer im Durchschnitt auf ein Fünftel ihrer ursprünglichen Grösse reduziert. Für die 10% der längsten Schwemmholzstücke je Standort kann von einem mittleren Verkleinerungskoeffizienten von  $V_k = 0.43$  (Median = 0.36) ausgegangen werden. An Standorten mit geringer Anzahl untersuchter Schwemmholzstücke ist die Variabilität der Verkleinerungskoeffizienten hoch (Abb. 37).

Die Verkleinerungskoeffizienten wurden schliesslich überprüft auf ihre Abhängigkeit zu verschiedenen Einzugsgebietscharakteristika (Transportdistanz, Gerinneneigung, Gerinnebreite), Eintragsprozessen sowie vegetationspezifischen Einflussfaktoren (Baumart, Holzzustand). Die Auswertungen zeigen, dass Nadelholz tendenziell stärker verkleinert wird als Laubholz. Frischholz wird tendenziell weniger verkleinert als bereits verwittertes Totholz. In schmalen und steilen Gerinnen (Wildbächen) wird das

**Abb. 35: Boxplots der Längen- und Grössenverteilung der 10 % grössten Schwemmholzstücke je Standort (x = Mittelwert)**



Schwemmholz stärker zerkleinert als in grösseren Flüssen, sofern Schwemmholz überhaupt mobilisiert werden kann. Durch Massenbewegungen (Rutschungen und Murgänge) eingetragenes Holz wird stärker verkleinert als durch Ufererosion eingebrachtes, da die Bäume bei ersteren Prozessen schon auf dem Weg zum Gerinne der physikalischen Zerkleinerung ausgesetzt sind. Die Transportdistanz im Gewässer hingegen ergab keine klare Korrelation mit den Verkleinerungskoeffizienten. Wie bereits in Zollinger (1983) beschrieben, findet die Verkleinerung von Schwemmholz vermutlich hauptsächlich beim Transportbeginn im Gerinne statt, wobei Bäume bereits nach den ersten paar Metern entastet und zerbrochen sind.

### 2.2.3 Empfehlungen und wichtige Anmerkungen

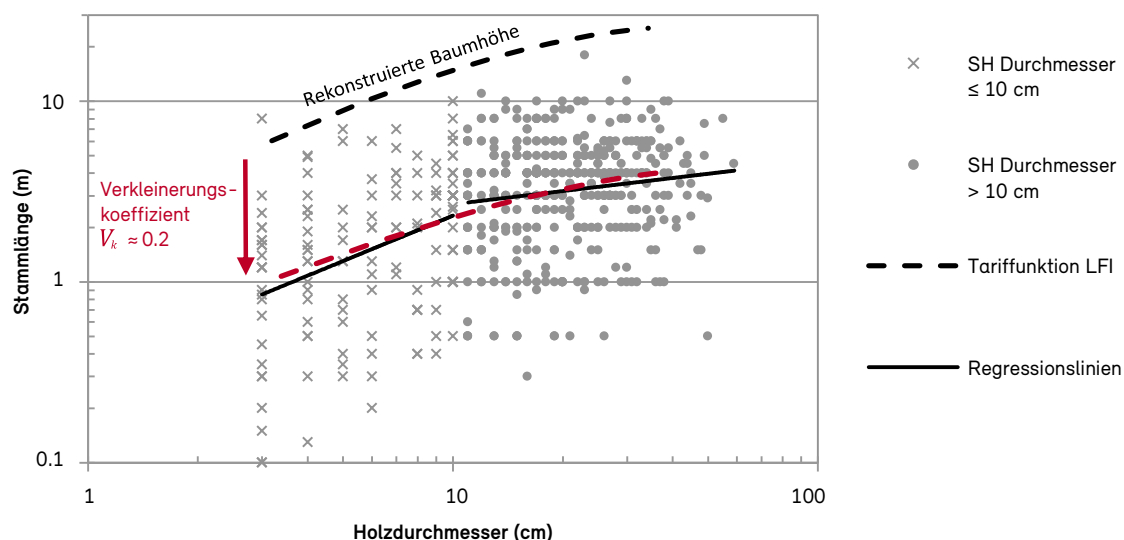
Die Untersuchungen zur Verkleinerung von Schwemmholz haben gezeigt, dass die Länge von Holzstücken durch den Eintrag sowie den Transport im Gerinne deutlich reduziert werden kann. Durchschnittlich wird Schwemmholz auf rund die Hälfte bis zu einem Fünftel der ursprünglichen Baumhöhe zerkleinert ( $V_k \approx 0.2 - 0.4$ ). Ein massgebender Zerkleinerungsprozess ist insbesondere bei grossen Flüssen jedoch nicht eindeutig feststellbar. Hier braucht es weiterführende Beobachtungen, um das Prozessverständnis und die Quantifizierung der entscheidenden Ein-

flussfaktoren auf die Verkleinerung von Schwemmholz zu verbessern. Möglichkeiten dazu bietet das vermehrte Monitoring von Schwemmholz (Kap. 2.5).

Ein Grossteil der vermessenen Schwemmholzstücke ist kürzer als 2 m (38 %) und hat einen Durchmesser von weniger als 0.15 m (47 %). Diese relativ kleinen Schwemmholzstücke stellen in der Regel keine grosse Gefahr bezüglich Verklausung dar, es sei denn, das Schwemmholz tritt als (voll)gesättigter Abfluss auf (Kap. 2.1.1). Für die Gefahrenbeurteilung sind vielmehr die grossen Schwemmholzstücke von Bedeutung. Bei Schwachstellen wie Brücken reicht in der Regel ein grosser Stamm, um eine Verklausung auszulösen. Hochwasserereignisse mit hohem Schwemmholztransport (wie z. B. im August 2005) sind Extremereignisse, und hier sollten alle Betrachtungen generell sehr konservativ durchgeführt werden. Wie in Abb. 35 gezeigt, können insbesondere in grösseren Flüssen vereinzelt durchaus SH-Stücke von >10 m Länge und 0.4–0.6 m Durchmesser transportiert werden (abhängig von der Transportkapazität, siehe auch Kap. 2.1.2). Von solchen maximalen SH-Grössen sollte bei der Gefahrenbeurteilung und bei der Dimensionierung von Brücken oder Rückhaltestrukturen ausgegangen werden. Konkrete Anwendungsbeispiele dazu

**Abb. 36:** Verhältnis der Stammlänge zum Holzdurchmesser von abgelagerten Schwemmholzstücken am Beispiel des Hochwassers 2005

Multipliziert man die mittels Tariffunktion rekonstruierte Baumhöhe mit einem Verkleinerungskoeffizienten von  $V_k = 0.2$  (rote gestrichelte Linie), können die zwei Regressionslinien der Datenpunkte (ausgezogene schwarze Linien) gut angenähert werden. Die Streuung der Datenpunkte illustriert die grosse Variabilität der Stammlängen des abgelagerten Schwemmholzes.



sind beispielsweise die Berechnung der Verklauungswahrscheinlichkeit (Kap. 3.1) anhand der Schwemmholzlänge oder die Abschätzung von Aufstau (Kap. 3.3.1) und Freibord (Kap. 3.5) mithilfe des Holzdurchmessers.

In diesem Zusammenhang bietet die Gerinnebreite als limitierender Faktor für den fluvialen Transport von Holz einen weiteren Anhaltspunkt, wobei Schwemmholzlängen kleiner als die Gerinnebreite grundsätzlich als mobilisierungsfähig gelten (Dixon & Sear, 2014). In Wildbächen und Gebirgsflüssen bis 10 m Breite sollte demnach mit Schwemmholzlängen gerechnet werden, die der mittleren Gerinnebreite unterhalb von potenziellen Eintragsflächen entsprechen (in Analogie zu STK, 2017). Bei breiteren Talflüssen wird typischerweise eine maximale Schwemm-

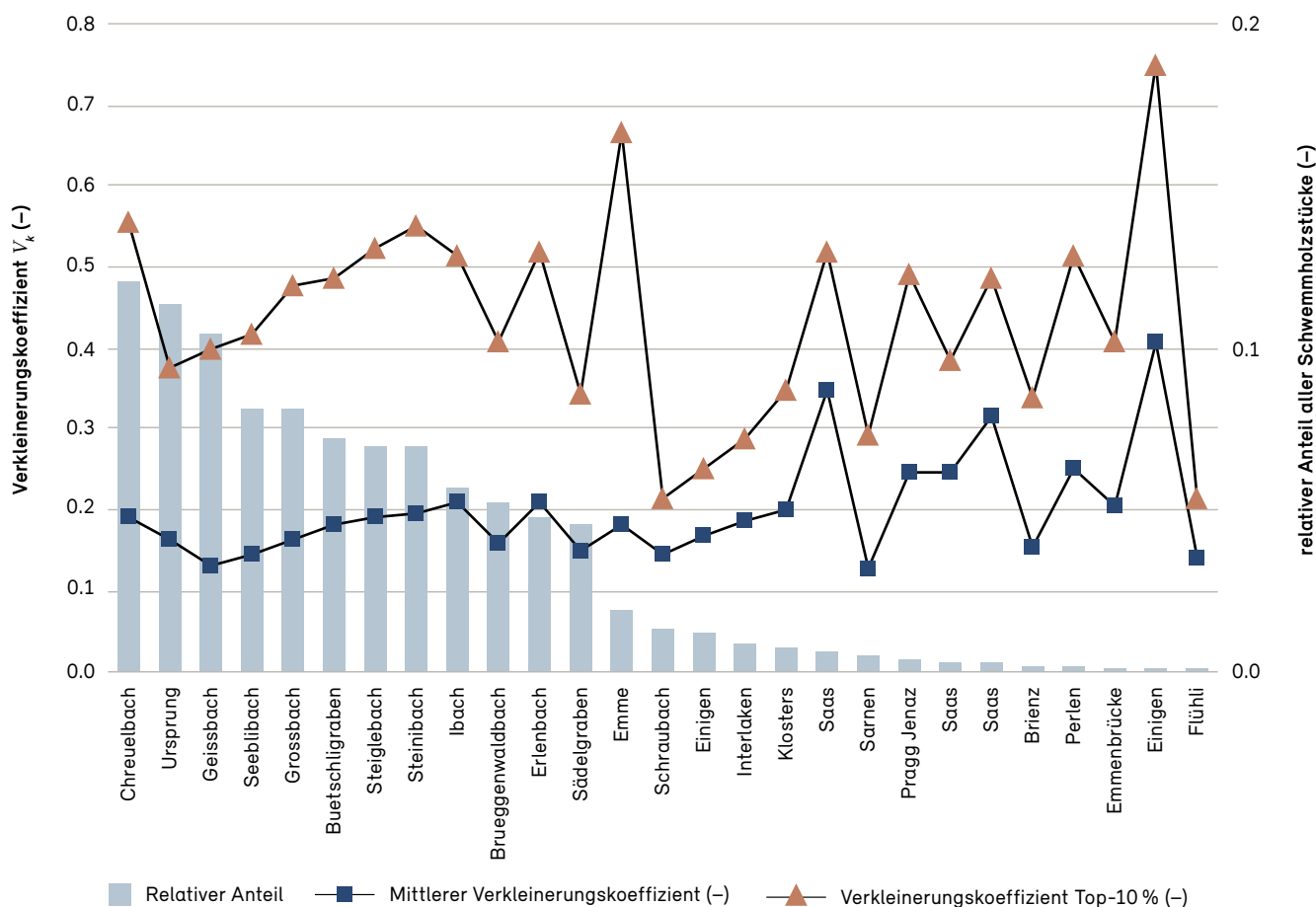
holzlänge von mehr als 10 m angenommen (STK, 2017), und als Obergrenze könnte vereinfacht die Maximalhöhe der ufernahen Bestockung als Referenz angenommen werden. Entsprechende Informationen können durch Feldbegehung oder anhand des Vegetationshöhenmodells LFI (Ginzler, 2018) abgeschätzt werden.

## 2.3 Schwemmholzablagerung im Flussbett

Zahlreiche Studien in unterschiedlichen Einzugsgebieten haben gezeigt, dass die Menge von abgelagertem Schwemmholz im Flussbett (Schwemmholzspeicher) mit der Lage im Einzugsgebiet stark variieren kann. Die zusammengetragene Datenbank an wissenschaftlicher

**Abb. 37: Verkleinerungskoeffizienten von insgesamt 27 Standorten**

Der durchschnittliche Wert der Verkleinerungskoeffizienten beträgt  $V_k \approx 0.2$  (blau). Berechnet für die 10 % der längsten Stücke pro Standort, ist die Streuung grösser, und der mittlere Verkleinerungskoeffizient verdoppelt sich auf  $V_k \approx 0.4$  (rot). Grau hinterlegt ist der relative Anteil aller untersuchten Schwemmholzstücke ( $n = 6395$ ).



Literatur zum Thema Schwemmholz in Flüssen und speziell zum Schwemmholzspeicher als Holzmasse pro Hektar Flussbettfläche ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) wurde im Rahmen des *WoodFlow*-Projekts weiter analysiert. In der Analyse wurden 390 Standorte weltweit berücksichtigt (Ruiz-Villanueva et al., 2016c), wobei der Fokus auf denjenigen in Europa und der Schweiz lag (Abb. 38). Der im Gerinne vorhandene Schwemmholzspeicher ist ein Schlüsselfaktor zur Quantifizierung der Schwemmholzfracht im Hochwasserfall. Für die in Kap. 1 entwickelten GIS-Ansätze wurde der Schwemmholzspeicher gemäss Abb. 38B in Gerinnebreite-Klassen unterteilt und als Eingabevariable verwendet.

Der mediane Schwemmholzspeicher in Schweizer Flüssen beträgt ca.  $90 \text{ m}^3/\text{ha}$  (Mittelwert =  $102 \text{ m}^3/\text{ha}$ ) und liegt in derselben Größenordnung wie in europäischen, jedoch tiefer als in aussereuropäischen Flüssen (z. B. USA, Kanada, Chile oder Australien). Dies lässt sich durch die unterschiedlich starke Beeinflussung der Gewässer durch den Menschen erklären. In den USA, in Südamerika und in Australien sind die Flüsse im Vergleich zu Europa weniger stark durch den Menschen beeinflusst und weisen einen natürlicheren Zustand auf. In der Analyse konnten lediglich 10 Fließgewässer in der Schweiz berücksichtigt werden, was die hohe Variabilität der Fließgewässer in der Schweiz nur schlecht wiedergibt. Wird der Schwemmholzspeicher nach Einzugsgebietsgrösse klassiert, zeigt sich wie auch bei der Klassierung nach Gerinnebreite und -neigung eine nichtlineare Verteilung. Dabei wei-

sen Einzugsgebiete mit einer mittleren Gerinnebreite und einer mittleren Gerinneneigung die grössten Schwemmholzspeicher auf. Mit weiter abnehmender Neigung und wachsender Breite nimmt der Prozess der Schwemmholzablagerung im Gerinne zu. Weitere Variablen, wie beispielsweise die seitliche Begrenzung (das Verhältnis von Gerinnebreite zu Talbodenbreite), die Sinuosität, die Rauheit des Gerinnes, forstwirtschaftliche Tätigkeiten wie Holzschlag und weitere menschliche Eingriffe am Gerinne, die das Fließverhalten prägen, können den Schwemmholzspeicher weiter beeinflussen. Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, dass der Schwemmholzspeicher sich im Laufe der Zeit ändert. Daher sollten die Aufnahmen wiederholt durchgeführt werden. Für eine differenzierte Quantifizierung der Schwemmholzspeicher ist eine systematische Überwachung verschiedener Fließgewässer mit unterschiedlicher Morphologie und Vegetationsbedeckung, variierenden Strömungsregimes und menschlichen Interventionen erforderlich.

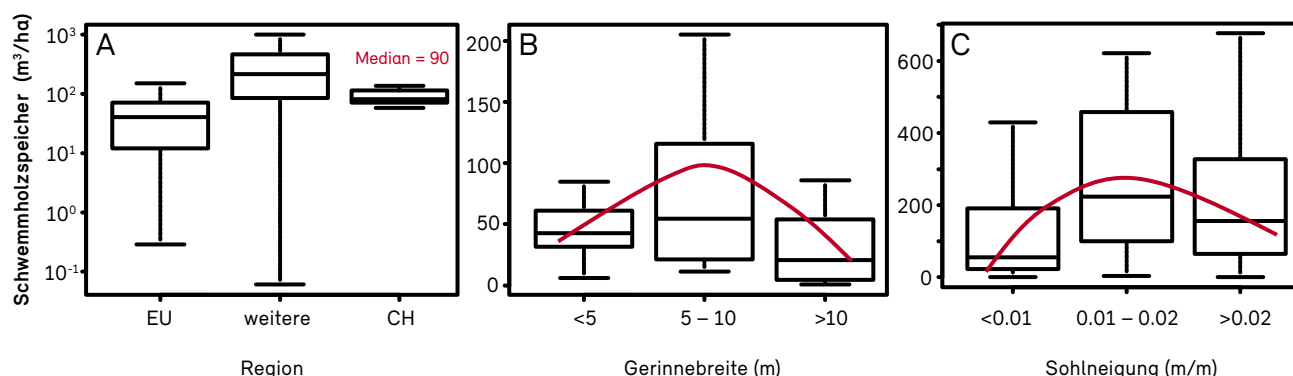
## 2.4 Iber-Wood: Numerische 2-D-Modellierung von Schwemmholztransport und -ablagerung

### 2.4.1 Modellbeschreibung und Eingabedaten

*Iber-Wood* ist ein zweidimensionales Euler-Lagrange-Modell, das den Transport einzelner SH-Stücke mit der Hydrodynamik koppelt (Bladé et al., 2014; Ruiz-Villanueva et al., 2014a). *Iber-Wood* wurde in mehreren Veröffentlichungen beschrieben, weshalb hier nur auf die Neuerun-

Abb. 38: Schwemmholzspeicher in Flüssen

Boxplots des Schwemmholzspeichers von total 390 Standorten in europäischen Ländern, in der Schweiz und in anderen aussereuropäischen Ländern (A), Schwemmholzspeicher an europäischen Standorten, nach Gerinnebreite (B) und nach Gerinneneigung (C) klassifiziert.



gen und die im Rahmen des *WoodFlow*-Projekts erstellte Bedienungsanleitung eingegangen wird. *Iber-Wood* löst die Hydrodynamik (2-D-Saint-Venant-Gleichung), die Turbulenzen (RANS-Gleichungen) und den Sedimenttransport (2-D-Exner-Gleichung) mit der Finite-Volumen-Methode. *Iber-Wood* simuliert einzelne zylindrische Holzstücke (Baumstämme) mit und ohne Wurzeln (Comper et al., 2018), wobei ihre Anfangsbewegung durch Berechnung des Gleichgewichts der Kräfte bestimmt wird, die auf den Massenschwerpunkt des Baumstammes wirken. Die Berechnung der beginnenden Bewegung ist somit voll dynamisch. Die wichtigsten Parameter der massgebenden Gleichungen sind die Holzdichte, der Winkel des Baumstamms relativ zur Fließrichtung, die Baumstammlänge, der Baumstammdurchmesser, der Reibungskoeffizient zwischen Baumstamm und Flussbett sowie der Widerstandskoeffizient des Baumstamms im Wasser. Je nach Holzauftrieb und Strömungsbedingungen sind zwei Transportmechanismen möglich; beim einen schwimmen die Baumstämme, beim anderen gleiten sie entlang der Gerinnesohle. Baumstämme können sich drehen, indem sie sich an das Geschwindigkeitsfeld der Strömung anpassen. Sie können auch untereinander und/oder mit den Böschungen sowie mit Bauwerken im oder am Gewässer interagieren (Ruiz-Villanueva et al., 2014b für Details). Für die Koeffizienten und Variablen, die an den Berechnungen des Holztransports beteiligt sind, werden Standardwerte vorgeschlagen. Die in der gängigen Literatur zu findenden Werte sind auch im *Iber-Wood*-Benutzerhandbuch enthalten.

Für die Durchführung einer Simulation mit *Iber-Wood* werden zum einen die üblichen Eingabedaten für ein Hydraulikmodell, zum anderen Eingabedaten für das Holz benötigt:

1. Erstellen oder Import der Geometrie mithilfe des DGM
2. Zuweisen der Eingabeparameter (z. B. Rauheitswerte)
3. Definition der Grenz- (Eintrag und Austrag) und Anfangsbedingungen für den Abfluss, das Schwemmholz und eventuell den Sedimenttransport (falls berücksichtigt). Als Anfangsbedingungen werden die exakte Position jedes Baumstamms, dessen Abmessungen (Länge und Durchmesser), Dichte und Orientierung für den ersten Zeitschritt (oder einen beliebigen Zeitschritt) angegeben.

4. Festlegung weiterer Simulationsparameter (z. B. Berechnungsdauer, Parameter des numerischen Schemas, Anforderungen für zusätzliche Module usw.).

Die wichtigsten Ergebnisse von *Iber-Wood* in Bezug auf Hydraulik und Holz sind:

- Fliesstiefe, Fließgeschwindigkeit, spezifische Wasseroberfläche, Froude-Zahl, kritischer Durchmesser, Sohlschubspannung (für jeden Zeitschritt und Maximalwerte für die gesamte Simulation),
- Position, Winkel und Eigenschaften jedes Baumstamms für jeden Zeitschritt und endgültige Anzahl der abgelagerten und ausgetragenen Stämme.

Im Rahmen des *WoodFlow*-Projekts wurde *Iber-Wood* grundlegend verbessert und einige der anfänglichen Einschränkungen reduziert. Eine der wichtigsten Verbesserungen besteht darin, dass die Baumstämme nicht mehr nur als Zylinder (ohne Wurzeln), sondern mit einem Wurzelstock simuliert werden können. Weitere Verbesserungen betreffen die Interaktionen zwischen den Baumstämmen, die bisher als elastisch angesehen wurden, sowie die Abschätzung von Ablagerungen. Zudem konnte im Rahmen des *WoodFlow*-Projekts erstmals der gleitende Transport von Baumstämmen an der Gerinnesohle vollständig validiert werden. Weiter konnte die Transportdynamik unter instabilen Bedingungen sowie die Interaktion zwischen Baumstämmen und Verbauungen im *WoodFlow*-Projekt im Detail untersucht und in *Iber-Wood* implementiert werden (siehe ergänzend Ruiz-Villanueva et al., 2019c und Kapitel 3.4). *Iber-Wood* ist auf Anfrage für Anwender erhältlich ([www.woodflow.ch](http://www.woodflow.ch)).

#### 2.4.2 Anwendungsbeispiele

*Iber-Wood* hat in der Modellierung des schwimmenden Schwemmholztransports in den letzten Jahren mehrmals zu sehr zufriedenstellenden und zuverlässigen Ergebnissen geführt. Der nächste Schritt besteht nun darin, die Leistungen des Modells, den Holztransport in einer komplexen Gerinnegeometrie, in der die Baumstämme nicht nur schwimmen, sondern auch auf dem Flussbett gleiten, zu testen. Verzweigte Flüsse mit ihren komplexen und dynamischen Fließwegen, mit Kiesbänken und mit seichten Bereichen bieten eine einzigartige Möglichkeit, die komplexen Prozesse der Rekrutierung, des Verhakens und der

Ablagerung von Schwemmholz zu studieren. Diese für das Management von Schwemmholz wichtigen Aspekte stellen für die Modellierung des Schwemmholztransports eine grosse Herausforderung dar. Da keine Messdaten dazu existieren, wurde ein physikalisches Modell mit detaillierten Eingabedaten zur Validierung der Modellergebnisse verwendet (siehe auch Kap. 3.4). Im Rahmen des *Wood-Flow*-Projekts wurde die numerische Modellierung dazu verwendet, um (1) eine Sensitivitätsanalyse der Haupteingangsgrößen durchzuführen, (2) die gewonnenen Erkenntnisse im Laborexperiment reproduzieren und vergleichen zu können und (3) die im Labor simulierten Szenarien zu erweitern, um das Verständnis der Dynamik von Schwemmholz in verzweigten Flusslandschaften unter instationären Bedingungen vertiefen zu können (ähnlich der Dynamik, wie sie an der Sense beobachtet werden konnte). Es wurden erfolgreich Versuche unternommen, um die numerische Modellerleistung noch realitätsnäher abzubilden. Insbesondere verbessert wurden die numeri-

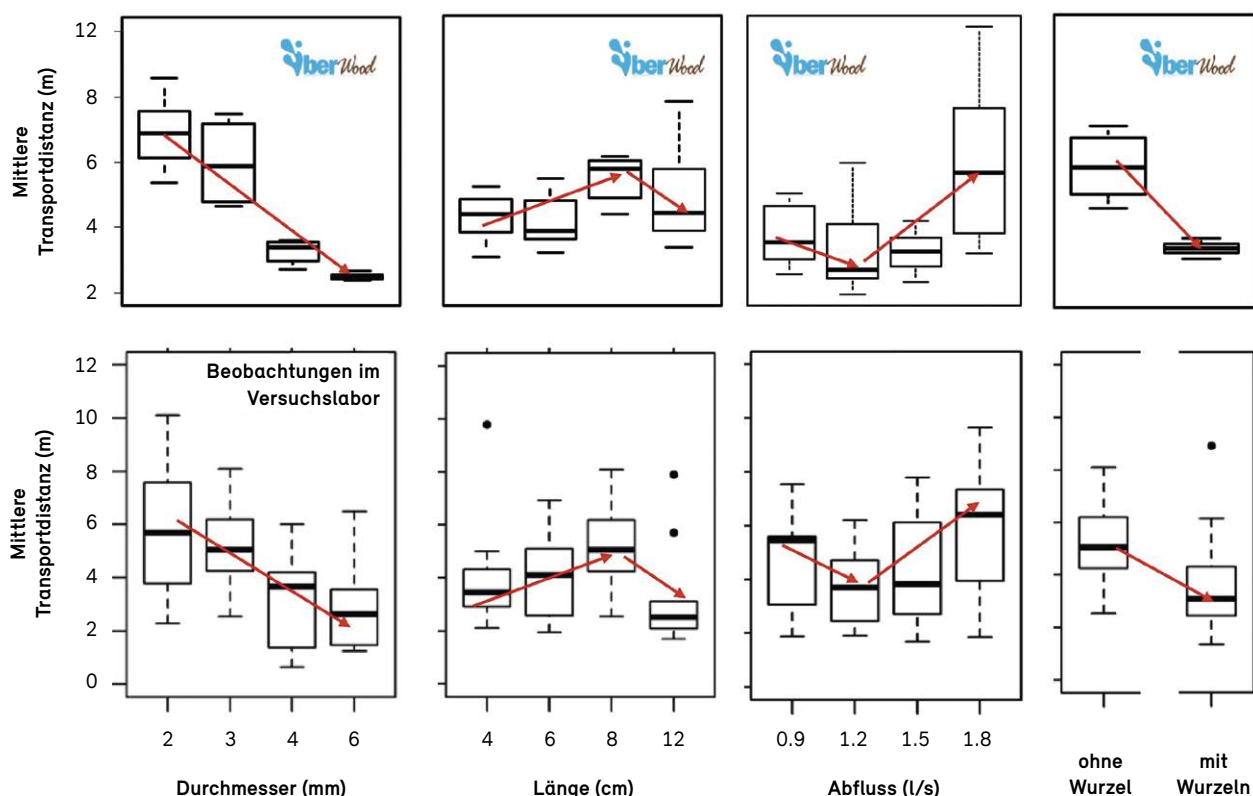
sche Simulation von Wechselwirkungen zwischen Baumstämmen und dem Flussbett, wie sie beim gleitenden Transportregime entstehen, sowie die Simulation der Bildung von grossen Holzansammlungen mit mehr als drei Baumstämmen. Der Vergleich zwischen den numerischen Modellergebnissen und den Laborexperimenten basiert auf den von den Baumstämmen zurückgelegten Transportdistanzen. Die Ergebnisse zeigen, dass *Iber-Wood* die Beobachtungen im Labor zufriedenstellend abbilden kann (Abb. 39).

### 2.4.3 Empfehlungen und wichtige Anmerkungen

Es ist zu beachten, dass zur Durchführung einer ordnungsgemässen hydrodynamischen Simulation Kenntnisse der Hydraulik und der Strömungsdynamik sowie Kenntnisse der numerischen Modellierung erforderlich sind. *Iber-Wood* ist ein zweidimensionales hydrodynamisches Modell und basiert auf der Hypothese der hydrostatischen Druckverteilung und der gleichmässigen

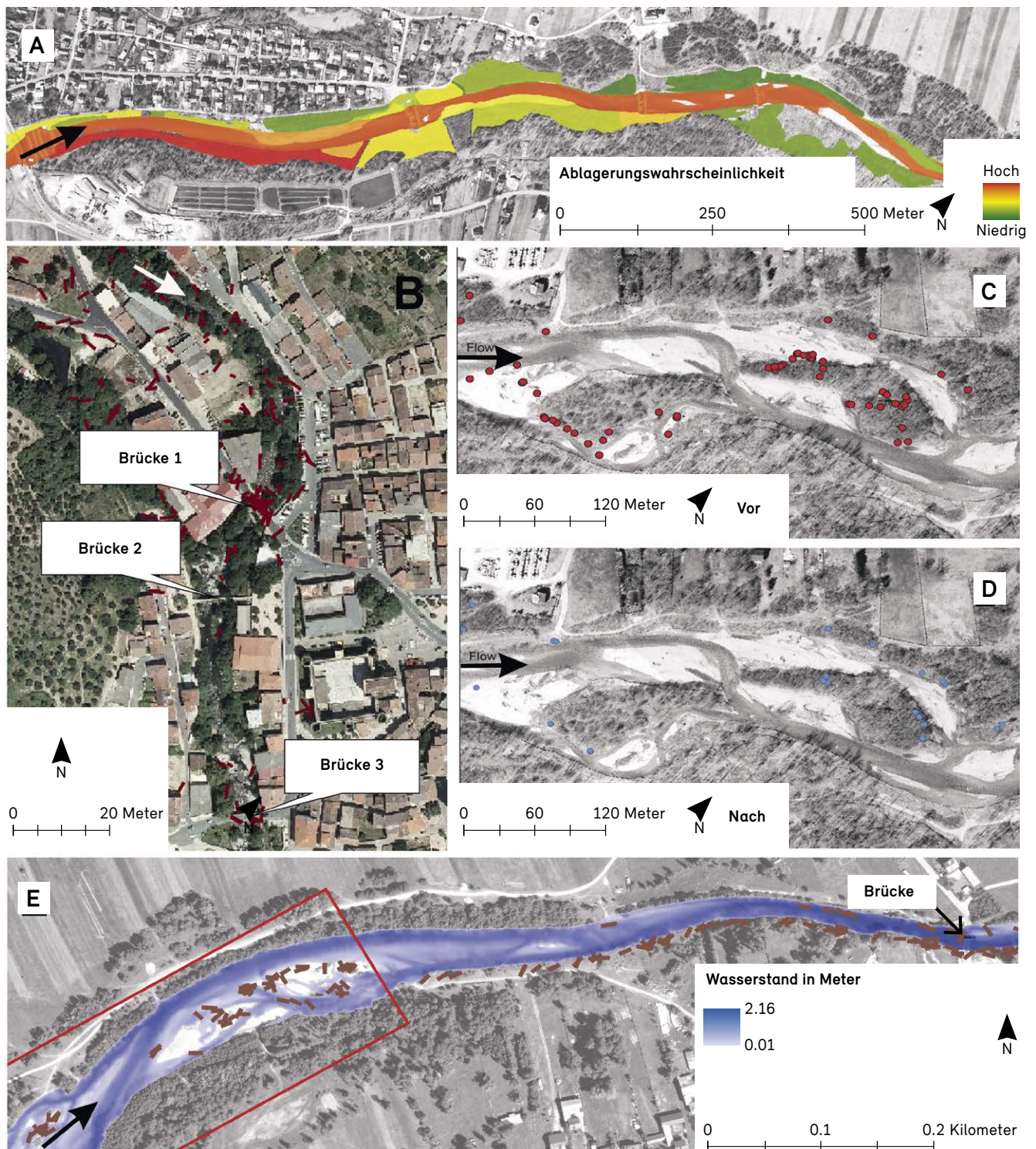
Abb. 39: Vergleich der Ergebnisse der Laborexperimente und der numerischen Modellierung mit *Iber-Wood*

Transportdistanz (Median) der Schwemmholzstücke, unterschieden nach Länge bzw. Durchmesser, Holzstücke gleicher Grösse, aber mit unterschiedlichem Abfluss, sowie Holzstücke mit oder ohne Wurzeln.



**Abb. 40: Beispiele von Simulationsergebnaten mit Iber-Wood**

(A) Ablagerungswahrscheinlichkeit aufgrund von Ensemble-Berechnungen verschiedener Szenarien (Ruiz-Villanueva et al., 2016a); (B) Identifizierung kritischer Gerinnequerschnitte (Ruiz-Villanueva et al., 2014c); (C–D) Remobilisierung von Gerinneholz (rote und blaue Punkte) nach einem Hochwasserereignis (Ruiz-Villanueva et al., 2016b); (E) Ablagerungsmuster von Schwemmholzstücken (braune Striche) und Identifizierung eines Gerinneabschnitts (rotes Rechteck) mit hoher Retentionskapazität (Ruiz-Villanueva et al., 2017).



Geschwindigkeit über die Wassertiefe. Die Annahme eines hydrostatischen Drucks wird sowohl in Flüssen als auch in Gezeitenströmungen in nicht stratifizierten Flussmündungen erfüllt. Die Hypothese einer gleichmässigen Geschwindigkeitsverteilung wird in Flüssen und Flussmündungen erfüllt, vorausgesetzt, es gibt keine relevanten Schichtungsprozesse aufgrund von Salzgehalt, Temperatur oder Wind. Komplexe Flusssysteme, das Umfließen von Hindernissen oder tiefenabhängige Fließgeschwindigkeiten können durch zweidimensionale Modelle nicht gut abgebildet werden. Die Handhabung der Nass-Trocken-Fronten in *Iber-Wood* ist stabil, konservativ und nicht diffus. Dies bedeutet, dass die Fronten selbst in steilen Böschungen zu keinen numerischen Instabilitäten führen. Da *Iber-Wood* den Reinwasserabfluss simuliert (mit oder ohne Sedimenttransport), sollte das Modell nicht zur Simulation anderer Strömungen wie z. B. Murgänge oder Lawinen verwendet werden.

*Iber-Wood* kann für die Analyse der Schwemmholzgefährdung und für die Modellierung sowohl des Transports als auch der Ablagerung von Schwemmholz verwendet werden. Mit *Iber-Wood* können Muster der Holzablagerung rekonstruiert und Stellen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit für Verklausungen (Ruiz-Villanueva et al., 2014b) sowie kritische Infrastrukturanlagen im und am Gewässer identifiziert werden (Ruiz-Villanueva et al., 2014c). Zudem kann *Iber-Wood* auch für die Rekonstruktion vergangener Hochwasserereignisse, zum Testen von Hypothesen (z. B. zur Analyse von Faktoren, die den Schwemmholztransport in verschiedenen Flussmorphologien steuern) oder zur Analyse möglicher Hochwasserszenarien für verschiedene Wiederkehrperioden oder Landnutzungen genutzt werden.

Die Rechenzeit für eine Simulation kann zwischen wenigen Minuten und mehreren Stunden liegen und hängt vom Computer, der Modellgrösse (z. B. der Länge des Flusses), der Grösse und der Anzahl der Elemente des Berechnungsnetzes, den hydraulischen Bedingungen (z. B. Dauer des Hydrographen) und von der Anzahl der in der Simulation berücksichtigten Baumstämme ab. Die Resultate der Modellierung können direkt in *Iber-Wood* analysiert oder in eine GIS-Software exportiert werden, um Karten zu generieren oder weitere räumliche Analysen durchzuführen. Des Weiteren können auch verschie-

dene Grafiken erstellt werden. Abb. 40 zeigt verschiedene nachbearbeitete Modellresultate mit kartographischem Hintergrund.

## 2.5 Monitoring von Schwemmholz: Methodenüberblick

Dieses Kapitel verschafft einen Überblick zu Ansätzen, welche bei der Erfassung und Abschätzung von Schwemmholzspeichern, -mobilisierung und -transport verwendet werden können, namentlich im Rahmen von Feldbegehungen, Videoüberwachungen oder systematischen Drohnen- und Luftbildanalysen. Die Anwendung der verschiedenen Ansätze wird mittels Fallbeispielen aufgezeigt. Die Daten, die im Rahmen eines Schwemmholzmonitorings erfasst werden können, sind insbesondere für Ereignisanalysen, für den Unterhalt von Fließgewässern nach einem Ereignis sowie für die periodische Erfassung des Gewässerzustands sinnvoll. Insofern haben die Ansätze auch präventiven Charakter, um das Auftreten unerwarteter Schwemmholzfrachten im Ereignisfall zu verhindern.

### 2.5.1 Feldbegehungen: Aufnahme von Fließgewässer- und Holzeigenschaften

Bei Feldaufnahmen stehen die Quantifizierung von Holzablagerungen, die Identifizierung von Herkunftsgebieten und -prozessen (z. B. Erdbeben, Murgänge, Ufererosion) sowie eine Beschreibung der Gerinnemorphologie und der gewässernahen Vegetation im Zentrum. Zur Vermessung von Holzablagerungen bestehen unterschiedliche Ansätze. Waldner et al. (2009) wendeten beispielsweise die Linienzahlanalyse an, während Rickli & Bucher (2006) alle Holzstücke in einem definierten Abschnitt des Gewässers aufgenommen und inventarisiert haben. Aus zeitlichen Gründen können bei Messkampagnen jedoch häufig nicht alle Holzstücke einzeln vermessen werden. Ein effizientes Vorgehen besteht darin, die Ablagerungsfläche in mehrere Bereiche mit unterschiedlicher Ablagerungsdichte einzuteilen. Für jeden Bereich können dann eine oder mehrere repräsentative Teilflächen ausgeschieden und alle sich darin befindenden Holzstücke vermessen werden. Aus der resultierenden Ablagerungsdichte kann mittels Hochrechnung das abgelagerte Holzvolumen für den jeweiligen Bereich bestimmt werden.

Bei der Vermessung von Holzstücken wird das Holzvolumen normalerweise über die Formel eines Zylinders bestimmt (Thévenet et al., 1998). Das Volumen einer Holzablagerung kann über deren Geometrie (Fläche und Höhe) und unter Berücksichtigung einer Porosität (Lücken mit Luft) berechnet werden. In der Literatur werden Porositäten zwischen 50 und 80 % vorgeschlagen (Thévenet et al., 1998). Wenn der gesamte Flusslauf eines Gewässers aufgenommen wird, wird empfohlen, das Holzvolumen pro Distanz oder Fläche anzugeben (z. B.  $\text{m}^3 100^{-1} \text{m}$ ,  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  oder Stückzahl  $100^{-1} \text{m}$ ), um den Vergleich zwischen verschiedenen Standorten und Regionen zu erleichtern. Das Nachverfolgen (Tracking) von einzelnen Baumstämmen kann sehr wertvolle Informationen zum Verständnis der Schwemmholzdynamik liefern, war jedoch nicht Bestandteil des *WoodFlow*-Projekts. Besonders bei kurzen Transportwegen liefert das Tracking sehr genaue Ergebnisse. Für die Markierung der Baumstämme wird oft Farbe verwendet, oder es werden Metallplatten angebracht, die mit einem Metalldetektor lokalisiert werden können. Holz lässt sich auch mit Sendern (aktiven und passiven RFID-Funksendern) (MacVicar et al., 2009) und GPS (Ravazzolo et al., 2015) verfolgen. Mittels Angaben über die Schwemmholzentnahmen aus den Gewässern wie beispielsweise bei Schwemmholzrechen (Lyn et al., 2003) oder auch bei Stauseen (Moulin & Piégay, 2004; Seo et al., 2008), bei Seen (Waldner et al., 2009) oder einzelnen Flusszweigen (Boivin et al., 2015) können helfen, das Schwemmholzvolumen abzuschätzen. In der Schweiz werden solche Entnahmedaten bereits an einigen Orten gesammelt. Da sie sehr wertvolle Informationen darstellen, sollte das kontinuierliche und standardisierte Erfassen solcher Daten (mit immer derselben Masseinheit) gefördert werden. Solche Daten wurden beispielsweise in Kap. 1.5 zur Definition der empirischen Schätzformeln verwendet. Wichtig beim Verwenden der Daten ist die Berücksichtigung eines Auflockerungsfaktors, da sich die Angaben meist auf einen Haufen mit einer gewissen Porosität beziehen.

### Empfehlungen und wichtige Anmerkungen

Wohl et al. (2010) und Máčka et al. (2011) geben Empfehlungen über im Feld zu messende Variablen ab. Im Rahmen des *WoodFlow*-Projekts wurde ein Feldprotokoll (Anhang A5) erarbeitet, mit welchem die wichtigsten dieser Variablen im Feld aufgenommen werden können. Die Feldblätter können sowohl für die Aufnahme von einzel-

nen Baumstämmen und Anhäufungen verwendet werden als auch für die Klassierung nach Holzgrößenklassen. Für die Größenklassen muss jedes Holzstück im untersuchten Abschnitt aufgrund seines Durchmessers und seiner Länge einer Klasse zugeordnet werden (Rickli et al., 2016). Im bereitgestellten Feldprotokoll werden sieben Klassen mit einem Durchmesser von  $< 10 \text{ cm}$  bis  $> 40 \text{ cm}$  und neun Klassen mit einer Länge von  $< 2$  bis  $> 16 \text{ m}$  vorgeschlagen. Die Klassen können jedoch situativ angepasst werden.

### 2.5.2 Monitoring mit Kameras: Abschätzung des Schwemmholzabflusses

Eine Möglichkeit, den Transport von Holz zu beobachten, sind Videos und Zeitrafferfotographien. In der Schweiz wurden an vielen Gewässern bereits Foto- und Videokameras installiert. Beispiele sind die Kameras der Steiner Energie AG an der Kleinen Emme und der Reuss, mehrere Kameras im Kanton Uri und die Kamera an der Zulg, die von der Firma Geopraevent unterhalten wird. Die Verwendbarkeit dieser Kameras für das *WoodFlow*-Projekt wurde überprüft. Schwierigkeiten bestehen jedoch insbesondere in der zum Teil nur kurzen Dauer der Datenspeicherung (in Uri werden die Video- und Fotodaten z. B. nach 10 Tagen wieder gelöscht) sowie die echtzeitferne Übertragung der Daten. An der Sihl wurde zur Überwachung des fertiggestellten Schwemmholzrechs eine neue Kamera installiert, die das Sammeln von quantitativen Informationen zum Schwemmholztransport bei Hochwasser ermöglicht. Die Einstellungen der Kamera an der Zulg wurden speziell an die Überwachung von Schwemmholz angepasst. Bei niedrigen Abflüssen nimmt die Kamera nur zwei Bilder pro Tag auf, und erst beim Erreichen eines gewissen Wasserstandes beginnt die kontinuierliche Aufnahme. Diese Anpassungen funktionieren gut für die Überwachung des Schwemmholztransports, allerdings ist die Speicherung und Übertragung der Daten immer noch teuer und bedarf weiterer Optimierungen.

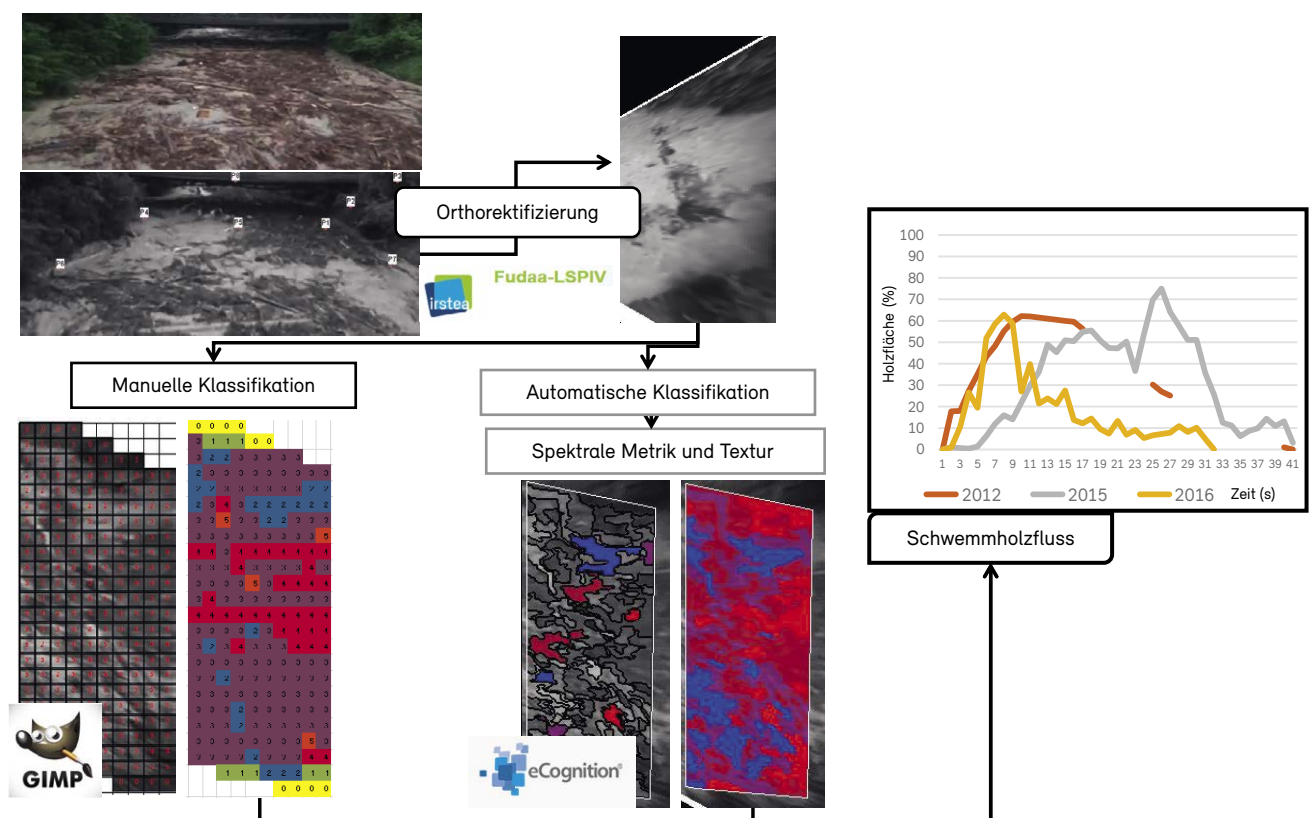
Auf Online-Videoportalen nimmt die Zahl der durch Privatpersonen aufgenommenen Videos stetig zu. Die dort enthaltenen Informationen weisen ein grosses Potenzial auf, das Prozessverständnis des Schwemmholztransports zu erweitern. Die Videos liefern zahlreiche Informationen über das Fließverhalten wie zum Wasserstand und zur ungefähren Fließgeschwindigkeit und -richtung, aber

auch Informationen zu Überschwemmungen sowie zur Art und Menge des transportierten Schwemmholzes (Ruiz-Vilanova et al., 2019b). Damit diese Informationen aus den Videos extrahiert werden können, bedarf es einer Bearbeitung der Videos. Das Vorgehen besteht aus vier Schritten: (i) Extrahieren der Bilder; (ii) Videostabilisierung; (iii) Orthorektifizierung und (iv) quantitative Analyse (manuell und automatisch). Nach dem Extrahieren einzelner Bilder aus den Videos erfolgt eine Videostabilisierung, bei der störende Bewegungen aus den Bildern korrigiert werden. Unterschiedliche Programme wie GIMP oder der Windows Movie Maker wurden dafür getestet. Der dritte Schritt besteht in der Orthorektifizierung der Bilder, was mit dem Programm Fudaa-LSPIV möglich ist (Le Coz et al., 2014; Hauet et al., 2014). In einer darauffolgenden statistischen Analyse wird der Anteil der mit Holz bedeckten Fläche in jedem Bild visuell abgeschätzt. Über eine Umwandlung der Fläche kann so die Schwemmholzmenge abgeleitet

werden. Mit der Software GIMP erfolgt dieser Schritt manuell, wobei ein Gitternetz über die Aufnahmen gelegt und jedes Feld in Abhängigkeit des Schwemmholzgehalts klassiert werden muss. Für den automatischen Ansatz kann die Software eCognition verwendet werden, die über Spektralinformationen sowie die Textur der Pixel homogene Flächen bestimmt und diese in Klassen einteilt. Dieses Vorgehen erlaubt eine Rekonstruktion der Schwemmholzabflüsse in der Zulg in den Jahren 2012, 2015 und 2016 (Abb. 41). Die geringe Qualität der Videos schränkte die Analyse jedoch stark ein. Für die Optimierung der Nachbearbeitung und die Entwicklung eines automatischen Ansatzes ist eine bessere Videoqualität erforderlich. Dieser erste Versuch zeigt jedoch die Möglichkeiten auf, die die Videoüberwachung für die Quantifizierung der Transportrate von Schwemmholz darstellen kann.

**Abb. 41: Nachbearbeitung der Videos am Beispiel des Hochwassers an der Zulg im Jahr 2015**

Anhand der im Feld mit einem GPS erfassten Bodenkontrollpunkte werden die Fotos orthorektifiziert/entzerrt und für die Quantifizierung der Schwemmholzmenge mittels eines manuellen und eines automatischen Ansatzes klassiert.



### Empfehlungen und wichtige Anmerkungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Standort und die Konzipierung der Beobachtungsstationen extrem wichtig sind. Die Ausrichtung und der von der Kamera abgedeckte Bereich sowie die Art und Weise der Datenübertragung (ob manuell heruntergeladen oder direkt überliefert) beeinflussen die Kosten und die Handhabung der Anlage erheblich. Für eine effiziente Installation der Kameras sollten folgende Empfehlungen befolgt werden: (i) die Kamera so positionieren, dass der Aufnahmebereich maximal ist und wenn möglich eine Brücke oder sonstige bereits bestehende Konstruktion enthält, die das Gewässer quert; (ii) eine Stelle im Gewässer wählen, wo sich Holz ablagert, und den Winkel so wählen, dass die Kamera möglichst senkrecht auf das Gewässer schaut (Kamera an einem möglichst hohen Punkt anbringen), damit die räumliche Verzerrung im Bild minimiert werden kann; (iii) mögliche Beeinflussungen durch die Ufervegetation (Schattenwurf, Reflexionen) sollten berücksichtigt werden, da diese zu Unsicherheiten in der Klassierung führen können. Die manuelle Nachbearbeitung der Videobilder ist zeitintensiv. Automatische Verfahren wie z. B. neue Technologien auf der Basis von vernetzten Computer-Vision-Systemen sind wünschenswert. Dadurch würde die Erkennung, Verfolgung und Analyse des Schwemmholztransports in Echtzeit ermöglicht.

#### 2.5.3 Fernerkundung: Luftbilder und Drohneneinsatz

Immer häufiger werden zur Aufnahme von hochaufgelösten Bildern in Gewässern Drohnen eingesetzt. Die Aufnahmen ermöglichen eine detaillierte Inventarisierung des im Gerinne vorhandenen Schwemmholzes, wodurch räumliche und zeitliche Veränderungen bezüglich der Holzablagerungen analysiert werden können. Die Vegetation ist in Luft- und Satellitenbildern normalerweise gut sichtbar und mittels GIS kartierbar. Über eine Zeitreihe können so die Veränderungen vor und nach einem Hochwasserereignis beobachtet werden. Aus der Fläche von erodierter Vegetation lässt sich bei bekannter Walddichte ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) das Schwemmholzvolumen ableiten. Im Rahmen des *WoodFlow*-Projekts wurden bestehende Luftbilder von der Emme, der Sense und der Zulg analysiert, wobei die wichtigsten Ergebnisse im Folgenden vorgestellt werden.

Das Ziel der Arbeiten an der Emme (Ereignisanalyse des Hochwassers 2014; Ruiz-Villanueva et al., 2018) war eine

Verbesserung des Prozessverständnisses von Holzeintrag bzw. -ablagerung und damit verbunden die Identifikation der massgebenden Prozesse. Erste Resultate deuten darauf hin, dass gewisse Schwellenwerte sowohl den Eintrag als auch die Ablagerungsprozesse steuern. Die Analyse vergangener Ereignisse zeigt, dass die Variabilität im Holzeintrag grösstenteils durch den Niederschlag erklärt werden kann. Diese Variable beeinflusst auch die wichtigsten Eintragsprozesse wie z. B. die Seitenerosion. Die Daten zeigen eine grosse Streuung, was bedeutet, dass die Reaktion der Fließgewässer variabel ist. Gemäss den Ergebnissen vermögen die Gerinneneigung, die Gerinnebreite vor dem Hochwasser und die Sinuosität eine bedeutende Rolle in der Aufweitung des Gerinnes zu spielen. Generell steigt der Holzeintrag signifikant an, sobald das Verhältnis zwischen der Breite des aktiven Gerinnes vor und nach einem Hochwasser (Aufweitungsverhältnis) grösser als zwei ist (Abb. 42). Verengungen im Gerinne können eine wichtige Rolle spielen, jedoch waren in den Ergebnissen an der Emme und ihren Zuflüssen keine einheitlichen Muster zu erkennen. Dasselbe gilt auch für andere Variablen. So waren auch negative Korrelationen zwischen dem eingetragenen Holzvolumen und Verengungen, der Sinuosität des Gerinnes sowie der Gerinnebreite (vor dem Hochwasser) zu beobachten. Diese Korrelationen waren jedoch nicht signifikant und lassen sich damit erklärt werden, dass der Haupteintrag in Seitenbächen stattfindet, die generell enger und gerader sind als das Hauptgewässer. Eine statistisch signifikante positive Korrelation besteht zwischen der Niederschlagssumme und dem eingetragenen Holzvolumen.

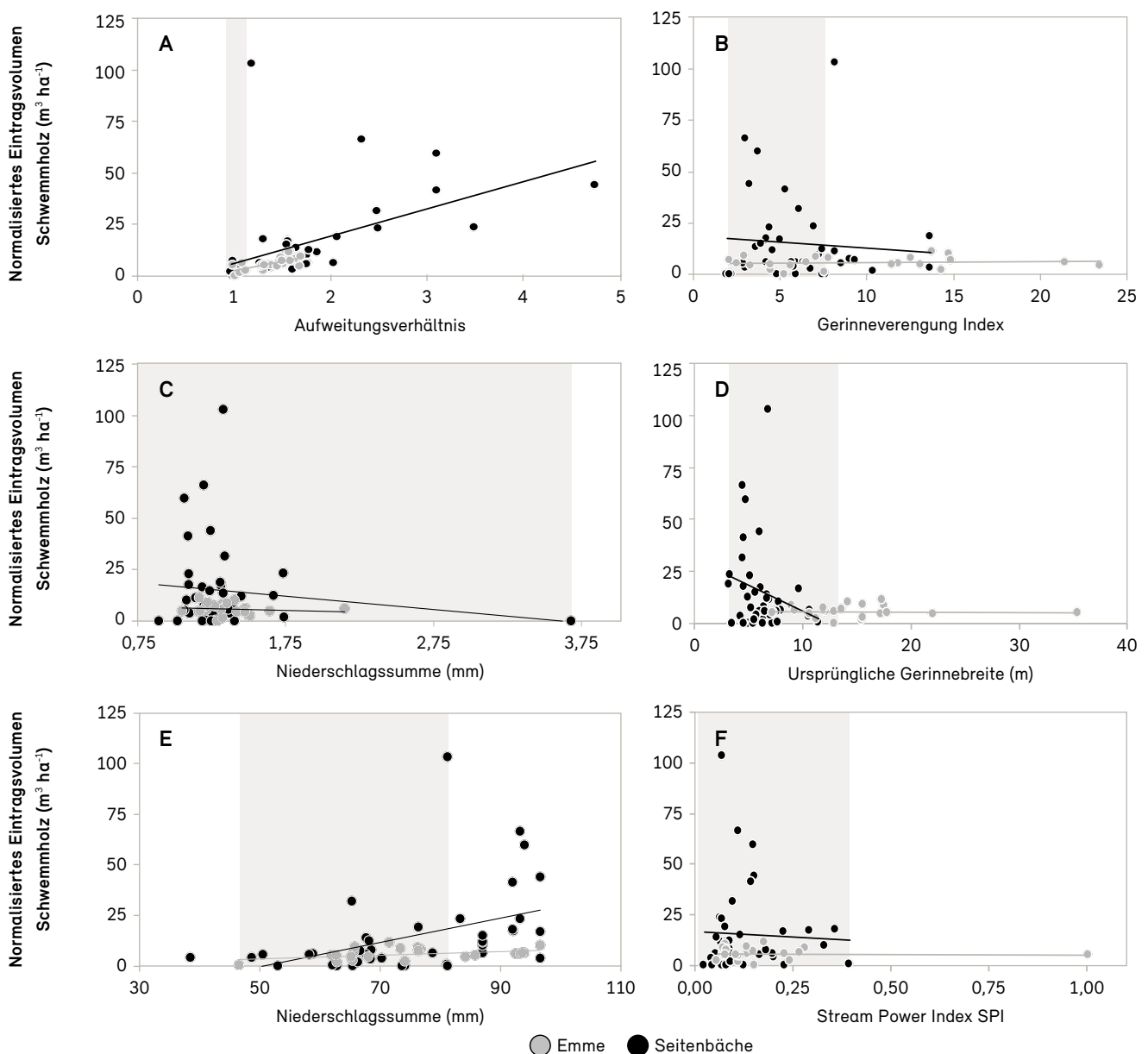
In der Zulg zeigten Luftbilder, dass vor dem Ereignis im Juli 2012 rund  $300 \text{ m}^3$  Holz von den Einhängen und den Ufern zum Gerinne transportiert wurden (zwischen  $150$  und  $600 \text{ m}^3$ , abhängig von der Vegetationsdichte). In den Jahren 2012 bis 2015 betrug die Menge an eingetragenen Holz etwa  $1400 \text{ m}^3$  (zwischen  $800$  und  $2430 \text{ m}^3$ ). Ein Teil dieses Materials wurde während des Hochwassers im Juli 2012 transportiert, und sein Transportvolumen wurde auf  $500$  bis  $700 \text{ m}^3$  geschätzt. Die Analyse der Luftbilder der Zulg zeigte auch, dass die im Gerinne abgelagerten Holz-mengen erheblich schwanken. Die grössten Holzvolumina der letzten Jahre wurden in Luftbildern aus dem Jahr 2010 beobachtet. Nach dem schwemmholzreichen Ereignis 2012 war die abgelagerte Holzmenge deutlich weniger

gross als zuvor. Dies bestätigt die Hypothese, dass die Holzmenge im Gerinne zeitlich variiert und ein Maximum zwischen Hochwasserereignissen erreicht. Ausserdem war zu beobachten, dass Schwemmholzablagerungen entlang der Zulg eng mit dem geomorphologischen Erscheinungsbild der einzelnen Abschnitte verbunden

sind. Die Zulg durchfliesst im mittleren Teil des Einzugsgebiets eine Schlucht, die ein potenzielles Akkumulationsgebiet für Schwemmholz darstellt und damit auch bei der Bildung der Schwemmholzabflüsse eine wichtige Rolle spielt. Holzablagerungen und die Verteilung von Schwemmholz spiegeln hauptsächlich die Eintragsraten

**Abb. 42: Holzeintrag in Abhängigkeit der Charakteristika und Veränderungen des Gerinnes**

Zusammenhänge zwischen dem eingetragenen Holzvolumen (normalisiert nach Gerinnefläche [ $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ]) und (A) Aufweitungsverhältnis; (B) Verengungen im Gerinne; (C) Sinuosität; (D) Gerinnebreite vor dem Hochwasser (m); (E) Niederschlagssumme und (F) Niederschlagsbasierte Abflussenergie pro Meter Gerinnebreite (SPI). Der hellgrau eingefärbte Hintergrund zeigt Wertebereiche auf, bei denen in gewissen Gerinneabschnitten auch gar kein Schwemmholz eingetragen wurde. Nach Ruiz-Villanueva et al., 2018.



und -standorte wider. Da die Transportkapazität flussabwärts zunimmt, ist der Schwemmholztransport in diesen Abschnitten eher durch das Vorkommen limitiert, als durch den Transport.

In der Sense bei Plaffeien wurden historische Luftbilder mit aktuellen Drohnenflügen kombiniert. Das Ziel der Untersuchung bestand darin, die Faktoren zu verstehen, welche den Schwemmholzspeicher im Gerinne beeinflussen sowie die Beziehung zwischen Schwemmholzspeicher und der Hochwasserhäufigkeit bzw. -stärke beschreiben. Weiter wurden die zeitliche und räumliche Variabilität von Schwemmholzablagerungen sowie Veränderungen in der Ufervegetation und der Flussmorphologie analysiert. In einigen Fällen konnten auch die Abmessungen des Schwemmholzes abgeschätzt werden (Abb. 43A). Die Ergebnisse zeigen zum einen, dass grosse Hochwasserereignisse Veränderungen der Vegetationsdecke und grossflächige Erosion nach sich ziehen können. Andererseits führen aber auch häufige Hochwasserereignisse geringerer Stärke zu Erosion und somit zum Eintrag von Schwemmholz. Die Holzablagerungen zeigen ein für verzweigte Flüsse typisches Muster: Das Schwemmholz liegt verstreut auf den Kiesbänken, lagert sich an deren Spitze ab oder verkeilt sich in der Vegetation auf den Bänken. Die Holzstücke liegen meist einzeln verstreut, seltener bilden sich auch Ansammlungen mehrerer Baumstämme.

Während des *WoodFlow*-Projekts wurden Drohnen (eBee senseFly RTK) dazu verwendet, hochauflösende Luftbilder zu erzeugen und die Topographie zu erfassen. Unter Verwendung von «structure from motion»-Photogrammetrie können aus RGB-Aufnahmen hochauflösende, digitale Oberflächenmodelle gewonnen werden, die nicht nur die Erkennung von Holzablagerungen erlauben, sondern auch eine Abschätzung der Volumina. Aufbauend auf einer in Chile entwickelten und getesteten Methode (Sanhueza et al., 2019) wurde für die Schweizer Einzugsgebiete ein ähnlicher Ansatz entwickelt, wobei unterschiedliche Methoden und Programme getestet wurden. Die für die Schätzung der Holzvolumina erforderliche Auflösung der Luftbilder ist sehr hoch, weshalb die Vor- und Nachbearbeitung der Bilder wichtig ist. Abb. 43B zeigt zwei digitale Oberflächenmodelle (DOM), die aus denselben RGB-Bildern von einem Drohnenflug im November 2016

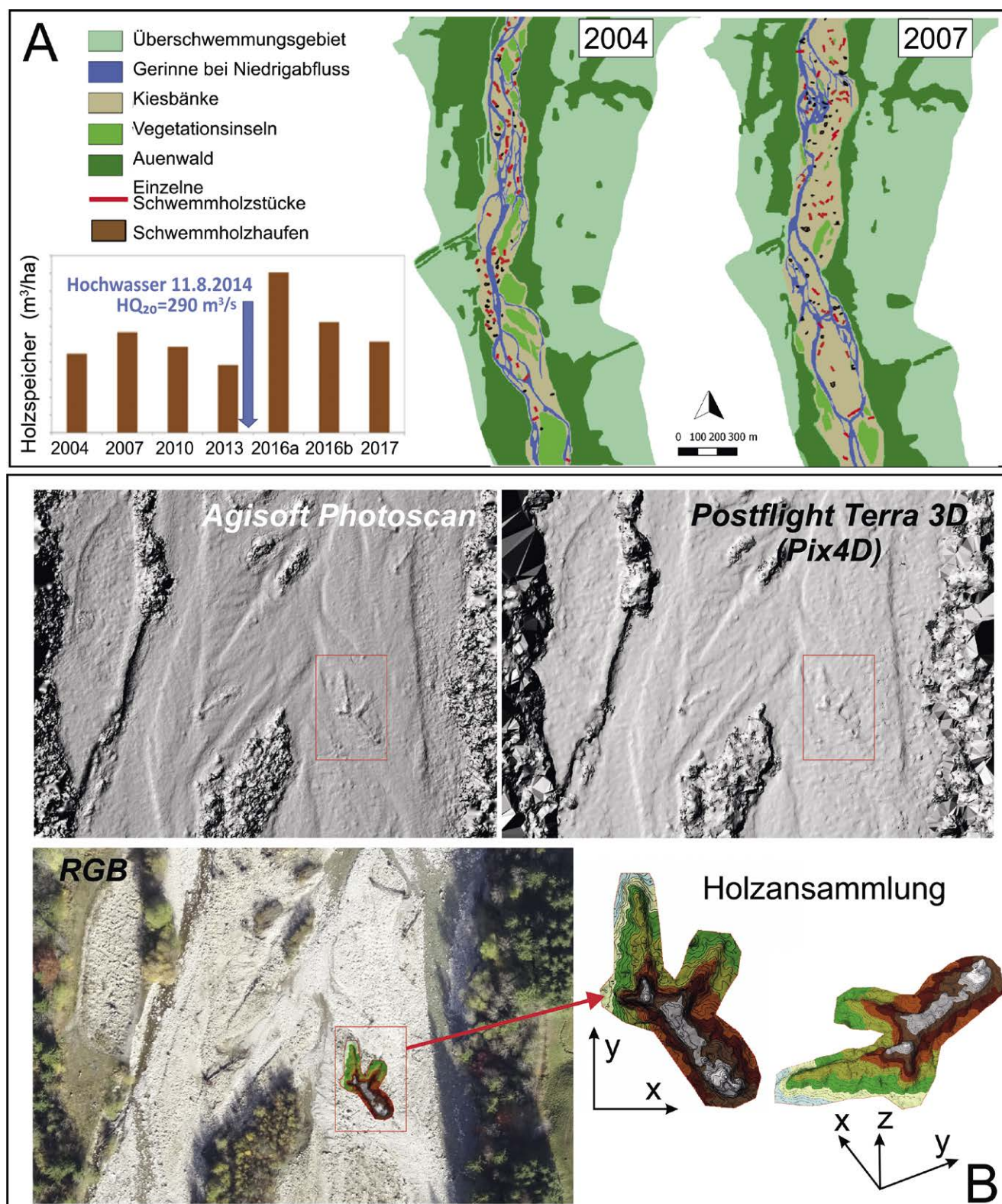
mit zwei unterschiedlichen Softwareprogrammen ermittelt wurden.

### Empfehlungen und wichtige Anmerkungen

Mittels Luftbilddaufnahmen kann das Problem von nicht-repräsentativen Stichproben, mit welchem man in Feldstudien mit limitierter Zeit und begrenzten Untersuchungsgebieten oft konfrontiert ist, gelöst werden. Für die genaue Vermessung einzelner Holzstücke sind jedoch hochauflösende Bilder (d. h. eine Bildauflösung von mindestens 10 cm nach Pecorari et al. [2007] und Comiti et al. [2008]) erforderlich. Moderne Fernerkundungstechniken (unter Verwendung von Luftaufnahmen wie LiDAR oder Photogrammetrie) können verwendet werden, um räumlich-zeitliche digitale Gelände- und Oberflächenmodelle sowie Luftaufnahmen zu erstellen. Diese liefern für ein bestimmtes Erhebungsdatum aktuelle dreidimensionale Informationen zum Gelände (DGM ohne Vegetationsstruktur) oder zur Oberfläche über dem Gelände (DOM einschliesslich Vegetationsstruktur). Das Schweizer Bundesamt für Landestopografie (swisstopo) sammelt seit rund zwei Jahrzehnten derart hochauflösende Informationen. In Verbindung mit dem zunehmenden Einsatz von Drohnen können in kurzer Zeit digitale Geländemodelle, Oberflächenmodelle oder Luftbilder aufgenommen werden. Diese ermöglichen eine effiziente Erfassung und Analyse von Vor- und Nachereignissen pro (Teil-)Einzugsgebiet.

**Abb. 43: Räumliche und zeitliche Veränderungen der Flussmorphologie, Ufervegetation und Schwemmholzablagerungen**

Karten der Fernerkundungsanalyse mit den geomorphologischen Einheiten, der Vegetation und Schwemmholzablagerungen. (A) Zeitliche Variabilität der Ablagerungen im Untersuchungsgebiet für den betrachteten Zeitraum; (B) RGB-Mosaikbild eines Drohnenflugs vom November 2016: Abgebildet sind die aus den Programmen Agisoft Photoscan und Postflight Terra 3D (Pix4D) berechneten digitalen Oberflächenmodelle (DOM) und ein Beispiel einer Volumenschätzung einer Holzansammlung mithilfe von GIS-Anwendungen.



## 3 Schwemmholzverklausung

In Kapitel 3 wurden Verklausungsprozesse von Schwemmholz und deren Auswirkungen an Bauwerken in Fließgewässern untersucht. Mithilfe von Modellversuchen im Labor der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) wurde die Verklausungswahrscheinlichkeit bei Brückenpfeilern analysiert. Dabei wurden auch bestehende Massnahmen zur Reduktion des Verklausungsrisikos bei Brückenpfeilern untersucht und weiterentwickelt. Weiter wurden der Aufstau und der lokale Kolk infolge einer Schwemmholzverklausung mit Modellversuchen untersucht. Neben der Entwicklung von Prognosemodellen dienen die Versuchsergebnisse als Grundlage für die Validierung der numerischen Modellierung mit Iber-Wood. Eine ausführliche Beschreibung der Prozesse und Ergebnisse ist in Schalko (2018) aufgeführt.

### 3.1 Verklausungswahrscheinlichkeit an Brückenpfeilern

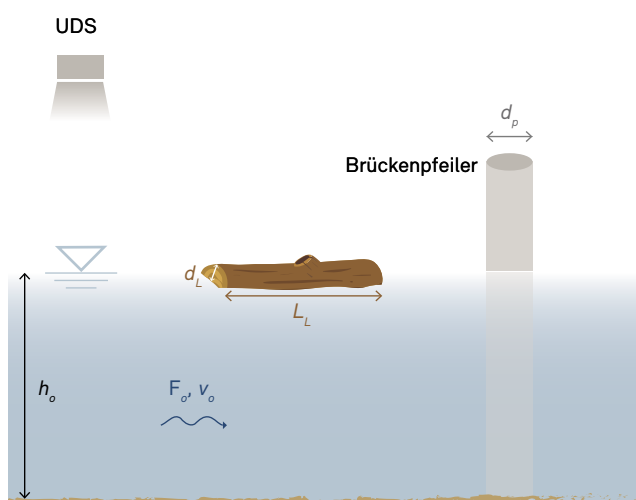
Um die Gefahrenbeurteilung bei Hochwasserereignissen zu verbessern, sind genaue Kenntnisse der Verklausungswahrscheinlichkeit von Schwemmholz, z. B. an Brückenpfeilern, erforderlich. Die Verklausungswahrscheinlichkeit an Brückendeckwerken kann mit Gleichungen nach Lange und Bezzola (2006) oder Schmocker und Hager (2011) ermittelt werden. In dieser Arbeit wurde mit Modellversuchen im Massstab 1:20 die Verklausungswahrscheinlichkeit  $p$  an Brückenpfeilern untersucht. Bei den Versuchen wur-

den die Zuflussbedingungen (Zufluss-Froude-Zahl  $F_o$ , Zufluss-Wassertiefe  $h_o$ , und Zufluss-Fließgeschwindigkeit  $v_o$ ), die Holzabmessungen (verschiedene Holzlängen  $L_L$  und Holzdurchmesser  $d_L$ ), die Holzeigenschaften (Einzeltransport versus schubweisen Transport, Holzdicke, Hölzer mit und ohne Äste) und die Eigenschaften des Brückenpfeilers (Pfeilerdurchmesser  $d_p$ , Rauheit, Form und Anzahl) variiert. Weiter wurde untersucht, ob ein Pfeilerkolk Einfluss auf  $p$  hat. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 44 dargestellt.

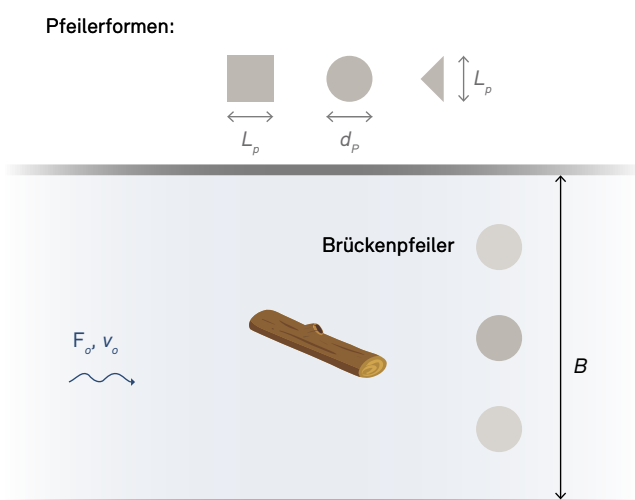
Abb. 44: (A) Seitenansicht und (B) Grundriss des Versuchsaufbaus mit 1 bzw. 2 Pfeilern

UDS = Ultrasonic Distance Sensor,  $h_o$  = Zufluss-Wassertiefe,  $F_o$  = Zufluss-Froude-Zahl,  $v_o$  = Zufluss-Fließgeschwindigkeit,  $L_L$  = Holzlänge,  $d_L$  = Holzdurchmesser,  $d_p$  = Pfeilerdurchmesser,  $L_p$  = Pfeilerlänge,  $B$  = Kanalbreite und verschiedene Pfeilerformen.

#### A Seitenansicht



#### B Grundriss



Während der Versuche wurden die Holzstücke quer zur Fließrichtung 1 m oberstrom des Brückenpfeilers in Kanalmitte zugegeben. Falls das Holzstück beim Brückenpfeiler hängen blieb, wurde dies als «Verklauung» bewertet und das Holzstück wieder aus dem Kanal entnommen. Dieser Vorgang wurde für jede Versuchseinstellung 40-mal wiederholt, um eine statistisch signifikante Verklauungswahrscheinlichkeit mit einer Genauigkeit von  $\pm 10\%$  zu berechnen. Bei schubweisem Schwemmholztransport wurden jeweils 3 oder 5 Hölzer gemeinsam zugegeben bzw. 40 Hölzer hintereinander. Fotos der Modellversuche sind in Abb. 45 für ausgewählte Parameter dargestellt.

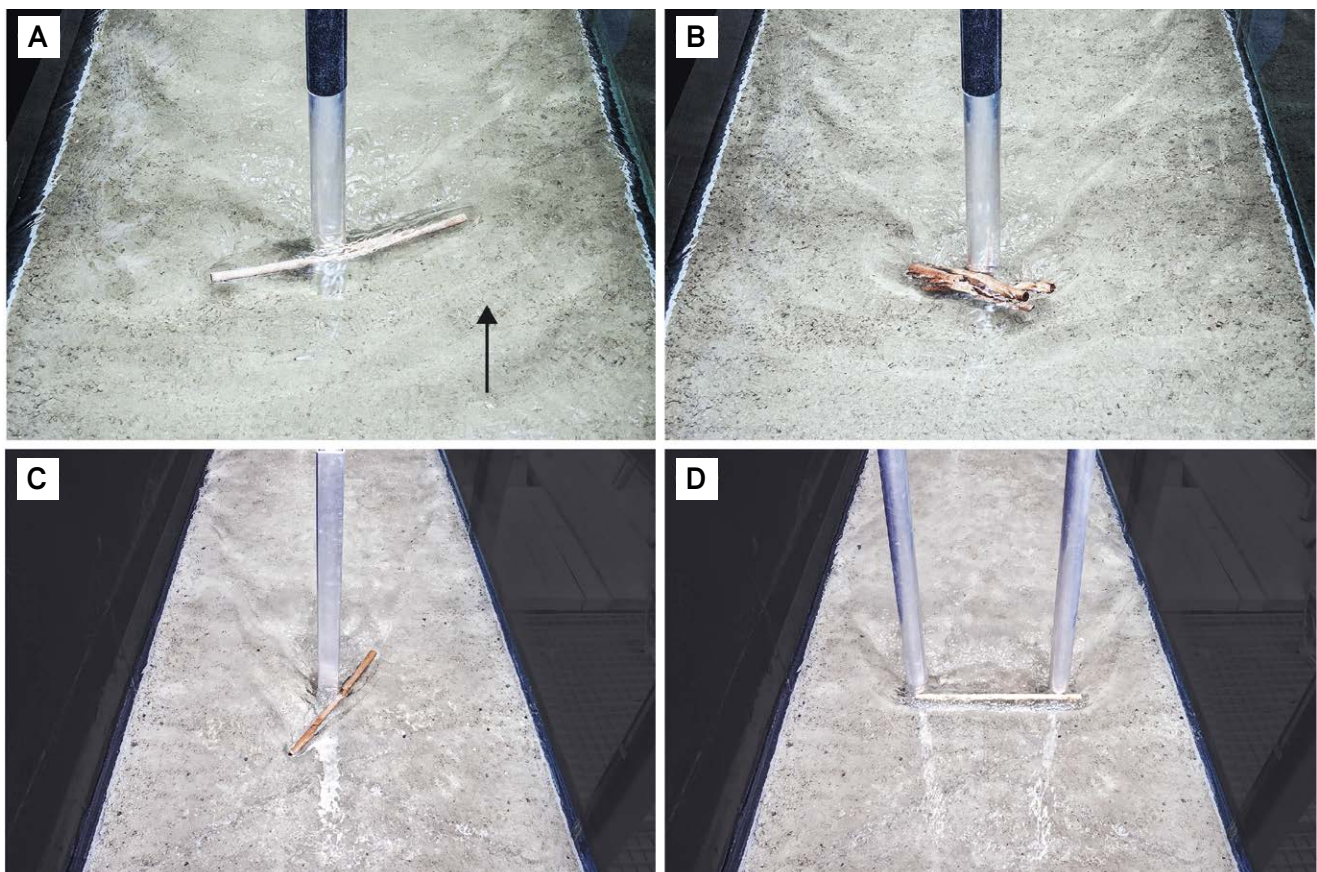
Basierend auf den Ergebnissen kann zusammengefasst werden, dass die Verklauungswahrscheinlichkeit  $p$

- mit zunehmender Holzlänge,
- mit abnehmender Zufluss-Fließgeschwindigkeit,
- für schubweisen Schwemmholztransport und
- mit zunehmender Pfeileranzahl

zunimmt. Falls Hölzer schwimmend transportiert werden, hat die Zufluss-Wassertiefe keinen Einfluss auf  $p$ , da das Holz nicht mit der Sohle in Kontakt ist. Weiter haben die Versuche gezeigt, dass der Holzdurchmesser, die Holzdichte, Hölzer mit Ästen, die Pfeilerrauheit, die Pfeilerform, sowie der Pfeilerkolk einen geringen Einfluss auf die Verklauungswahrscheinlichkeit haben. Detaillierte Ausführungen zur Verklauungswahrscheinlichkeit sind in Schalko (2018, S. 83 ff.) zu finden.

**Abb. 45: Fotos der Modellversuche zur Verklauungswahrscheinlichkeit an Brückenpfeiler**

Modellversuche zur Ermittlung der Verklauungswahrscheinlichkeit bei einem kreisförmigen Brückenpfeiler und (A) Einzeltransport versus (B) schubweisen Schwemmholztransport, und bei (C) einem quadratischen Brückenpfeiler, und (D) zwei kreisförmigen Brückenpfeilern.



### 3.1.1 Empfehlungen

Um gefährdete Brückenquerschnitte auszuselektieren und geeignete Schutzmassnahmen abzuleiten, wurden die Ergebnisse der Modellversuche in einer Abschätzungsgleichung zusammengefasst. Die Verklausungswahrscheinlichkeit  $p$  an einem Brückenpfeiler kann mithilfe des dimensionslosen Schwemmholz-Verklausungswahrscheinlichkeitsfaktors  $LW_p$  für Einzeltransport und Schubweisen Transport und für  $F_o = 0.08 \dots 1.2$  bzw.  $0 \leq LW_p \leq 0.53$  ( $R^2 = 0.83$ ) abgeschätzt werden:

$$p = e^{-12.7LW_p} \quad (3.1)$$

mit

$$LW_p = x_n \left( \frac{v_o^2}{2gL_L} \right)^{0.43} \left( \frac{d_p}{L_L} \right)^{0.60}, \quad (3.2)$$

wobei

$x_n = 1.00$  für Einzeltransport

$x_n = 0.65$  für Schubweisen Schwemmholztransport

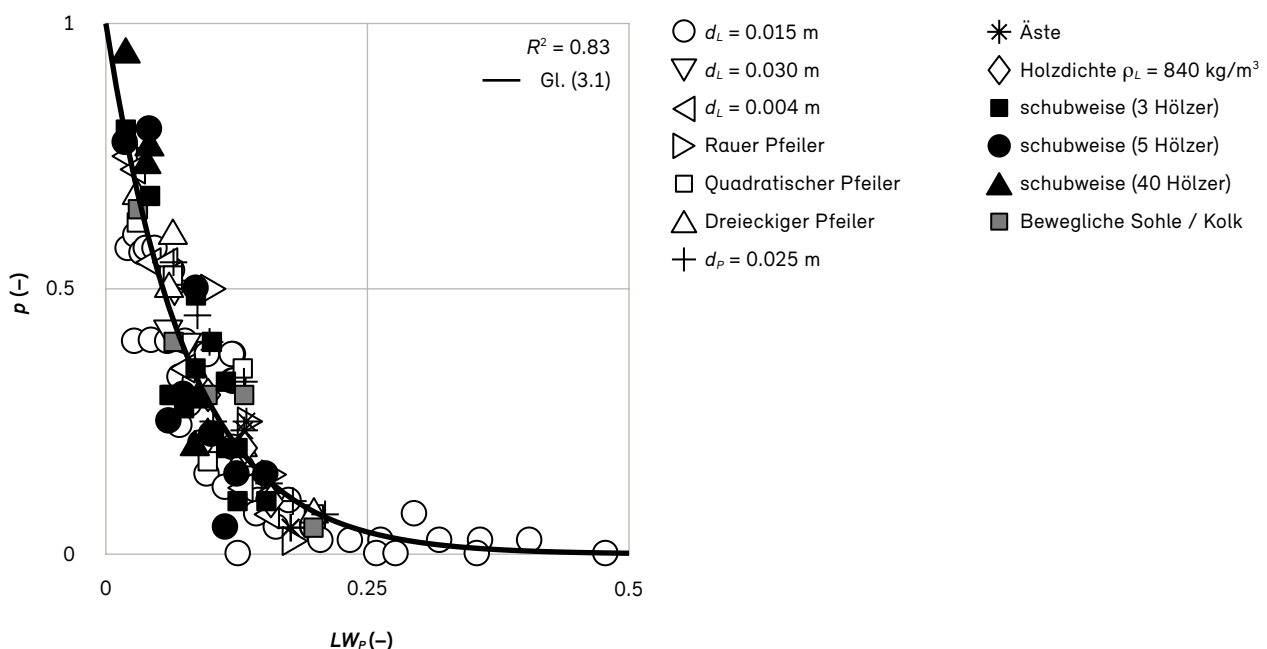
Gemäss Gl. (3.2) hat die Holzlänge  $L_L$  den grössten Einfluss auf  $p$ , gefolgt von Holztransportart  $x_n$ , Zufluss-Fliessgeschwindigkeit  $v_o$  und Pfeilerdurchmesser  $d_p$ .

Abb. 46 zeigt  $p$  als Funktion von  $LW_p$  für die verschiedenen variierten Parameter und Gl. (3.1). Für die Praxisanwendung wird empfohlen, bei  $p \geq 30\%$  und der Möglichkeit einer grösseren Verklausung (z. B. über die gesamte Gerinnebreite) den Aufstau infolge Schwemmholzverklausung in einem nächsten Schritt zu berechnen (Kap. 3.3) und mit den Höhen der Ufer bzw. Hochwasserschutzdämmen zu vergleichen.

Für mehrere Brückenpfeiler können abhängig vom Verhältnis zwischen Holzlänge  $L_L$  und Pfeilerabstand folgende Empfehlungen abgeleitet werden:

- $L_L > \text{Pfeilerabstand}$ : Verklausungswahrscheinlichkeit für Fliessgeschwindigkeiten von  $v_o = 0.20 \text{ m/s}$  bis  $\approx 1 \text{ m/s}$  (Modellmassstab 1:20) resultierte zu  $p \geq 50\%$  für Einzeltransport und zu  $p \geq 75\%$  für Schubweisen Transport. Somit stellen Querschnitte mit zwei oder mehreren Brückenpfeilern eine erhöhte Verklausungsgefahr dar, und weitere Schritte für die Gefahrenbeurteilung sind erforderlich. Daher wird in diesem Fall empfohlen, den Aufstau infolge einer Schwemmholzverklausung abzuschätzen (Kap. 3.3).

Abb. 46: Verklausungswahrscheinlichkeit an einem einzelnen Brückenpfeiler mit Gl. (3.1) (schwarze Linie)



- $L_L < \text{Pfeilerabstand}$ : Verklausungswahrscheinlichkeit kann mittels Gl. (3.1) abgeschätzt werden. Bei  $p \geq 30\%$  und der Möglichkeit zu einer Verklausung über die Gerinnebreite wird wiederum empfohlen, den Aufstau infolge Schwemmholzverklausung abzuschätzen (Kap. 3.3).

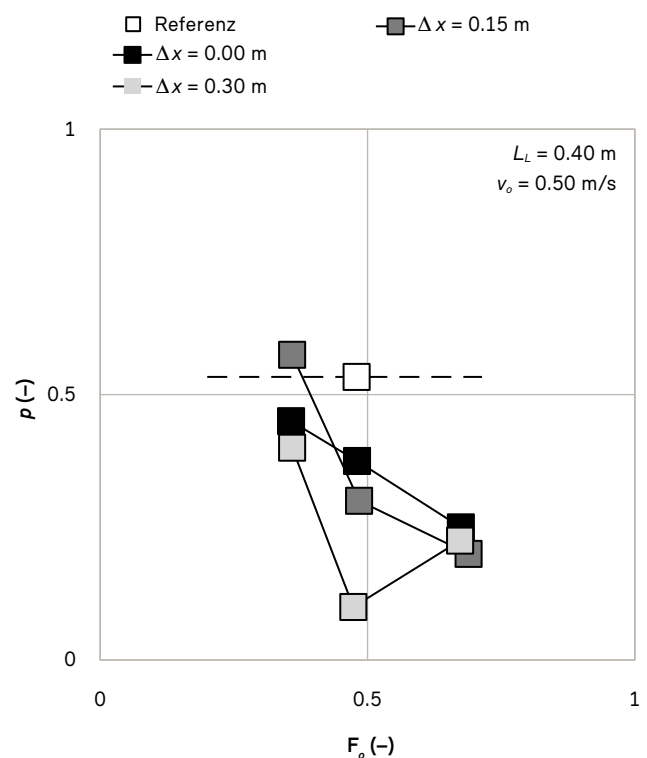
### 3.2 Massnahmen zur Verringerung der Verklausungswahrscheinlichkeit an Brückenpfeilern

Um die Verklausungswahrscheinlichkeit  $p$  an einem Brückenpfeiler zu reduzieren, wurden Schwemmholzabweiser (Abb. 47A) und Schwellen (Abb. 47B) getestet. Schwemmholzabweiser sind dem Pfeiler vorgelagert und haben die Aufgabe, Hölzer parallel zur Fließrichtung auszurichten, um  $p$  zu reduzieren. Sie wurden bereits bei ausgewählten Standorten an Schweizer Flüssen errichtet (Sihl, Thur). Im Vergleich dazu erzeugen vorgelagerte Schwellen einerseits eine Strömung normal zu ihrer Ausrichtung und andererseits Oberflächenwellen, welche bereits hängen gebliebene Stämme eventuell wieder mobilisieren können. Detaillierte Ausführungen zu den Massnahmen sind in Schalko (2018, S. 154 ff.) zu finden.

In den Modellversuchen haben verschiedene Konfigurationen von Schwemmholzabweisern die Verklausungswahrscheinlichkeit  $p$  nicht reduziert, sondern zu einer Verklausung beim Abweiser geführt. Im Gegensatz dazu

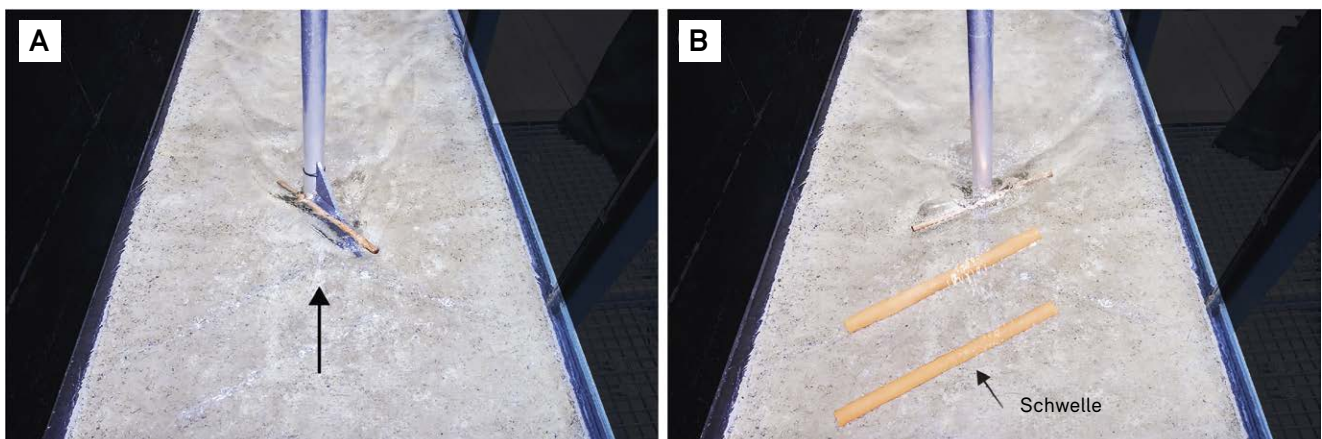
**Abb. 48: Einfluss von Schwellen auf die Verklausungswahrscheinlichkeit**

Verklausungswahrscheinlichkeit  $p$  in Abhängigkeit der Zufluss-Froude-Zahl  $F_o$  für  $v_o = 0.50 \text{ m/s}$  und  $L_L = 0.40 \text{ m}$  mit zwei parallel angeordneten Schwellen ( $\Delta x = 0 \dots 0.30 \text{ m}$ ) im Vergleich zum Referenztest ohne Schwelle.



**Abb. 47: Massnahmen zur Verringerung der Verklausungswahrscheinlichkeit an Brückenpfeilern**

(A) Schwemmholzabweiser versus (B) Schwellen zur Verringerung der Verklausungswahrscheinlichkeit an Brückenpfeilern.



haben zwei parallel angeordnete Schwellen, in Abhängigkeit vom Abstand zum Brückenpfeiler  $\Delta x$ , die Verklausungswahrscheinlichkeit  $p$  um bis zu 30 % reduziert (Abb. 48). In den Modellversuchen wurde der Einfluss einer beweglichen Sohle nicht untersucht. Mögliche Ablagerungen oder Kolke könnten die Wirksamkeit dieser Massnahme reduzieren. Auch konnte die Wirksamkeit nur für bestimmte Wassertiefen bzw. Zuflussbedingungen nachgewiesen werden. Die Umsetzung eignet sich daher nur bei bestimmten Situationen und benötigt jeweils Überprüfungen im Einzelfall.

### 3.3 Aufstau und lokaler Kolk infolge Schwemmholzverklausung

Der Schwemmholztransport während Hochwasserereignissen kann bei Brücken oder Wehren zu Verklausungen führen. Die Verringerung des Fließquerschnitts führt einerseits flussaufwärts zu einem Aufstau mit möglichen Überflutungen und andererseits zu möglichen Kolkerscheinungen oder Schäden am Bauwerk selbst. Daher wurden der Aufstau und der lokale Kolk infolge Schwemmholzverklausung im Rahmen von drei Versuchsserien A – C an der VAW analysiert (Abb. 49A–C). Das verklaute Bauwerk wurde im Modell vereinfacht durch eine Verklausung an einer Rechenreihe simuliert. Somit können die Resultate auch für die Berechnung des Aufstaus an einem Schwemmholzrechen verwendet werden.

#### Serie A: Vordefinierte Verklausung mit fester Sohle

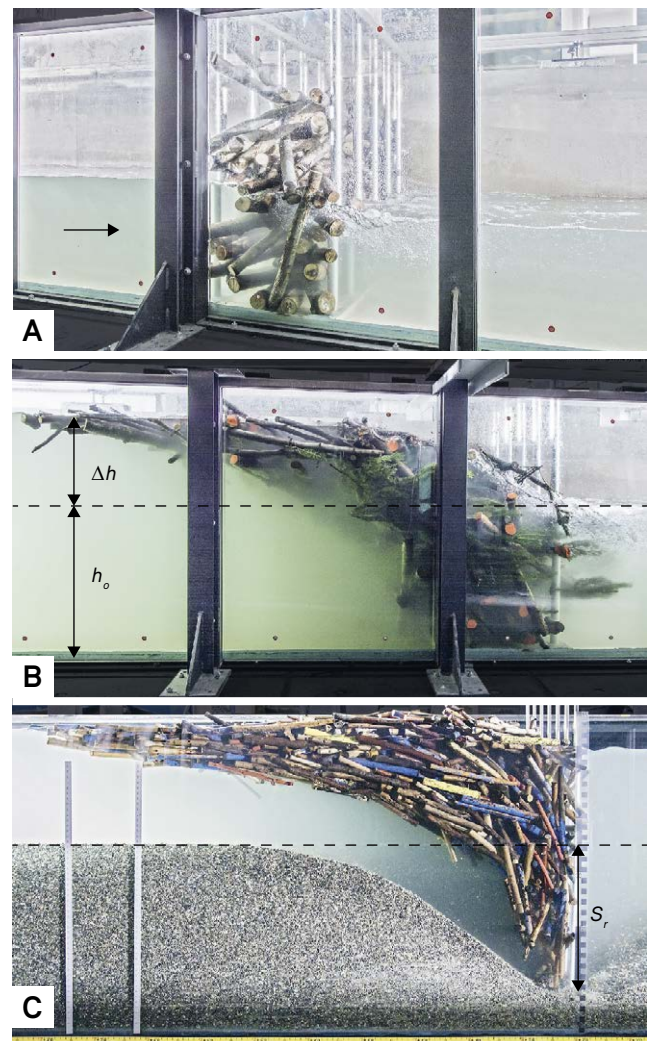
Serie A diente dazu, in abstrahierter Form (Abb. 49A) den Aufstau verschiedener Schwemmholzkonfigurationen zu bestimmen. Die Verklausung wurde zwischen zwei Rechenreihen vordefiniert eingebaut. Für den Nachweis der Modellähnlichkeit, insbesondere für die Auswirkung von Feinmaterial (FM), wurden drei unterschiedliche geometrische Massstäbe gewählt (Massstabsfaktor  $\lambda = 6, 30, 50$ ). Die Anfangsbedingungen (Anfangswassertiefe  $h_o$ , Durchfluss  $Q_o$ , Zufluss-Froude-Zahl  $F_o$ ), und die Verklausungseigenschaften (Verklausungslänge  $L_A$ , Holzdurchmesser  $d_L$ , Auflockerungsfaktor  $\alpha = V_l/V_s$  mit  $V_l$  = Lockervolumen und  $V_s$  = Festvolumen, Anteil Feinmaterial (Äste und Blätter, FM) wurden systematisch variiert und jeweils der resultierende Aufstau bestimmt.

Basierend auf den Ergebnissen zum Aufstau  $\Delta h$  infolge einer vordefinierten Schwemmholzverklausung (Serie A), nimmt der relative Aufstau  $\Delta h/h_o$  zu mit

- zunehmender Zufluss-Froude-Zahl  $F_o$ ,
- abnehmendem Auflockerungsfaktor  $\alpha$  bzw. für kompaktere Verklausungen,
- abnehmendem Holzdurchmesser  $d_L$ ,

#### Abb. 49: Schwemmholzverklausungen an Modellrechen

Fotos von Modellversuchen: (A) vordefinierte Verklausung zwischen zwei Rechenreihen mit fester Sohle; (B) natürliche Verklausung mit fester Sohle, Zufluss-Wassertiefe  $h_o$  und Aufstau  $\Delta h$ ; (C) natürliche Verklausung mit beweglicher Sohle und Kolk am Rechen  $S_r \approx S_{max}$  (maximale Kolkentiefe).



Bilder: VAW (2018)

- zunehmender Verklausungslänge  $L_A$  in Strömungslängsrichtung und
- zunehmendem Anteil an Feinmaterial  $FM$ .

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Prototyp-Abmessungen wurde im Rahmen einer Modellfamilie untersucht. Dazu wurden Versuche mit gleichen Randbedingungen in den drei verschiedenen Massstäben 1:6, 1:30 und 1:50 durchgeführt. Mögliche Modelleffekte können abgeleitet werden, falls die Ergebnisse für die Versuche im kleinen Massstab (1:30 oder 1:50) stark von den Ergebnissen der Versuche ähnlich dem Prototyp abweichen (1:6). Für die gleichen Randbedingungen variierten die mittleren Abweichungen des Aufstaus für die verschiedenen Massstäbe zwischen 3 % und 22 %. Da kein eindeutiger Trend der Abweichungen abgeleitet werden konnte und die Abweichungen im Bereich der Reproduzierbarkeit liegen, kann angenommen werden, dass potenzielle Massstabeffekte bei den kleinen Massstäben vernachlässigt werden können.

#### Serie B: Natürliche Verklausung mit fester Sohle

In Serie B (Abb. 49B) wurde eine Rechenreihe entfernt und das Schwemmholz paketweise zugegeben. Somit konnte sich in Abhängigkeit der Zuflussbedingungen die Schwemmholzverklausung natürlich bilden. Der Aufstau am Rechen wurde nach Zugabe jedes einzelnen Schwemmholzpakets gemessen. Die Modellversuche wurden für zwei Massstäbe (1:6 und 1:30), verschiedene  $F_0$  und  $FM$ -Anteile untersucht.

Basierend auf den Ergebnissen zum Aufstau  $\Delta h$  infolge einer natürlichen Schwemmholzverklausung (Serie B) konnten die massgebenden Parameter aus Serie A bestätigt werden. Bei einer natürlichen Verklausung ist die verlegte Rechenfläche kleiner als bei einer vordefinierten Verklausung (Serie A), weshalb der relative Aufstau  $\Delta h/h_0$  für die gleichen Randbedingungen nur etwa die Hälfte beträgt.

#### Serie C: Natürliche Verklausung mit beweglicher Sohle

In Serie C (Abb. 49C) wurde wiederum eine natürliche Verklausung mit einer Rechenreihe untersucht. Um neben dem Aufstau auch den Einfluss möglicher Kolkerscheinungen zu untersuchen, wurden die Modellversuche mit einer beweglichen Sohle durchgeführt. Für das Sohl-

material wurde Einkornmaterial verwendet und der mittlere Korndurchmesser  $d_m$  variiert. Ähnlich wie in Serie B wurden Aufstau und Kolk am Rechen nach Zugabe jedes einzelnen Schwemmholzpakets gemessen. Nach Zugabe der gesamten Schwemmholzmenge wurde zusätzlich die Sohltopographie aufgenommen.

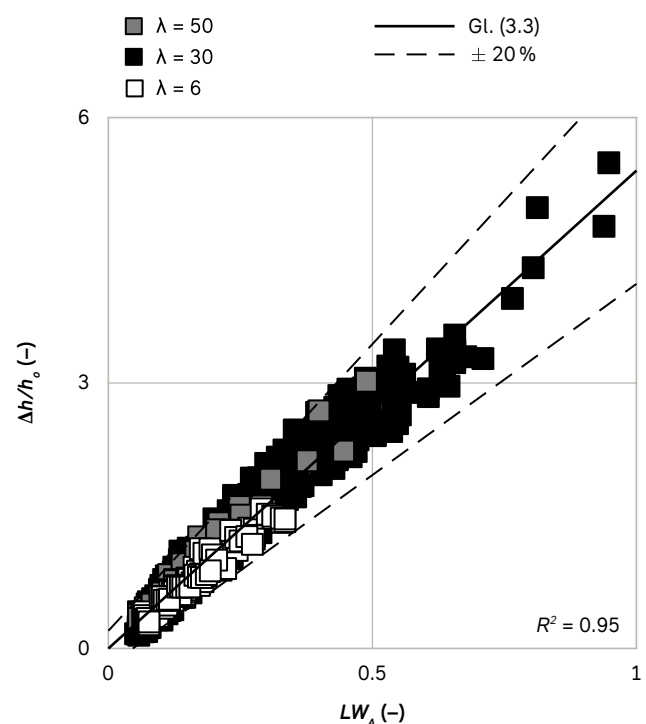
Die Kolkbildung in Serie C führt dazu, dass die verlegte Fließfläche im Vergleich zu Serie A weiter abnimmt. Der resultierende Aufstau beträgt bei gleichen Randbedingungen nur mehr etwa ein Drittel. Basierend auf den Ergebnissen zum lokalen Kolk, nimmt die Kolktiefe zu mit

- zunehmendem spezifischem Durchfluss  $q$ ,
- abnehmendem mittlerem Korndurchmesser  $d_m$  und
- zunehmendem Schwemmholzvolumen.

#### 3.3.1 Empfehlungen: Aufstau infolge Schwemmholzverklausung

Der gemessene relative Aufstau  $\Delta h/h_0$  kann mit dem dimensionslosen Aufstaufaktor  $LW_A$  zusammenge-

Abb. 50: Relativer Aufstau  $\Delta h/h_0$  als Funktion von  $LW_A$  für Serie A ( $\lambda = 50$ ,  $\lambda = 30$ ,  $\lambda = 6$ ), Gl. (3.3), und  $\pm 20\%$  Abweichung



fasst und mit einer linearen Beziehung für  $F_o = 0.2...1.4$  ( $R^2 = 0.95$ ) wie folgt beschrieben werden (Abb. 50):

$$\frac{\Delta h}{h_o} = 5.4 L W_A = 5.4 \frac{F_o u^{1/3} (9FM + 1)}{a^{4/3}} = 5.4 \frac{F_o (L_A/d_L)^{1/3} (9FM + 1)}{a^{4/3}}. \quad (3.3)$$

Das Verhältnis von Verklausungslänge und Holzdurchmesser wird mit dem Umlenkungsfaktor  $u$  beschrieben. Die Verklausungslänge  $L_A$  kann vereinfacht mithilfe einer rechteckförmigen Verklausung (Flussbreite  $B$ ) und unter der Berücksichtigung von  $a = V_l/V_s$  ermittelt werden:

$$L_A = \frac{V_l}{h_o B} \text{ und } u = \frac{L_A}{d_L} = \frac{V_l}{h_o B d_L} = \frac{a V_s}{h_o B d_L}. \quad (3.4)$$

Die verschiedenen Verklausungsformen aus den Serien A – C (Abb. 49A-C) können mit dem Verklausungsformfaktor  $f_A$  berücksichtigt werden. Somit kann der relative Aufstau  $\Delta h/h_o$  wie folgt bestimmt werden:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta h}{h_o} &= 5.4 f_A \frac{F_o (a V_s / (h_o B d_L))^{1/3} (9FM + 1)}{a^{4/3}} \\ &= 5.4 f_A \frac{F_o (V_s / (h_o B d_L))^{1/3} (9FM + 1)}{a} \end{aligned} \quad (3.5)$$

mit

- $f_A = 1.00$  für eine vordefinierte Verklausung mit fester Sohle (Serie A),
- $f_A = 0.55$  für eine natürliche Verklausung mit fester Sohle (Serie B), und
- $f_A = 0.30$  für eine natürliche Verklausung mit beweglicher Sohle (Serie C).

Gemäss Gl. (3.3) und Gl. (3.5) haben der Auflockerungsfaktor  $a$ , die Zufluss-Froude-Zahl  $F_o$  und der Anteil an Feinmaterial  $FM$  den grössten Einfluss auf  $\Delta h$ . Für ein gegebenes Schwemmholzvolumen  $V_s$  kann  $\Delta h/h_o$  mit einer Sensitivitätsanalyse von  $f_A$  berechnet werden;  $f_A$  sollte wie folgt gewählt werden:

- *Worst-Case-Szenario:* Um den grössten Aufstau zu ermitteln, wird eine rechteckförmige Verklausung angenommen, d. h.  $f_A = 1$  in Gl. (3.5).
- *Average-Case-Szenario:* Bei Bauwerken, an denen eine Kolkbildung aufgrund der Foundation verhindert wird, soll eine natürliche Verklausung mit fester Sohle angenommen werden, d. h.  $f_A = 0.55$ . Dieses Szenario

entspricht am ehesten den Prototyp-Bedingungen, und es wird empfohlen, als Startwert  $f_A = 0.55$  anzunehmen.

- *Best-Case-Szenario:* Bei Bauwerken, an denen eine Kolkbildung erwartet wird und tolerierbar ist (z. B. Einzelfundation), kann  $f_A = 0.30$  und somit ein reduzierter Aufstau angenommen werden.

Der Auflockerungsfaktor  $a$  sollte gemäss Daten von früheren Hochwasserereignissen (Bezzola & Hegg, 2007) zwischen  $a = 2...5$  gewählt werden. Der Anteil an Feinmaterial  $FM$  kann mithilfe einer Sensitivitätsanalyse berücksichtigt und zwischen  $FM = 2...20\%$  angenommen werden. Die Daten zu den Zuflussbedingungen (Zufluss-Froude-Zahl, Fließgeschwindigkeit und Fliesstiefe) können basierend auf Messdaten (Abfluss, Querprofilgeometrie, Lage des Wasserspiegels) von früheren Hochwasserereignissen gewählt werden. Das zu erwartende Schwemmholzvolumen (effektives Fest- oder Lockervolumen) lässt sich entweder mit den empirischen Schätzformeln (Kap. 1.5) oder mit den räumlich expliziten Ansätzen (Kap. 1.2 bis 1.4) ermitteln.

Weiter kann das sogenannte charakteristische Schwemmholzvolumen  $V_c$ , das den massgebenden Aufstau erzeugt, als Funktion der Zufluss-Froude-Zahl und des Sohlmaterials abgeschätzt werden. Das Verhältnis von  $V_c/(B h_o^2)$  (relatives  $V_c$ ) entspricht dem erforderlichen Volumen, um einen idealisierten rechteckförmigen Querschnitt mit den Massen  $B \times h_o \times h_o$  zu blockieren.  $V_c$  kann für eine feste Sohle und  $F_o = 0.3...1.5$  ( $R^2 = 0.89$ ) mit

$$\frac{V_c}{B h_o^2} = 3.1 F_o \quad (3.6)$$

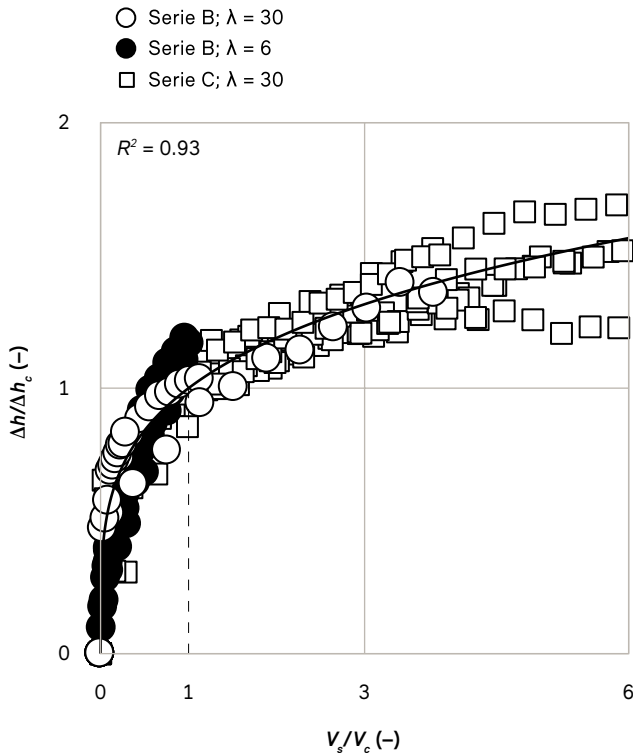
und für eine bewegliche Sohle für  $F_o = 0.5...1.5$  ( $R^2 = 0.98$ ) mit

$$\frac{V_c}{B h_o^2} = 3.1 F_o \left( \frac{h_o}{d_m} \right)^{-0.20} \quad (3.7)$$

bestimmt werden. Der Einfluss des Schwemmholzvolumens auf den Aufstau kann mit dem Aufstauverhältnis  $\eta = \Delta h/\Delta h_c$  ( $\Delta h_c$  = Aufstau mit dem charakteristischen Volumen) für  $F_o = 0.3...1.5$  ( $R^2 = 0.93$ ) berechnet werden und ist in Abb. 51 dargestellt

$$\eta = \frac{\Delta h}{\Delta h_c} = \left( \frac{V_s}{V_c} \right)^{1/4} \quad (3.8)$$

Abb. 51: Aufstauverhältnis  $\eta = \Delta h / \Delta h_c$  versus relatives Schwemmholzvolumen  $V_s / V_c$  mit Gl. (3.8).



Als erste Abschätzung kann der Aufstau  $\Delta h$  mit Gl. (3.3) oder Gl. (3.5) bestimmt werden. Um den Einfluss von verschiedenen Schwemmholzvolumina auf  $\Delta h$  zu ermitteln, kann Gl. (3.8) verwendet werden. Dafür muss nur das Verhältnis zwischen  $V_s/V_c$  gewählt werden, z. B. zwischen 0.5 und 2. Für  $V_s/V_c = 0.5$ ,  $\eta = 0.84$  im Vergleich zu  $\eta = 1.19$  für  $V_s/V_c = 2$ . Die Variation des Schwemmholzvolumens ermöglicht eine szenarienbasierte Risikoabschätzung und ist vor allem für die Praxisanwendung sehr hilfreich. Somit kann der Aufstau infolge einer Schwemmholzverklausung für Hochwasserereignisse mit hohem Schwemmholztransport abgeschätzt werden. Zudem können die Bemessungsgleichungen für die Dimensionierung der Rechenstabhöhe von Schwemmholzrechen verwendet werden. Detaillierte Ausführungen zum Aufstau sind in Schalko (2018, S. 110 ff.) zu finden.

### 3.3.2 Empfehlungen: Lokaler Kolk infolge Schwemmholzverklausung

Die gemessene maximale Kolkentiefe  $S_{\max}$  (= Kolkentiefe am Rechen) lässt sich mit den massgebenden Parametern wie folgt beschreiben:

$$S_{\max} = S_A d_{90} = 0.86 \left( \frac{q}{\sqrt{(s-1)gd_m^3}} \right)^{0.85} \left( \frac{V_s}{V_c} \right)^{0.30} d_{90}, \quad (3.9)$$

mit  $S_A$  = dimensionsloser Kolkfaktor und  $s$  = relative Sedimentdichte  $\approx 2.65$ . Die relative maximale Kolkentiefe  $S_{\max}/d_{90}$  kann somit für  $F_o = 0.5 \dots 1.5$ ,  $S_A = 0 \dots 120$  und  $S_{\max}/d_{90} > 2$  ( $R^2 = 0.97$ ) berechnet werden. Der Kolk infolge Schwemmholzverklausung kann für verschiedene Zuflussbedingungen, Sohlmaterialien und Schwemmholzvolumina bestimmt werden. Es wird empfohlen, Gl. (3.9) für die Berechnung von lokalem Kolk infolge Schwemmholzverklausungen über die gesamte Breite, z. B. an einem Schwemmholzrechen, zu verwenden und nicht für Pfeilerkolk. Die Eingangsparameter für die Zuflussbedingungen können wie bei  $\Delta h$  ermittelt und die Kennwerte für das Sohlmaterial basierend auf Korngrössenanalysen bestimmt werden. In einem ersten Schritt soll  $S_{\max}$  mit dem maximal möglichen Kolk verglichen werden. Falls ein Kolk möglich und tolerierbar ist, kann  $f_A = 0.30$  für die Berechnung von  $\Delta h$  nach Gl. (3.5) angenommen werden. Detaillierte Ausführungen zum lokalen Kolk sind in Schalko (2018, S. 142 ff.) zu finden.

## 3.4 Numerische Modellierung von Verklausungsprozessen

Ausgewählte Modellversuche zu Verklausungswahrscheinlichkeit (Kap. 3.1) und Aufstau infolge Verklausung (Kap. 3.3) wurden mit dem tiefengemittelten 2-D-Programm *Iber-Wood* (Kap. 2.4) simuliert (Abb. 52). Die wichtigsten Erkenntnisse sind im Folgenden aufgelistet:

- Der Transport von Schwemmholz und dessen Ausrichtung kann gut nachgebildet werden.
- Wie in den Modellversuchen sind Wiederholungen der numerischen Simulation erforderlich, um die Unsicherheiten bei der Abschätzung der Verklausungswahrscheinlichkeit  $p$  zu verringern.
- Im Mittel wurde die Verklausungswahrscheinlichkeit  $p$  mit *Iber-Wood* unterschätzt, und es resultierten im Vergleich zu den Laborversuchen Abweichungen von  $\approx 33\%$ .
- Der Einfluss von Hölzern oder Verklausungen auf die Hydrodynamik kann mit *Iber-Wood* gut berücksichtigt werden. Im Vergleich zu den Modellversuchen war der

Aufstau  $\approx 40\%$  höher. Ein 2-D-Modell kann die Kompaktheit einer Verklausung und somit ihre dreidimensionalen Eigenschaften nicht abbilden, weshalb der Aufstau tendenziell überschätzt wird. Für eine erste konservative Abschätzung des Aufstaus wäre *Iber-Wood* eventuell geeignet.

Zusammengefasst ist *Iber-Wood* ein vielversprechendes Simulationsprogramm, um den Transport und die Ablagerung von Schwemmholz sowie den Einfluss einer Verklausung auf die Hydrodynamik abzuschätzen. Für die Praxisanwendung sind jedoch weitere systematische Validierungstests erforderlich. Detaillierte Ausführungen zur

numerischen Modellierung mit *Iber-Wood* sind in Schalko (2018, S. 162 ff.) zu finden.

### 3.5 Teilfreibord aufgrund von Schwemmholztransport bei Brücken

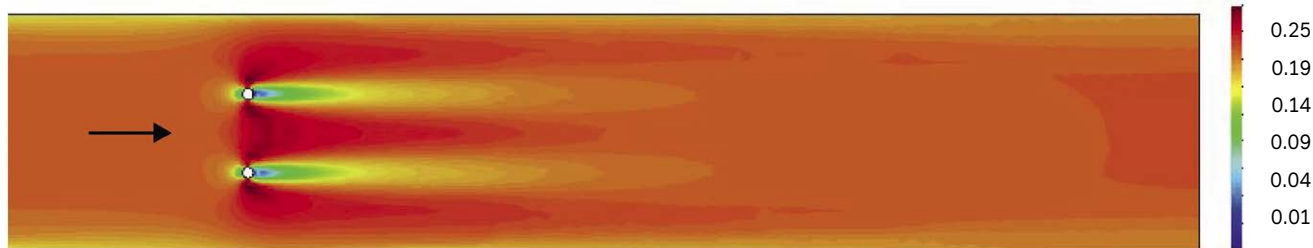
Das Freibord ist definiert als der vertikale Abstand zwischen dem Wasserspiegel und der Oberkante des Ufers oder der Unterkante einer Brücke (KOHS, 2013). Gemäss Hunzinger (2014) ist das Freibord ein wesentlicher Parameter, um die Abflusskapazität zu beurteilen und die Gefahrenbeurteilung sowie die Dimensionierung von Schutzmassnahmen zu verbessern.

Abb. 52: Verklausungsprozess bei 2 Brückenpfeilern mit *Iber-Wood*

(A) Fließgeschwindigkeit vor und (B) nach Schwemmholzzugabe; (C) resultierende Wassertiefe.

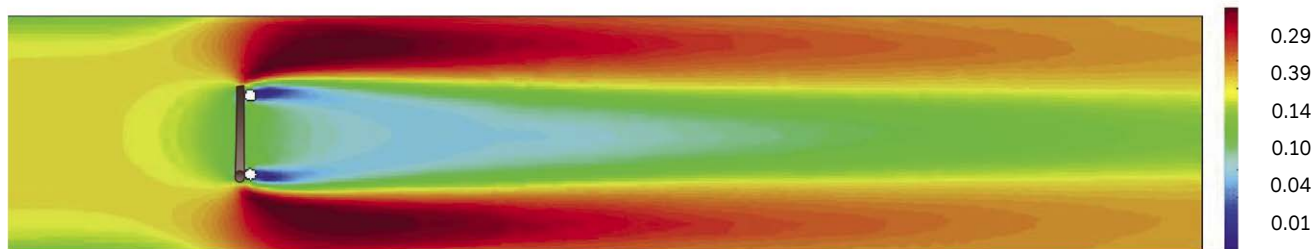
(A) Zeitschritt: 150 s (vor Schwemmholzzugabe)

Fließgeschwindigkeit in x-Richtung (m/s)



(B) Zeitschritt: 300 s (nach Schwemmholzzugabe)

Fließgeschwindigkeit in x-Richtung (m/s)



(C) Zeitschritt: 300 s (nach Schwemmholzzugabe)

Wassertiefe (cm)



In der Schweiz wurde bis vor Kurzem ein konstanter Wert (z. B. 1 m) oder die Geschwindigkeitshöhe ( $v^2/2g$ ) als Freibord verwendet. Die Kommission Hochwasserschutz (KOHs) des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbands (SWV) hat 2013 eine Methode erarbeitet, um das erforderliche Freibord einheitlich zu bestimmen. Das Freibord  $f_e$  setzt sich aus drei verschiedenen Teilfreiborden zusammen:

1.  $f_w$ : erforderliches Freibord aufgrund von Unschärfen in der Bestimmung der Wasserspiegellage (z. B. Prognose der Sohlenlage, Rauheit, ...),
2.  $f_v$ : erforderliches Freibord aufgrund von Wellenbildung und Rückstau an Hindernissen,
3.  $f_t$ : erforderliches Freibord aufgrund von zusätzlich benötigtem Abflussquerschnitt für Schwemmholz bzw. Treibgut unter Brücken bzw. an den Ufern im Bereich von Brücken, an denen es z. B. an den Pfeilern zu Verklausungen und Rückstau kommt.

Das erforderliche Freibord lässt sich wie folgt berechnen:

$$f_e = \sqrt{f_w^2 + f_v^2 + f_t^2} \quad (3.10)$$

Die Teilfreiborde aufgrund der Unschärfen in der Bestimmung der Wasserspiegellage  $f_w$  und der Wellenbildung  $f_v$  können mittels Gleichungen berechnet werden und sind klar definiert. Im Gegensatz dazu sollen für das Schwemmholz-Teilfreibord  $f_t$  Werte zwischen 0.3 m und 1 m angenommen werden (Tabelle 1 in Hunzinger, 2014). Dieses Klassensystem erschwert eine transparente Festlegung von  $f_t$ .

### 3.5.1 Empfehlungen

Es wird nun ein Ansatz mit einem Entscheidungsbaum vorgestellt, um  $f_t$  mithilfe von vier Parametern zu ermitteln:

$$f_t = f(\text{Typ}, K, C, d), \quad (3.11)$$

mit  $K$  = Schwemmholztransportfaktor (-),  $C$  = Verklausungswahrscheinlichkeitsfaktor (-) und  $d$  = Holzdurchmesser in (m).

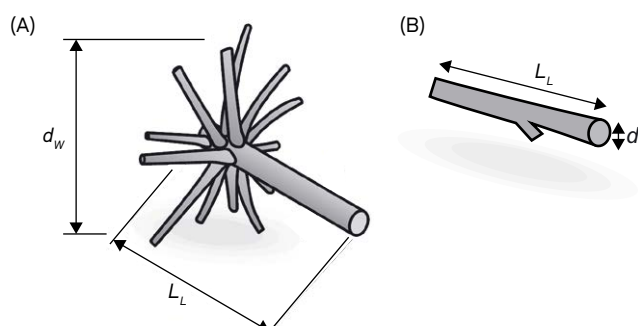
- **Typ:** Es wird zwischen den zwei Holztypen Wurzelstöcke und Stämme unterschieden (Abb. 53).
- **Schwemmholztransportfaktor  $K$ :** Der Schwemmholztransport kann als Einzeltransport oder als schub-

weiser Transport definiert werden (Braudrick *et al.*, 1997, Kap. 2.1). Für Wurzelstöcke kann  $K = 1.5$  für beide Transportarten gewählt werden. Für Stämme soll  $K = 1.5$  für Einzeltransport und  $K = 2$  für schubweisen Transport angenommen werden.

- **Verklausungswahrscheinlichkeitsfaktor  $C$ :** Dieser Faktor hängt von den Zuflussbedingungen, der Holzlänge, den Querschnittsabmessungen und den Brückeneigenschaften ab. Die Verklausungswahrscheinlichkeit  $p$  kann für ein Brückendeckwerk mithilfe der Gleichungen nach Schmocker und Hager (2011) oder Lange und Bezzola (2006) berechnet werden. Bei Brückenpfeilern lässt sich die Verklausungswahrscheinlichkeit  $p$  gemäss Schalko (2018), Kap. 3.1, bestimmen. Für  $p \leq 30\%$  entspricht  $C = 1.0$ , für  $30\% < p < 70\%$  ist  $C = 1.25$  und für  $p \geq 70\%$  ist  $C = 1.50$ . Falls die Verklausungswahrscheinlichkeit nicht bekannt ist bzw. nicht berechnet werden kann, wird empfohlen,  $C$  in Abhängigkeit von zwei Parametern abzuschätzen: (1) Verhältnis zwischen Holzlänge und effektiver Querschnittsbreite  $L_L/W_{\text{eff}}$ , mit einem Grenzwert von 0.5 (Abb. 54), und (2) Beschaffenheit der Brücke (gemäss Schmocker & Hager, 2011). Für  $L_L/W_{\text{eff}} \leq 0.5$  führt eine raue Brückenuntersicht zu einer Erhöhung von  $C$ .
- **Holzdurchmesser  $d$ :** Für beide Holztypen wird der charakteristische Holzdurchmesser bestimmt. Für Wurzelstücke wird empfohlen, einen mittleren Holzdurchmesser ( $d_w^*$ ) gemäss Lange und Bezzola (2006) mit  $d_w^* = (d_{w,\text{max}} d_{w,\text{min}} L_L)^{1/3}$  zu berechnen. Für Stämme kann  $d_L$  basierend auf Daten des Schweizerischen Landesforstinventars (LFI) bestimmt werden.

Abb. 53: Schwemmholzabmessungen

(A) Wurzelstock mit  $d_w$  = Wurzelstockdurchmesser und  $L_L$  = Holzlänge; (B) Holz mit  $d_L$  = Stammdurchmesser und  $L_L$  = Holzlänge.



Grafik: nach Lange und Bezzola (2006)

Der in Abb. 54 dargestellte Entscheidungsbaum wurde basierend auf den Erkenntnissen des *WoodFlow*-Projekts erstellt und soll die Wahl der Parameter vereinfachen. Das Teilfreibord  $f_t$  aufgrund von Schwemmholztransport bei Brücken kann wie folgt berechnet werden:

$$f_t = \max\{K \cdot C \cdot d; 0.3\} \text{ in (m)}. \quad (3.12)$$

Das minimale Schwemmholz-Teilfreibord beträgt somit, analog zu KOHS (2013), 0.30 m. Im Anwendungsbeispiel (Kap. 3.6) wird das Vorgehen schrittweise vorgestellt.

### 3.6 Anwendungsbeispiel: Schwemmholzverklausung an der Glatt (Zürich)

Die Glatt befindet sich im Kanton Zürich, entspringt im Greifensee und mündet nach 37.5 km in den Rhein. Im Stadtgebiet Zürich befindet sich bei der Überlandstrasse eine Serie von Brückenpfeilern (Abb. 55). Die Kombination von (1) Uferbewuchs, (2) Brückenpfeiler und Leitungen

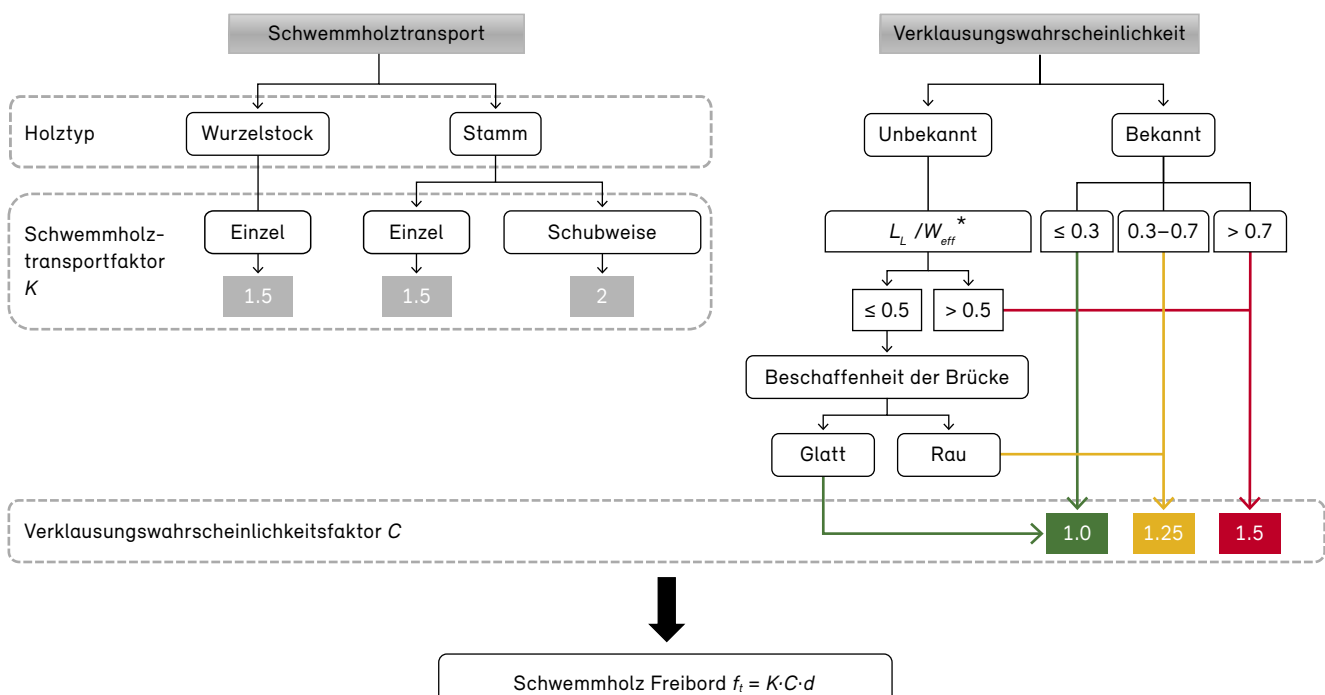
und (3) die Nähe zu Industrie- und Wohngebieten stellen ein erhöhtes Verklausungsrisiko bzw. Schadenspotenzial dar. Daher werden für diesen Standort die Verklausungswahrscheinlichkeit und der Aufstau infolge Schwemmholzverklausung mithilfe der in Kap. 3.1 und 3.3 präsentierten Gleichungen exemplarisch ermittelt. Die Eingangsdaten können wie folgt zusammengefasst werden:

- Zuflussbedingungen (Scherrer AG, 2002)
 

|                              |                                      |
|------------------------------|--------------------------------------|
| Durchfluss                   | $HQ_{100} = 93 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| Zufluss-Fließgeschwindigkeit | $v_o = 1.6 \text{ m/s}$              |
| Zuflusstiefe                 | $h_o = 3.9 \text{ m}$                |
| Zufluss-Froude-Zahl          | $F_o = 0.32$                         |
- Brücken- und Querschnittsabmessungen
 

|                                     |                                    |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| Pfeilerdurchmesser                  | $d_p = 1.2 \text{ m}$              |
| Flussbreite                         | $B = 12 \text{ m}$                 |
| Effektive Querschnittsbreite        | $W_{\text{eff}} = 6 \text{ m}$     |
| Vorhandenes Freibord bei $HQ_{100}$ | $f_{\text{vorh}} = 0.36 \text{ m}$ |

Abb. 54: Entscheidungsbaum für die Berechnung von  $f_t$



\*  $L_L / W_{\text{eff}}$ : Holzlänge/effektive Querschnittsbreite

- Holzabmessungen  
(siehe auch Kap. 2.2 bzgl. Schwemmholzverkleinerung)  
Holzlänge  $L_L = 3 \dots 6 \text{ m}$   
(Schätzwert)  
Holzdurchmesser  $d = 0.10 \text{ m}$  (gemäss  
Bezzola & Hegg,  
2007)

**(1) Die Verklauungswahrscheinlichkeit  $p$**  kann mit Gl. (3.1) für Einzeltransport und schubweisen Schwemmholztransport berechnet werden. Bei den Eingangsdaten ist die Holzlänge der unsichere Parameter. In Abhängigkeit der gewählten Holzlänge und für Einzeltransport ( $x_n = 1.00$ ) beträgt  $p$ :

$$p_{L_L=3} = e^{-12.7 x_n \left( \frac{V_o^2}{2 g L_L} \right)^{0.43} \left( \frac{d_p}{L_L} \right)^{0.60}} = e^{-12.7 \cdot 1.0 \left( \frac{1.6^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 3} \right)^{0.43} \left( \frac{1.2}{3} \right)^{0.60}} = 10\% \text{ und } p_{L_L=6} = 40\%$$

Unter der Annahme von schubweisem Schwemmholztransport ( $x_n = 0.65$ ) erhöht sich  $p$  zu:

$$p_{\text{schubweise}, L_L=3} = 30\% \text{ und } p_{\text{schubweise}, L_L=6} = 60\%.$$

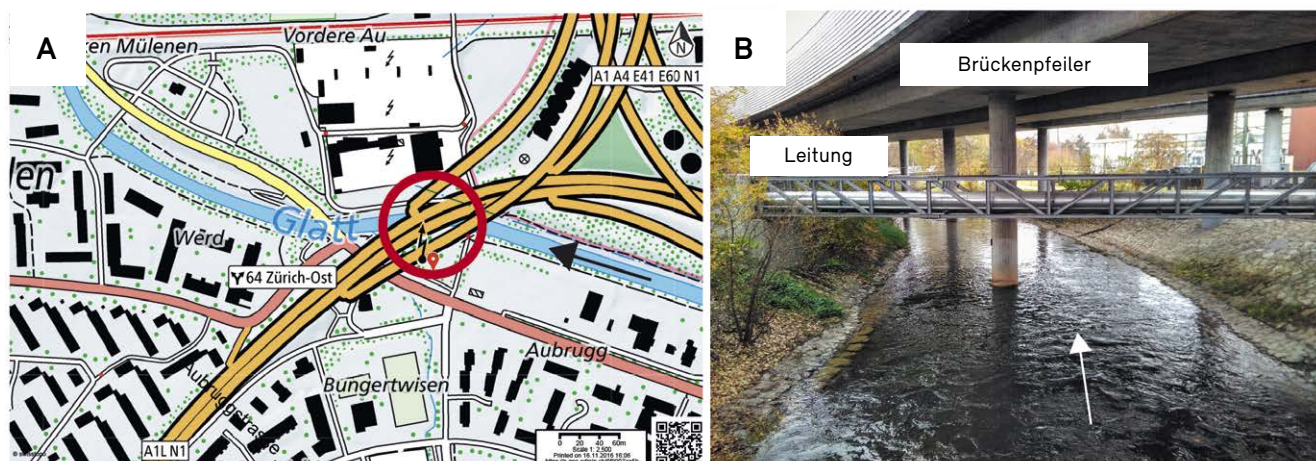
Die maximale Verklauungswahrscheinlichkeit beträgt  $p_{\max} = 60\%$ . Die Leitung oberstrom des Pfeilers führt zu einer weiteren Verschlechterung der Situation und kann, ausgelöst durch die Verklauung am Pfeiler, zu einer Verklauung über die gesamte Flussbreite führen. In Kom-

bination mit einer hohen Verklauungswahrscheinlichkeit ( $p_{\max} = 60\%$ ) ist es somit erforderlich, den Aufstau infolge Schwemmholzverklauung zu berechnen.

**(2) Aufstau infolge Schwemmholzverklauung:** Der Pfeiler und die Leitung erhöhen die Gefahr einer Verklauung. Der Aufstau infolge Schwemmholzverklauung kann für verschiedene Szenarien (Gl. (3.5)) abgeschätzt werden. Die erforderlichen Eingangsdaten werden basierend auf den Abflussmessdaten ( $F_o$ ,  $h_o$ ) und geeigneten Annahmen gewählt. Um die Verklauungslänge  $L_A$  zu bestimmen (Gl. (3.4)), muss das effektive Lockervolumen  $V_{l,\text{eff}}$  abgeschätzt werden. Dazu kann in einem ersten Schritt das effektive Festvolumen  $V_{s,\text{eff}}$  als Funktion der bewaldeten Flusslänge  $L_W$  (Gl. (1.5) in Kap. 1.5) berechnet werden. Die bewaldete Flusslänge  $L_W$  kann mithilfe der GIS-Analyse aus Kap. 1 (Steeb et al., 2019a) ermittelt werden und beträgt  $\approx 1.6 \text{ km}$ . Somit ergibt sich für  $V_{s,\text{eff}} = 49 L_W^{0.5} = 62 \text{ m}^3$ . Unter Annahme eines Auflockerungsfaktors von  $a = 4.5$ , ergibt sich für das effektive Lockervolumen  $V_{l,\text{eff}} = V_{s,\text{eff}} a = 279 \text{ m}^3$ . Gemäss Gl. (3.4) resultiert die Verklauungslänge damit zu  $L_A = V_{l,\text{eff}} / (h_o B) = 279 / (3.9 \cdot 12) \approx 6.0 \text{ m}$ . Der Anteil an Feinmaterial wird mit  $2.5\%$  geschätzt. Unter der Annahme einer rechteckförmigen Verklauung beträgt der Verklauungsformfaktor  $f_A = 1$  und der relative Aufstau ergibt sich zu:

Abb. 55: Anwendungsbeispiel: Schwemmholzverklauung an der Glatt (Zürich)

(A) Kartenausschnitt Glatt, Stadt Zürich (swisstopo, 2017), (B) Fliessquerschnitt mit Brückenpfeiler.



Bilder: (A) swisstopo (2017); (B) VAW (2018)

$$\frac{\Delta h}{h_o} = 5.4 f_A \frac{F_o u^{1/3} (9FM + 1)}{a^{4/3}} \text{ mit } a = 4.5 \text{ und } u = \frac{L_A}{d_L} = \frac{6.0 \text{ m}}{0.1 \text{ m}} = 60$$

$$\frac{\Delta h}{h_o} = 5.4 \cdot 1.0 \frac{0.32 \cdot 60^{1/3} (9 \cdot 0.025 + 1)}{4.5^{4/3}} = 1.11.$$

Für eine natürliche Verklausung mit fester Sohle und  $f_A = 0.55$  reduziert sich der relative Aufstau  $\Delta h/h_o$  auf 0.61. Bei einer möglichen Kolkbildung und  $f_A = 0.30$  beträgt  $\Delta h/h_o = 0.33$ . Die resultierende Fliesstiefe mit Aufstau ergibt sich dann zu  $h_o + \Delta h$ . Im Vergleich zu den Uferhöhen (4.26 m) ist die resultierende Fliesstiefe mit der Verklausung für alle Szenarien höher. Das resultierende Freibord  $f$  = Uferhöhe – Fliesstiefe ist für alle Szenarien negativ (–4.0 m für  $f_A = 1.0$ , –2.0 m für  $f_A = 0.55$ , und –0.9 m für  $f_A = 0.3$ ). Aufgrund der Gefahr einer Schwemmholzverklausung wird die Hochwassergefahr deutlich erhöht.

Das **charakteristische Schwemmholzvolumen**  $V_c$ , das zu dem massgebenden Aufstau führt, kann mit Gl. (3.6) berechnet werden. Unter der Annahme einer festen Sohle beträgt  $V_c$

$$\frac{V_c}{h_o^2 B} = 3.1 F_o = 3.1 \cdot 0.32 = 1.00 \rightarrow V_c = 1.00 \cdot h_o^2 B = 1.00 \cdot 3.90^2 \cdot 12.0 = 181.8 \text{ m}^3$$

und ist geringer als die erwartete Schwemmholzmenge  $V_{l,eff}$  von 279 m<sup>3</sup>, wobei  $V_{l,eff}$  stark von dem gewählten Auflockerungsfaktor abhängt. Der dazugehörige Aufstau beträgt  $\Delta h_c = 3.7$  m (Gl. (3.5)) mit  $f_A = 1.0$  und  $L_A = V_c / (B h_o) = 3.9$  m. Das Aufstauverhältnis resultiert zu  $\eta = \Delta h / \Delta h_c = 1.17$ , sodass der mit  $f_A = 1.0$  berechnete Aufstau  $\Delta h$  etwas höher ist als der massgebende Aufstau beim charakteristischen Schwemmholzvolumen  $\Delta h_c$ .

Ein potenzieller **Kolk infolge einer Schwemmholzverklausung** kann mithilfe von Gl. (3.9) nicht berechnet werden, da  $F_o = 0.32$  ausserhalb des Anwendungsbereichs und die Anwendung von Gl. (3.9) nicht für Pfeilerkolke geeignet ist.

### (3) Freibordberechnung unter Berücksichtigung des Schwemmholztransports

Für die Ermittlung des Teilfreibords aufgrund von Schwemmholztransport wird zuerst der Holztyp als Stamm definiert. Es kann angenommen werden, dass die Stämme schubweise transportiert werden und  $K = 2$

gewählt werden. Die maximale Verklausungswahrscheinlichkeit beträgt mit Gl. (3.1)  $p_{max} = 60\%$ . Somit ergibt sich für den Verklausungswahrscheinlichkeitsfaktor  $C = 1.25$ . Bei unbekanntem  $p$  käme man auf  $L_L/W_{eff} \approx 0.75 > 0.5$  und damit auf  $C = 1.5$  nach Abb. 54. Mit einem Holzdurchmesser von  $d = 0.10$  m resultiert ein Teilfreibord von:

$$f_t = \max\{K C d; 0.3\} = \max\{2 \cdot 1.25 \cdot 0.10 = 0.25 \text{ m}; 0.3 \text{ m}\} = 0.30 \text{ m}$$

(bzw.  $f_t = 2 \cdot 1.5 \cdot 0.1 = 0.3 \text{ m}$ ).

Das Teilfreibord aufgrund von Unschärfen in der Bestimmung der Wasserspiegellage  $f_w$  beträgt:

$$f_w = \sqrt{\sigma_{wh}^2 + \sigma_{wz}^2} = \sqrt{(0.06 + 0.06 h_o)^2 + 0.10^2} =$$

$$f_w = \sqrt{(0.06 + 0.06 \cdot 3.9)^2 + 0.10^2} = \sqrt{0.29^2 + 0.10^2} = 0.31 \text{ m}$$

Das Teilfreibord aufgrund von Wellenbildung und Rückstau an Hindernissen  $f_v$  ergibt sich zu:

$$f_v = \frac{v_o^2}{2g} = \frac{1.6^2}{2g} = 0.13 \text{ m}.$$

Somit beträgt das gesamte erforderliche Freibord  $f_e$  für diesen Querschnitt an der Glatt

$$f_e = \sqrt{f_w^2 + f_v^2 + f_t^2} = \sqrt{0.31^2 + 0.13^2 + 0.30^2} = 0.45 \text{ m}.$$

Das erforderliche Freibord  $f_e$  ist somit grösser als das effektiv vorhandene Freibord  $f_{vorh}$ , sodass es sich hier um eine mögliche Schwachstelle handelt und Handlungsbedarf besteht.

# Literatur

- Bezzola, G.R., Hegg, C. 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005 Teil 1: Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Umwelt-Wissen, Nr. 0825, 429 S.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G. 2014: Numerical modelling of river inundations. *Ingeniería del agua* 18, 68. doi: 10.4995/ia.2014.3144
- Bloemer, S., Fernandes, J.P., Florineth, F., Geitz, P., Gerstgraser, C., Graf, F., Hacker, E., Johannsen, R., Kovalev, N., Markart, G., Molon, M., Rauch, H.P., Palmeri, F., Prokop, A., Sangalli, P., Sauli, G., Stowasser, A., Studer, R., Sabatzus, A., Weibel, T., Witt, K.J. 2015: European Guidelines for Soil and Water Bioengineering. European Federation for Soil and Water Bioengineering.
- Boivin, M., Buffin-Bélanger, T., Piégay, H. 2015: The raft of the Saint-Jean River, Gaspé (Québec, Canada): A dynamic feature trapping most of the wood transported from the catchment. *Geomorphology* 231, 270–280. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.12.015
- Braudrick, C.A., Grant, G.E. 2001: Transport and deposition of large woody debris in streams: a flume experiment. *Geomorphology* 41, 263–283. doi: 10.1016/S0169-555X(01)00058-7
- Braudrick, C.A., Grant, G.E., Ishikawa, Y., Ikeda, H. 1997: Dynamics of wood transport in streams: A flume experiment. *Earth Surface Processes and Landforms* 22, 669–683. doi: 10.1016/S0169-555X(01)00058-7
- BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie). 2003: Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten. Berichte des BWG, Serie Wasser, Bern, 118 S.
- Comiti, F., Mao, L., Preciso, E., Picco, L., Marchi, L., Borga, M. 2008: Large wood and flash floods: evidence from the 2007 event in the Davča basin (Slovenia). *Monit. Simulation, Prev. Remediat. Dense Debris Flows II, WIT Transactions on Engineering Sciences I*, 173–182. doi: 10.2495/DEB080181
- Comper, T., Picco, L., Bladé, E., Ruiz-Villanueva, V. 2018: Numerical modelling of large wood dynamics in the braided Piave River (Italy): the important role of roots. 5th IAHR Europe Congress — New Challenges in Hydraulic Research and Engineering. doi: 10.3850/978-981-11-2731-1\_210-cd
- Dazio, E., Conedera, M., Schwarz, M. 2018: Impact of different chestnut coppice managements on root reinforcement and shallow landslide susceptibility. *Forest Ecology and Management* 417, 63–76. doi: 10.1016/j.foreco.2018.02.031
- Dixon, S.J., Sear, D.A. 2014: The influence of geomorphology on large wood dynamics in a low gradient headwater stream. *Water Resources Research* 50, 9194–9210. doi: 10.1002/2014WR015947
- Dorren, L. 2017: FINT – Find individual trees. User manual. ecorisQ paper ([www.ecorisq.org](http://www.ecorisq.org)), 1–6.
- Fischenich, C. 2001: Stability thresholds for stream restoration materials. ERDC-TN-EMRRP-SR-29.
- Frehner, M., Wasser, B., Schwitter, R., 2005: Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S.
- Gasser, E., Schwarz, M., Simon, A., Perona, P., Phillips, C., Hübl, J., Dorren, L. 2019: A review of modeling the effects of vegetation on large wood recruitment processes in mountain catchments. *Earth Science Reviews* 194, 350–373. doi: 10.1016/j.earscirev.2019.04.013
- Giadrossich, F., Schwarz, M., Pirastu M., Niedda, M. 2014: Stabilization's mechanisms of hillslopes due to root reinforcement. *Quaderni di idronomia montana* 31, 353–362.
- Ginzler, C., Price, B., Bösch, R., Fischer, C., Hobi, M.L., Psomas, A., Rehush, N., Wang, Z., and Waser, L.T. 2019: Remote Sensing: Area-wide Products. In: Fischer, C.

- and Traub, B. (Ed.), 2019. Swiss National Forest Inventory – Methods and Models of the Fourth Assessment, Springer Series: Managing Forest Ecosystems. Springer (in press).
- Ginzler, C. 2018: Vegetation Height Model NFI. National Forest Inventory (NFI). doi: 10.16904/1000001.1
- Ginzler, C. & Hobi, M.L. 2016: Das aktuelle Vegetationshöhenmodell der Schweiz: spezifische Anwendungen im Waldbereich. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen. 167(3), 128–135. doi: 10.3188/szf.2016.0128
- Haeberli, W., Rickenmann, D., Zimmermann, M., 1991: Murgänge. Ursachenanalyse der Hochwasser 1987. Ergebnisse der Untersuchungen. Mitteilung des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 4 / Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 14, 77–88.
- Hauet, A., Jodeau, M., Le Coz, J., Marchand, B., Die, M.A., Le Boursicaud, R., Dramais, G. 2014: Application de la méthode LSPIV pour la mesure de champs de vitesse et de débits de crue sur modèle réduit et en rivière. La Houille Blanche 3, 16 – 22.
- Hunzinger, L. 2014: Freeboard analysis in river engineering and flood mapping — New recommendations: S. 31 – 37. 7th River Flow Conference, Lausanne, Switzerland.
- Jensen, H., Lang, H. & Rinderknecht, J. 1997: Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901 – 1970. Hydrologischer Atlas der Schweiz – Tafel 2.4<sup>2</sup>. <https://hydrologischeratlas.ch/>
- Julien, P.Y. 2002: River Mechanics. Cambridge University Press, 434 S. doi: 10.1017/CBO9781139164016
- Kaufmann, E. 2001: Estimation of Standing Timber, Growth and Cut. In: Brassel, P., & Lischke, H. (Eds.). 2001: Swiss National Forest Inventory: methods and models of the second assessment: S. 162 – 206. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- KOHS, 2013: Freibord bei Hochwasserschutzprojekten und Gefahrenbeurteilungen. Empfehlung der Kommission für Hochwasserschutz (KOHS). Wasser Energie Luft 105(1), 43 – 50.
- Kuratli, B. 2017: Eine GIS-basierte Schätzung des potentiellen Schwemmholzeintrages in alpine Fließgewässer und Vergleich mit effektiv transportierten Schwemmholzfrachten. Masterarbeit, Geographisches Institut Universität Zürich, 90 S.
- Lange, D., Bezzola, G.R. 2006: Schwemmholz: Probleme und Lösungsansätze. VAW-Mitteilung 188 (H.-E. Minor, ed.). ETH Zürich, Schweiz.
- Le Coz, J., Magali, J., Hauet, A., Marchand, B., Le Boursicaud, R. 2014: Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free FUDAA- LSPIV software. River Flow, Lausanne.
- Leopold, L.B. & Maddock, T. 1953: The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications. USGS Professional Paper No. 252, 1 – 57.
- LLE Diemtigtal. 2006: Hochwasser 2005 im Diemtigtal. Lokale lösungsorientierte Ereignisanalyse (LLE) im Auftrag des Tiefbauamts des Kantons Bern, 57 S.
- Losey, S. & Wehrli, A. 2013: Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald. Bundesamt für Umwelt, Bern. 29 S. und Anhänge. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Lyn, D., Cooper, T., Yi, Y.-K., 2003: Debris Accumulation at Bridge Crossings: Laboratory and Field Studies. Publication FHWA/IN/JTRP-2003/10. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana. doi: 10.5703/1288284313171
- Máčka, Z., Krejčí, L., Loučková, B., Peterková, L. 2011: A critical review of field techniques employed in the survey of large woody debris in river corridors: a central European perspective. Environmental monitoring and assessment 181, 291 – 316. doi: 10.1007/s10661-010-1830-8

- MacVicar, B.J., Henderson, A., Comiti, F., Oberlin, C., Pecorari, E. 2009: Quantifying the temporal dynamics of wood in large rivers : field trials of wood surveying, dating, tracking, and monitoring techniques. *Earth Surface Processes and Landforms* 2046, 2031 – 2046. doi: 10.1002/esp
- Magilligan, F.J. 1992: Thresholds and the spatial variability of flood power during extreme floods. *Geomorphology* 5(3 – 5), 373 – 390. doi: 10.1016/0169-555X(92)90014-F
- Mazzorana, B., Fuchs, S. 2010: Fuzzy Formative Scenario Analysis for woody material transport related risks in mountain torrents. *Environ. Environmental Modelling & Software* 25, 1208 – 1224. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.03.030
- Menk, J., Dorren, L., Heinzel, J., Marty, M., Huber, M. 2017: Evaluation automatischer Einzelbaumerkennung aus luftgestützten Laserscanning-Daten. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 168(3), 151 – 159.
- Moulin, B., Piégay, H. 2004: Characteristics and temporal variability of large woody debris trapped in a reservoir on the River Rhone (Rhône): Implications for river basin management. *River Research and Applications* 20, 79 – 97. doi: 10.1002/rra.724
- Pecorari E., Comiti F., Rigon E., Picco L., Lenzi M.A. 2007: Caratterizzazione e quantificazione del legname in alveo in corsi d'acqua di grandi dimensioni: risultati preliminari sul fiume Piave, Italia. *Quaderni di Idronomia Montana* 27, 477 – 488.
- Piton, G., Recking, A. 2016: Design of Sediment Traps with Open Check Dams. II: Woody Debris. *J. Hydraul. Eng.* 142(2), 04015046. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001049
- 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
- Rickenmann, D. 1997: Schwemmholz und Hochwasser. *Wasser Energie Luft* 89(5 – 6), 115 – 119.
- Rickli, C., Badoux, A., Rickenmann, D., Steeb, N., Waldner, P. 2018: Large wood potential, piece characteristics, and flood effects in Swiss mountain streams. *Physical Geography* 39(6), 542 – 564. doi:10.1080/02723646.2018.1456310
- Rickli, C., Böckli, M., Badoux, A., Rickenmann, D., Zurbrugg, S., Ruiz-Villanueva, V., Stoffel, M. 2016: Schwemmholztransport während des Hochwasserereignisses vom 24. Juli 2014 im Einzugsgebiet der Emme. *Wasser Energie Luft* 108(3), 225 – 231.
- Rickli, C., Graf, F. 2009: Effects of shallow landslides – Case studies in Switzerland. *Forest, Snow and Landscape Research* 82(1), 33 – 44.
- Rickli, C., Bucher, H. 2006: Einfluss ufernaher Bestockungen auf das Schwemmholzvorkommen in Wildbächen. Projektbericht zuhanden des Bundesamtes für Umwelt BAFU. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 94 S.
- Ruiz-Villanueva, V., Scorpio, V., Bachmann, A., Brousse, G., Cavalli, M., Comiti, F., Crema, S., Fernández, E., Furdada, G., Hajdukiewicz, H., Hunzinger, L., Lucia, A., Marchi, L., Moraru, A., Piton, G., Rickenmann, D., Righini, M., Roab, Y., Stoffel, M., Surian, N., Wyzga, B. 2019a: Channel widening during floods: outcomes from a European meta-analysis. (in prep.)
- Ruiz-Villanueva, V., Mazzorana, B., Bladé, E., Bürkli, L., Iribarren-Anacona, P., Mao, L., Nakamura, F., Ravazzolo, D., Rickenmann, D., Sanz-Ramos, M., Stoffel, M., Wohl, E. 2019b: Characterization of wood-laden flows in rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* 44(9), 1694 – 1709.
- Ruiz-Villanueva, V., Gamberini C., Bladé, E., Stoffel, M., Bertoldi, W. 2019c: Numerical modelling of instream wood transport on braided morphologies under unsteady conditions: sensitivity and high-resolution quantitative model validation. *Water Resources Research* (under review).

- Ruiz-Villanueva, V., Stoffel, M. 2018: Application of fuzzy logic to large organic matter recruitment in forested river basins. 5th IAHR Europe Congress – New Challenges in Hydraulic Research and Engineering. Trento, Italy, June 2018.
- Ruiz-Villanueva, V., Badoux, A., Rickenmann, D., Böckli, M., Schläfli, S., Steeb, N., Stoffel, M., Rickli, C. 2018: Impacts of a large flood along a mountain river basin: the importance of channel widening and estimating the large wood budget in the upper Emme River (Switzerland). *Earth Surface Dynamics* 6, 1115 – 1137. doi: 10.5194/esurf-6-1115-2018
- 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 Czarany Dunajec River, Poland. *Earth Surface Processes and Landforms* 42, 516 – 530. doi: 10.1002/esp.4091
- Ruiz-Villanueva, V., Wyżga, B., Hajdukiewicz, H., Stoffel, M. 2016a: Exploring large wood retention and deposition in contrasting river morphologies linking numerical modelling and field observations. *Earth Surface Processes and Landforms* 41, 446 – 459. doi: 10.1002/esp.3832
- Ruiz-Villanueva, V., Wyżga, B., Mikuś, P., Hajdukiewicz, H., Stoffel, M. 2016b: The role of flood hydrograph in the remobilization of large wood in a wide mountain river. *Journal of Hydrology* 541, 330 – 343. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.02.060
- Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Gurnell, A.A., Marston, R.A., Stoffel, M. 2016c: Recent advances quantifying the large wood dynamics in river basins: New methods and remaining challenges. *Reviews of Geophysics* 54, 611 – 652. doi: 10.1002/2015RG000514
- Ruiz-Villanueva, V., Díez-Herrero, A., Ballesteros-Canovas, J.A., Bodoque, J.M. 2014a: Potential large woody debris recruitment due to landslides, bank erosion and floods in mountain basins: a quantitative estimation approach. *River Research and Applications* 30, 81 – 97. doi: 10.1002/rra
- Ruiz-Villanueva, V., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Martí-Cardona, B., Díez-Herrero, A., Bodoque, J.M. 2014b: Two-dimensional numerical modeling of wood transport. *Journal of Hydroinformatics* 16, 1077 – 1096. doi: 10.2166/hydro.2014.026
- Ruiz-Villanueva, V., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A., Bladé, E. 2014c: Large wood transport as significant influence on flood risk in a mountain village. *Natural Hazards* 74, 967 – 987. doi: 10.1007/s11069-014-1222-4
- Sanhueza, D., Picco, L., Ruiz-Villanueva, V., Iroumé, A., Ulloa, H., Barrientos, G. 2019: Quantification of fluvial wood using UAVs and structure from motion: strengths and potential limitations. *Geomorphology* 345, 106837. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.106837
- Schalko, I. 2018: Modeling hazards related to large wood in rivers. VAW-Mitteilung 249, (R.M. Boes, ed.), ETH Zürich, Schweiz.
- Scherrer AG, 2002: Der Einfluss der Siedlungsentwicklung auf die extremen Hochwasser der Glatt (ZH). Technischer Bericht. Schweiz.
- Schmocker, L., Hager, W.H. 2011: Probability of drift blockage at bridge decks. *Journal of Hydraulic Engineering* 137(4): 480 – 492. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000319
- Schwarz, M., Hilfiker, K., Dazio, E., Soldati, M. 2018: Was bringen Entlastungsschläge in rutschgefährdeten Hängen? *Wald Holz* 2, 16 – 19.
- Schwarz, M., Phillips, C., Marden, M., Douglas, G., McIvor, I., Watson, A. 2016: Modelling of root reinforcement and erosion control by «Veronese» poplar on pastoral hill country in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry* 46:4. doi: 10.1186/s40490-016-0060-4
- Schwarz, M., Giadrossich, F., Cohen, D. 2013: Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(11), 4367 – 4377.

- Schwarz, M., Cohen, D., Or, D. 2012: Spatial characterization of lateral root reinforcement. *Geomorphology* 171 – 172, 190 – 200. doi: 10.1016/j.geomorph.2012.05.020
- Schwarz, M., Lehman, P., Or, D. 2010: Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes – from a bundle of roots to tree stands. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 354 – 367. doi: 10.1002/esp.1927
- Seo, J. Il, Nakamura, F., Nakano, D., Ichiyonagi, H., Chun, K.W. 2008: Factors controlling the fluvial export of large woody debris, and its contribution to organic carbon budgets at watershed scales. *Water Resources Research* 44. doi: 10.1029/2007WR006453
- Steeb, N., Badoux, A., Rickli, C., Rickenmann, D. 2019a: Detailbericht zum Forschungsprojekt *WoodFlow*: Empirischer GIS-Ansatz. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Steeb, N., Badoux, A., Rickli, C., Rickenmann, D. 2019b: Detailbericht zum Forschungsprojekt *WoodFlow*: Empirische Schätzformeln. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Steeb, N., Badoux, A., Rickli, C., Rickenmann, D. 2019c: Detailbericht zum Forschungsprojekt *WoodFlow*: Verkleinerung von Schwemmholz. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Steeb, N., Rickenmann, D., Badoux, A., Rickli, C., Waldner, P. 2017: Large wood recruitment processes and transported volumes in Swiss mountain streams during the extreme flood of August 2005. *Geomorphology* 279, 112 – 127. doi: 10.1016/j.geomorph.2016.10.011
- STK (Schweizerisches Talsperrenkomitee) 2017: Schwemmgut an Hochwasserentlastungsanlagen (HWE) von Talsperren. Bericht über den Stand der Schwemmgutproblematik an Talsperren, Arbeitsgruppe Schwemmgut an HWE, 2017.
- swisstopo. 2017: <https://map.geo.admin.ch/>. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100120).
- Tal, M., Gran, K., Murray, A.B., Paola, C., Hicks, D.M. 2004: Riparian vegetation as a primary control on channel characteristics in multi-thread rivers. In: *Riparian vegetation and fluvial geomorphology*, 43 – 58. doi: 10.1029/008WSA04
- Thévenet, A., Citterio, A., Piégay, H. 1998: A new methodology for the assessment of large woody debris accumulations on highly modified rivers (example of two French piedmont rivers). *Regulated Rivers: Research & Management* 14, 467 – 483. doi: 10.1002/(SICI)1099-1646(1998110)14:6<467::AID-RRR514>3.0.CO;2-X
- Uchiogi, T., Shima, J., Tajima, H., Ishikawa, Y. 1996: Design methods for wood-debris entrapment. *International Symposium Interpraevent, Garmisch-Partenkirchen. Tagungspublikation, Band 5*, 279 – 288.
- Wainwright, J., Parsons, A.J., Cooper, J.R., Gao, P., Gillies, J.A., Mao, L., Orford, J.D., Knight, P.G. 2015: The concept of transport capacity in geomorphology. *Reviews of Geophysics* 53, 1155 – 1202. doi: 10.1002/2014RG000474
- Waldner, P., Köchli, D., Usbeck, T., Schmocker, L., Sutter, F., Rickli, C., Rickenmann, D., Lange, D., Hilker, N., Wirsich, A., Siegrist, R., Hug, C., Kaennel, M. 2009: Schwemmholz des Hochwassers 2005: Schlussbericht des WSL-Teilprojekts Schwemmholz der Ereignisanalyse BAFU/WSL des Hochwassers 2005: Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 72 S.
- Wohl, E., Cenderelli, D. A., Dwire, K. A., Ryan-Burkett, S. E., Young, M. K., Fausch K. D. 2010: Large in-stream wood studies: a call for common metrics. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 618 – 625. doi: 10.1002/esp.1966
- Wohl, E., Jaeger, K., 2009: A conceptual model for the longitudinal distribution of wood in mountain streams. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 329 – 344. doi: 10.1002/esp

---

WSL, 2016: Schweizerisches Landesforstinventar LFI. Daten der Erhebungen 2004/06 (LFI3) und 2009/13 (LFI4). Markus Huber 06.06.2016. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.

Wynn, T.M., Mostaghimi, S., Alphin, E.F. 2004: The effects of vegetation on stream bank erosion. In: 2004 ASAE Annual Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Zimmermann, M., Mani, P., Gamma, P., Gsteiger, P., Heiniger, O., Hunziker, G. 1997: Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. In: Schlussbericht Nationales Forschungsprogramm, NFP 31. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH, 161 S.

Zollinger, F. 1983: Die Vorgänge auf einem Geschiebeablagerungsplatz – Ihre Morphologie und die Möglichkeiten einer Steuerung. Dissertation, Nr. 7419. ETH, Zürich.

# Anhang 1 Symbole und Abkürzungen

## Symbole

|             |                                                                                  |                            |                                                                                                                  |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a$         | Auflockerungsfaktor $a = V_l/V_s$ (-)                                            | $Q_{max}$                  | Spitzenabfluss ( $m^3/s$ )                                                                                       |
| $B$         | Gerinne-/Flussbreite (m)                                                         | $Q_o$                      | Durchfluss ( $m^3/s$ )                                                                                           |
| $C$         | Verklausungswahrscheinlichkeitsfaktor (-)                                        | $Q_{spez}$                 | Abflussspende ( $m^3 s^{-1} km^{-2}$ )                                                                           |
| $d$         | Durchmesser Schwemmholzstück (m)                                                 | $Q^*$                      | Relative Holzeintragsrate (-)                                                                                    |
| $d_L$       | Stamm- bzw. Holzdurchmesser (m)                                                  | $r$                        | Korrelationskoeffizient (-)                                                                                      |
| $d_m$       | Mittlerer Korndurchmesser (m)                                                    | $s$                        | Relative Sedimentdichte $\approx 2.65$ (-)                                                                       |
| $d_P$       | Pfeilerdurchmesser (m)                                                           | $S$                        | Kolkentiefe (m)                                                                                                  |
| $d_W$       | Wurzelstockdurchmesser (m)                                                       | $S_A$                      | Kolkfaktor (-)                                                                                                   |
| $D^*$       | Relativer Stammdurchmesser                                                       | $SH_{100}$                 | Szenario mit 50- bis 150-jährlicher Wiederkehrperiode zur Berechnung des Schwemmholzpotenzials                   |
| $E$         | Einzugsgebietsfläche ( $km^2$ )                                                  | $SH_{\langle 30 \rangle}$  | Szenario mit ca. 30-jährlicher Wiederkehrperiode zur Berechnung des Schwemmholzpotenzials                        |
| $F$         | Feststofffracht ( $m^3$ )                                                        | $SH_{\langle 300 \rangle}$ | Szenario mit ca. 300-jährlicher Wiederkehrperiode zur Berechnung des Schwemmholzpotenzials                       |
| $F_o$       | Zufluss-Froude-Zahl (-)                                                          | $S_{max}$                  | Maximale Kolkentiefe (m)                                                                                         |
| $f_A$       | Verklausungsformfaktor (-)                                                       | $S_r$                      | Kolkentiefe beim Rechen (m)                                                                                      |
| $f_{abm}$   | Abminderungsfaktor $f_{abm} = V_{est}/V_{pot}$ (-)                               | $u$                        | Umlenkungsfaktor $u = L_A/d_L$ (-)                                                                               |
| $f_e$       | Freibord (m)                                                                     | $V_c$                      | Charakteristisches Schwemmholzvolumen ( $m^3$ )                                                                  |
| $F_{kombi}$ | Überlappende potenzielle Eintragsflächen (ha)                                    | $V_{est}$                  | Mit GIS-Ansätzen geschätzte Schwemmholzfracht bei einem Hochwasser ( $m^3$ )                                     |
| $FM$        | Feinmaterial (-)                                                                 | $V_k$                      | Verkleinerungskoeffizient (-)                                                                                    |
| $F_{pot}$   | Potenzielle Eintragsflächen (ha)                                                 | $V_{kombi}$                | Geschätzte Schwemmholzfracht aus den sich überlappenden potenziellen Eintragsflächen (emp. GIS-Ansatz) ( $m^3$ ) |
| $f_t$       | Teilfreibord aufgrund von Schwemmholztransport bei Brücken (m)                   | $V_l$                      | Lockervolumen ( $m^3$ )                                                                                          |
| $f_v$       | Teilfreibord aufgrund von Wellenbildung und Rückstau an Hindernissen (m)         | $v_o$                      | Zufluss-Fliessgeschwindigkeit (m/s)                                                                              |
| $f_w$       | Teilfreibord aufgrund von Unschärfen in der Bestimmung der Wasserspiegellage (m) | $V_{obs}$                  | Effektiv transportierte Schwemmholzmenge bei einem Hochwasser ( $m^3$ )                                          |
| $g$         | Gravitationsbeschleunigung ( $m/s^2$ )                                           | $V_{pot}$                  | Schwemmholzpotenzial ( $m^3$ )                                                                                   |
| $h$         | Resultierende Wassertiefe infolge Aufstau (m)                                    | $V_{reg}$                  | Mit empirischen Regressionen geschätzte Schwemmholzfracht bei einem Hochwasser ( $m^3$ )                         |
| $h_o$       | Zufluss-Wassertiefe (m)                                                          | $V_s$                      | Festvolumen ( $m^3$ )                                                                                            |
| $K$         | Schwemmholztransportfaktor (-)                                                   | $V_w$                      | Wasserfracht ( $m^3$ )                                                                                           |
| $L$         | Gerinnelänge (km)                                                                | $W$                        | Waldfläche ( $km^2$ )                                                                                            |
| $L_A$       | Verklausungslänge (m)                                                            | $W_{eff}$                  | Effektive Querschnittsbreite (m)                                                                                 |
| $L_L$       | Holzlänge (m)                                                                    | $x_n$                      | Holztransportart (Einzeltransport vs. schubweiser Transport) (-)                                                 |
| $L_P$       | Pfeilerlänge (m)                                                                 | $\Delta h$                 | Aufstau (m)                                                                                                      |
| $L_w$       | Bewaldete Gerinnelänge (km)                                                      | $\Delta h_c$               | Aufstau mit dem charakteristischen Volumen $V_c$ (m)                                                             |
| $LW_A$      | Schwemmholz-Aufstaufaktor (-)                                                    | $\Delta x$                 | Abstand in x-Richtung (m)                                                                                        |
| $LW_P$      | Schwemmholz-Verklausungswahrscheinlichkeitsfaktor (-)                            | $\eta$                     | Aufstauverhältnis $\Delta h/\Delta h_c$ (-)                                                                      |
| $L^*$       | Relative Stammlänge                                                              | $\lambda$                  | Massstabsfaktor (-)                                                                                              |
| $M$         | Meltonzahl (-)                                                                   | $\rho_L$                   | Holzdichte ( $kg/m^3$ )                                                                                          |
| $p$         | Verklausungswahrscheinlichkeit (-)                                               |                            |                                                                                                                  |
| $P_h$       | Niederschlagsdauer (h)                                                           |                            |                                                                                                                  |
| $P_{mm}$    | Mittlere Niederschlagsmenge (mm)                                                 |                            |                                                                                                                  |
| $P_{vol}$   | Gesamtes Niederschlagsvolumen ( $m^3$ )                                          |                            |                                                                                                                  |
| $q$         | Spezifischer Durchfluss ( $m^2/s$ )                                              |                            |                                                                                                                  |

---

**Abkürzungen**

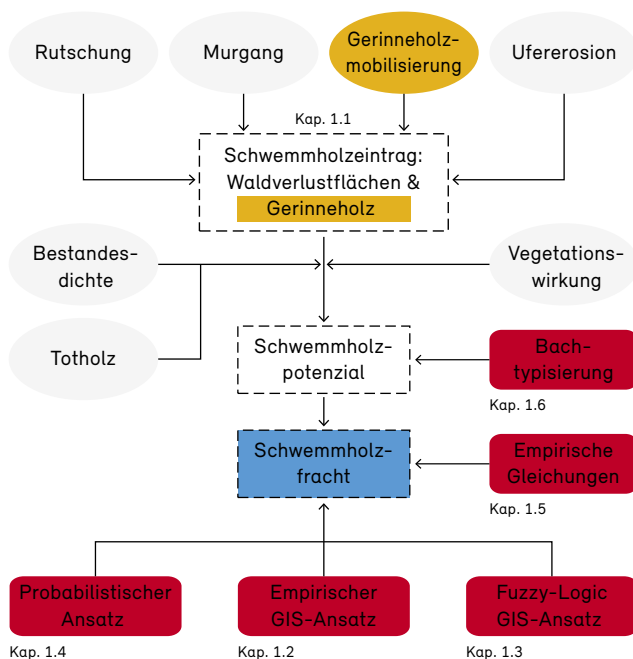
|       |                                                                                     |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| BAFU  | Bundesamt für Umwelt                                                                |
| DHM   | Digitales Höhenmodell                                                               |
| DOM   | Digitales Oberflächenmodell                                                         |
| DGM   | Digitales Geländemodell                                                             |
| EGA   | Empirischer GIS-Ansatz                                                              |
| ESRI  | Environmental Systems Research Institute                                            |
| EZG   | Einzugsgebiet                                                                       |
| FGA   | Fuzzy-Logic GIS-Ansatz                                                              |
| FINT  | Find Individual Trees (Software)                                                    |
| GIS   | Geographische Informationssysteme                                                   |
| HADES | Hydrologischer Atlas der Schweiz                                                    |
| HW    | Hochwasser                                                                          |
| KOHS  | Kommission für Hochwasserschutz                                                     |
| LFI   | Schweizerisches Landesforstinventar                                                 |
| LiDAR | Light Detection And Ranging                                                         |
| NaiS  | Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald                                   |
| RANS  | Reynolds Averaged Navier Stokes Gleichungen<br>(statistische Turbulenzmodellierung) |
| RGB   | Grundfarben Rot, Grün und Blau                                                      |
| SH    | Schwemmholz und/oder Modell-Szenario                                                |
| SPI   | Stream Power Index (niederschlagbasierte<br>Abflussenergie pro Meter Gerinnebreite) |
| STK   | Schweizerisches Talsperrenkomitee                                                   |
| SWV   | Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband                                            |
| UDS   | Ultrasonic Distance Sensor                                                          |
| VH MV | Holzvorratskarte der Schweiz gemäss LFI (Raster<br>25 × 25 m)                       |
| WLF   | Wood-Laden Flow (dt.: Schwemmholzteppich)                                           |

## Anhang 2 Forschungskonzept *WoodFlow*

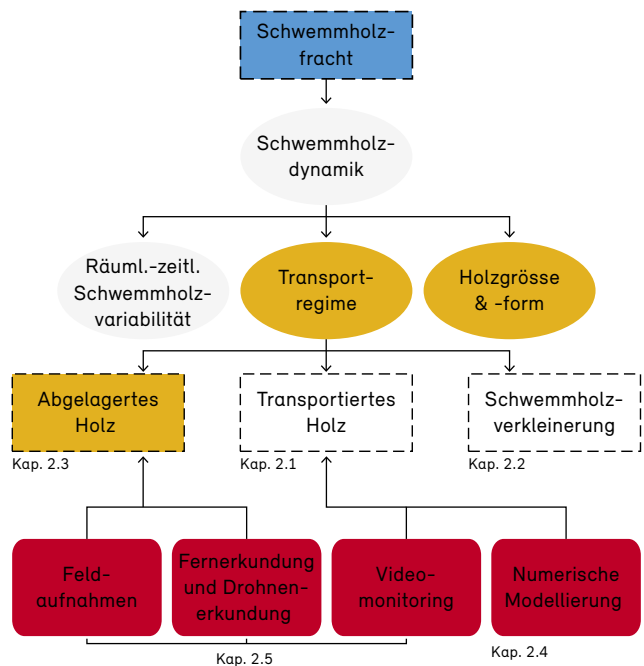
**Abb. 56: Zusammenspiel der verschiedenen Forschungsblöcke**

Runde Symbole kennzeichnen Inputdaten, eckige Symbole stehen für untersuchte Variablen und Resultate. Blau kennzeichnet Resultate aus Kap. 1, Gelb diejenigen aus Kap. 2, welche als Input für darauf aufbauende Ansätze gebraucht werden. Rot kennzeichnet die im Zuge des Forschungsprogramms entwickelten Werkzeuge und Methoden für die praktische Anwendung.

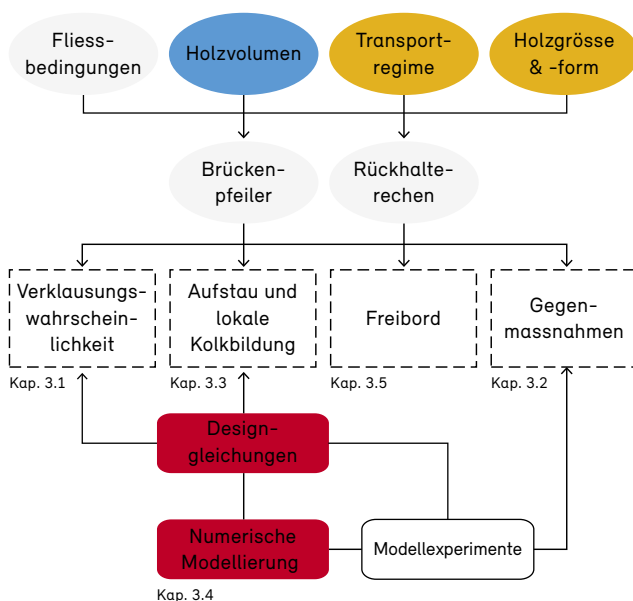
### Kapitel 1



### Kapitel 2



### Kapitel 3



# Anhang 3 Übersichtstabelle der WoodFlow-Werkzeuge und -Ansätze

| Ansatz/<br>Werkzeug                                         | Ziel                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Daten Input                                                                                                                                                                                                                          | Daten Output                                                                                                                                                                                                                                      | Benötigte<br>Soft-/<br>Hardware                                                                                                                                                                                                       | Gültigkeits-<br>bereich/Grenzen                                                                                                                                                                                     | Unsicherheiten                                                                                                                                                                                         | Skalen/<br>Massstäbe                                                                                        | Bearbeitungs-<br>aufwand/Zeit                                                                | Praktische<br>Anwen-<br>dung*<br>vgl. Beschrei-<br>bung am Ende<br>von Anhang A3 |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Empirischer<br/>GIS-An-<br/>satz</b><br>(Kap. 1.2)       | Szenarienbasier-<br>te ( $SH_{x,30\%}$ , $SH_{100\%}$ ,<br>$SH_{x,300\%}$ ) Abschät-<br>zung potenzieller<br>Eintragsflächen &<br>SH-Mengen                                                                                                                                              | Einzugs-<br>gebietsfläche;<br>Gewässernetz;<br>Waldfläche;<br>SilvaProtect-<br>Trajektorien;<br>Holzvorrat-Ras-<br>terkarte VHMV                                                                                                     | Tabelle<br>Schwemmholz-<br>mengen $V_{pot}$ &<br>$V_{est}$ ; Shapefiles<br>Eintragsflächen                                                                                                                                                        | ArcGIS o. ä.                                                                                                                                                                                                                          | Identifikation<br>Eintragsflä-<br>chen (räumlich<br>explizit); Unter-<br>scheidung nach<br>Eintragsprozes-<br>sen                                                                                                   | SH-Poten-<br>zial ( $V_{pot}$ ) vs.<br>SH-Fracht<br>( $V_{est}$ ); Wahl der<br>Abminderungs-<br>faktoren; Holz-<br>vorrat                                                                              | Theoretisch<br>unbegrenzt;<br>beste Resul-<br>tate für EZG<br>5–200 km <sup>2</sup>                         | Je nach Grösse<br>des EZG ca.<br>15–60 Minuten                                               | 1) 3) 5) 6)                                                                      |
| <b>Fuzzy-Lo-<br/>gic GIS-An-<br/>satz</b><br>(Kap. 1.3)     | Szenarienbasier-<br>te ( $SH_{x,30\%}$ , $SH_{100\%}$ ,<br>$SH_{x,300\%}$ ) Abschät-<br>zung potenzieller<br>Eintragsflächen &<br>SH-Mengen                                                                                                                                              | Einzugs-<br>gebietsfläche;<br>Gewässernetz;<br>Waldfläche;<br>Daten zu Gebie-<br>ten, die von<br>Rutschungen<br>und Murgän-<br>gen betrof-<br>fen sind (z. B.<br>SilvaProtect-<br>Trajektorien);<br>Holzvorrat-Ras-<br>terkarte VHMV | Tabelle<br>Schwemm-<br>holzfracht $V_{est}$ ;<br>Eintragsflächen-<br>Rasterkarte;<br>SH-Mengen-<br>Rasterkarte                                                                                                                                    | Für ArcGIS<br>entwickelte<br>Toolbox; der-<br>selbe Ansatz<br>könnte jedoch<br>auch mit<br>einer anderen<br>GIS-Software<br>(z. B. QGIS)<br>oder einer sta-<br>tistischen<br>Software (z. B.<br>R, Matlab)<br>durchgeführt<br>werden. | Gültigkeits-<br>bereich:<br>Geeignet für<br>Daten mit<br>Unsicherheit;<br>flexible Methode;<br>ermöglicht ver-<br>schiedene Arten<br>von Eingabe-<br>informationen<br><br>Grenzen:<br>Bezogen auf Ein-<br>gabedaten | Fuzzy-<br>Membership;<br>Fuzzy sets<br>values; Seiten-<br>erosionsfläche<br>zu.                                                                                                                        | Theoretisch<br>unbegrenzt;<br>die Unsicher-<br>heit nimmt bei<br>grösseren Ein-<br>zugsgebiete-<br>ten zu.  | Variabel von<br>1 Stunde bis<br>zu mehreren<br>Stunden                                       |                                                                                  |
| <b>SlideforMAP<br/>&amp; Bankfor-<br/>MAP</b><br>(Kap. 1.4) | Szenarienbasier-<br>te ( $SH_{x,30\%}$ , $SH_{100\%}$ ,<br>$SH_{x,300\%}$ ) Abschät-<br>zung des poten-<br>ziellen SH-Eintrags<br>aufgrund von Ufer-<br>erosion, Ufer-<br>rutschung und<br>flachgründiger<br>Hangrutschungen<br>bei aktuellem, mini-<br>malem und idealem<br>Waldzustand | Digitales Gelän-<br>demodell (DGM);<br>Digitales Ober-<br>flächenmodell<br>(DSM); HADES<br>(Schätzung Nie-<br>derschlags-<br>intensität und<br>-dauer); Schät-<br>zung Bodentyp                                                      | Ufererosions-,<br>Uferfutsch- und<br>Hangrutschwahr-<br>scheinlichkeit bei<br>aktuellem und<br>idealem Waldzu-<br>stand; potenzieller<br>Schwemmholz-<br>eintrag; Effizienz<br>der Schutzwald-<br>wirkung bei ver-<br>schiedenen<br>Waldzuständen | R; ArcGIS o. ä.<br>FINT: Einzel-<br>baumerken-<br>nungstool                                                                                                                                                                           | Identifikation<br>Eintragsflä-<br>chen (räumlich<br>explizit); Unter-<br>scheidung Ein-<br>tragsprozesse;<br>räumlich auf-<br>gelöste Quan-<br>tizierung der<br>Schutzwald-<br>wirkung je nach<br>Waldzustand       | Grosse Unsi-<br>cherheiten<br>entstehen auf-<br>grund der<br>Heterogeni-<br>tät der Boden-<br>eigenschaften<br>und der raum-<br>zeitlichen<br>Niederschlags-<br>verteilung;<br>Schätzung<br>Holzvorrat | EZG: 1–50 km <sup>2</sup> ;<br>je grösser das<br>EZG, desto<br>länger der<br>Zeitaufwand<br>für die Analyse | Je nach EZG:<br>2 km <sup>2</sup><br>(ca. 1 Stunde)<br>bis 50 km <sup>2</sup><br>(ca. 1 Tag) | 1) 2) 3) 5) 6)                                                                   |

| Ansatz/<br>Werkzeug                                                                   | Ziel                                                                                                                                                                                                                                 | Daten Input                                                                                                                                                                                                           | Daten Output                                                                                                                                           | Benötigte<br>Soft-/<br>Hardware     | Gültigkeits-<br>bereich/Grenzen                                                                                                                                                                                                                   | Unsicherheiten                                                                                                                                                                                                            | Skalen/<br>Massstäbe                                                     | Bearbeitungs-<br>aufwand/Zeit                               | Praktische<br>Anwen-<br>dung*                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <i>SlideforNET</i><br>& <i>Bankfor-<br/>NET</i><br>(Kap. 1.4)                         | Abschätzung der<br>Ufererosions-,<br>Uferrutsch- und<br>Hangrutschwahr-<br>scheinlichkeit bei<br>aktuellem Waldzu-<br>stand und aktueller<br>Schutzwirkung                                                                           | Mittlere<br>Hangneigung;<br>mittlere<br>Bestandes-<br>dichte; mittlerer<br>Brusthöhen-<br>durchmesser<br>(BHD); Baum-<br>artenmischung;<br>Schätzung<br>Bodentyp;<br>Gerinneneigung;<br>Gerinnebreite;<br>Uferneigung | Ufererosions-,<br>Uferrutsch- und<br>Hangrutschwahr-<br>scheinlichkeit;<br>Schutzwaldwir-<br>kung bei mini-<br>malem und<br>aktuellem Wald-<br>zustand | Online<br>(ecorisq.org)             | Identifikation<br>Ufererosions-,<br>Uferrutsch- und<br>Hangrutsch-<br>wahrschein-<br>lichkeit für<br>einen Hang/<br>ein Gerinne-<br>Querprofil bei<br>aktuellem Wald-<br>zustand                                                                  | Die grössten<br>Unsicherheiten<br>liegen bei der<br>Abschätzung<br>von Boden-<br>eigenschaften                                                                                                                            | Gerinneab-<br>schnitt (10 –<br>100m Länge je<br>nach Hetero-<br>genität) | Ca. 10 Minuten                                              | 2) 3) 5) 6)<br><br>vgl. Beschrei-<br>bung am Ende<br>von Anhang A3 |
| <b>Empirische<br/>Schätz-<br/>formeln<br/>Gl. (1.3) bis<br/>(1.12)<br/>(Kap. 1.5)</b> | Abschätzung der<br>SH-Fracht $V_{reg}$ mit-<br>tels Regression<br>(Potenzfunktion)                                                                                                                                                   | Einzugsgebiets-<br>und/oder Ereig-<br>nisvariablen                                                                                                                                                                    | Geschätzte<br>SH-Menge in<br>Festmetern                                                                                                                | Taschen-<br>rechner o. ä.           | Einfaches<br>Schätzverfah-<br>ren um Grösse-<br>ordnung der<br>SH-Menge abzu-<br>schätzen; räum-<br>lich nicht explizit;<br>typischerwei-<br>se für Ereignisse<br>$HQ_{50-150}$ : bes-<br>te Ergebnisse<br>für SH-Mengen<br>50–500 m <sup>3</sup> | Grosse Streu-<br>ung der Daten;<br>Anwendung<br>von 10%- &<br>90%-Perzentil-<br>Bandbreiten,<br>sowie Worst-<br>Case-Szenario                                                                                             | EZG < 1 km <sup>2</sup><br>bis mehrere<br>100 km <sup>2</sup>            | Klein (wenige<br>Minuten, falls<br>Inputdaten<br>vorhanden) | 3) 5)                                                              |
| <b>Typisie-<br/>rungsche-<br/>ma<br/>(Kap. 1.6)</b>                                   | Vereinfachtes<br>Beurteilungs-<br>verfahren für<br>potenzielle SH-Ein-<br>tragsprozes-<br>se (Ufererosion,<br>Uferrutschung<br>und flachgrün-<br>dige Hangrut-<br>schung) sowie<br>zur Abschätzung<br>der Vegetations-<br>einwirkung | Gerinnebreite;<br>Gerinneneigung;<br>Hangneigung;<br>Abschätzung;<br>Schertiefe                                                                                                                                       | Umsetzungs-<br>vorschläge für<br>waldbauliche<br>Massnahmen<br>zur Reduktion<br>des potenziellen<br>SH-Eintrags                                        | Typisierung<br>(Flussdia-<br>gramm) | Beurteilung der<br>potenziellen<br>SH-Eintragspro-<br>zesse pro Gerin-<br>neabschnitt, inkl.<br>angrenzende<br>Hänge                                                                                                                              | Dieses Sche-<br>ma ist für eine<br>grobe Klassifi-<br>kation gedacht,<br>welche klare<br>Klassen defi-<br>niert und mit<br>welcher Unsi-<br>cherheiten<br>bezüglich der<br>Kriterien-Grenz-<br>werte verbun-<br>den sind. | Gerinne-<br>abschnitt<br>(10–100m<br>Länge, je nach<br>Heterogenität)    | Ca. 10 Minuten                                              | 1) 6)                                                              |

| Ansatz/<br>Werkzeug                                  | Ziel                                                             | Daten Input                                                                                         | Daten Output                                                                                                                       | Benötigte<br>Soft-/<br>Hardware                                                                                                                                 | Gültigkeits-<br>bereich/Grenzen                                                                                                                           | Unsicherheiten                              | Skalen/<br>Massstäbe                                        | Bearbeitungs-<br>aufwand/Zeit                                                     | Praktische<br>Anwen-<br>dung* |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Verkleinerungs-<br/>koeffizient</b><br>(Kap. 2.2) | Ermittlung der Verkleinerung von SH während Transport im Gerinne | Gemessene SH-Grössen (Durchmesser & Länge); Rekonstruktion der Baumhöhe mittels Tariffunktion (LFI) | Verkleinerungskoeffizient;<br>$V_k = 0.2-0.4$                                                                                      | Taschenrechner o. ä.                                                                                                                                            | Keine klaren Trends bzgl. Einflussfaktoren; anwendbar auf Gebirgsflüsse & Wildbäche                                                                       | Rekonstruierte Baumhöhe $\pm 15\%$          | Skala: Gerinneabschnitt<br>Transportdistanz: 200m bis 30 km | Gering                                                                            | 5)                            |
|                                                      | <b>Monitoring:<br/>Feldbe-<br/>hebung</b><br>(Kap. 2.5.1)        | Ermittlung von Schwemmholzablagerungen; räumliche Aufteilung im Flussbett                           | SH-Ablagerung;<br>SH-Grösse;<br>SH-Position;<br>Räumliche Verteilung des SH;<br>temporäre Änderungen (kontinuierliche Überwachung) | Feldprotokoll;<br>GPS; Entfernungsmesser                                                                                                                        | Gültigkeitsbereich: Grundlegende Daten zur Modellvalidierung; Prozessverständnis und Quantifizierung von Schwemmholzablagerung                            | Gerinneabschnitt (von Metern zu Kilometern) | Variabel von wenigen Stunden bis zu mehreren Tagen          | 1) 3) 4) 6)                                                                       |                               |
| <b>Monitoring:<br/>Kamera</b><br>(Kap. 2.5.2)        | Abschätzung des Schwemmholzabflusses                             |                                                                                                     | Schwemmholzabfluss                                                                                                                 | Bildprozessor (z.B. ImageJ, GIMP, Photoshop usw.); statistischen Software (z.B. R, Matlab) Kamera; Strom oder Batterien; Datenübertragung und Speicherkapazität | Gültigkeitsbereich: Grundlegende Daten zur Modellvalidierung; Prozessverständnis und Quantifizierung von Schwemmholzabfluss<br><br>Grenzen: Zeitaufwendig | Sichtbarkeitsbedingungen; Bildverzerrung    | Gerinneabschnitt                                            | Bildverarbeitung und Analysen: Variabel von wenigen Stunden bis zu mehreren Tagen | 3) 5)                         |
|                                                      |                                                                  |                                                                                                     |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                           |                                             |                                                             |                                                                                   |                               |

vgl. Beschreibung am Ende von Anhang A3

| Ansatz/<br>Werkzeug                                  | Ziel                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Daten Input                                                                                | Daten Output                                                                                                                                                                                                                                                   | Benötigte<br>Soft-/<br>Hardware                                                     | Gültigkeits-<br>bereich/Grenzen                                                                                                               | Unsicherheiten                                               | Skalen/<br>Massstäbe                                                                                                           | Bearbeitungs-<br>aufwand/Zeit                          | Praktische<br>Anwen-<br>dung*<br>vgl. Beschrei-<br>bung am Ende<br>von Anhang A3 |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Monitoring:<br/>Fernerkundung</b><br>(Kap. 2.5.3) | Ermittlung von Schwemmholzab-lagerungen; räum-liche Verteilung im Flussbett                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Satellitenbilder mit hoher Auflö-serung; Luftbilder; Drohnenbilder                         | SH-Ablage-rung; SH-Grös-se; SH-Position; Räumliche Verteilung des SH; temporäre Änderungen (kon-tinuierliche Über-wachung)                                                                                                                                     | GIS (z. B. Arc-GIS, QGIS); Photogram-metrie-Soft-ware (z. B. Pix4D, Agisoft, o. ä.) | Gültigkeitsbe-reich: Analyse grosser Flächen<br><br>Grenzen: Bild-auflösung                                                                   | SH-Grösse; SH-Menge                                          | Gerinneab-schnitt (von Metern zu Kilo-metern)                                                                                  | Variabel von wenigen Stunden bis zu mehreren Tagen     | 1) 3)                                                                            |
| <i>Iber-Wood</i><br>(Kap. 2.4)                       | Hydraulische Modellierung; morphodynamische Modellierung; Modellierung der Schwemmholzdy-namik:<br>• um Holzgefahren, Holztransport und -ablagerung zu analysieren<br>• zur Rekonstruk-tion von Holzab-lagerungsmustern und zum Erkennen von Bereichen mit bevorzugter Ver-klauung<br>• um kritische Inf-rastruktur entlang eines Flusses zu identifizieren<br>• um ein vergange-nes Flutereignis zu rekonstruieren<br>• um Hypothesen zu testen oder mög-liche Szenarien zu analysieren | Digitales Gelände-modell (DGM); Rau-heit; Abfluss; Schwemmholz-infos (Grösse, Dichte usw.) | Ergebnis in Form von Raster-Dateien, Bildern und Grafiken betreffend:<br>• Wasserstand<br>• Fließgeschwin-digkeit<br>• Froude-Zahl<br>• Scherbeanspru-chung<br>• Erosion/Ablage-rung<br>• Holzablagerun-gen<br>• SH-Trajektorien<br>• Holztransport-verhältnis | <i>Iber-Wood</i>                                                                    | Gültigkeitsbe-reich:<br>Ermöglicht die Modellierung von Wasser-, Sedi-ment- und Holz-dynamik<br><br>Grenzen:<br>Validierung empirischer Daten | Die Üblichen im Zusammen-hang mit hydraulischer Modellierung | Gerinneab-schnitt (von Metern zu Kilo-metern); Ein-zugsgebiet; Modellierung von skalierten Experimenten (Meter bis Zentimeter) | Variabel von wenigen Minu-ten bis zu meh-reren Stunden | 4) 5)                                                                            |

| Ansatz/<br>Werkzeug                                                                        | Ziel                                                                               | Daten Input                                                                                                                     | Daten Output                                                                                                                  | Benötigte<br>Soft-/<br>Hardware | Gültigkeits-<br>bereich/Grenzen                                                      | Unsicherheiten                                                                                              | Skalen/<br>Massstäbe                                                                                                  | Bearbeitungs-<br>aufwand/Zeit | Praktische<br>Anwen-<br>dung* |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| <b>Empirische<br/>Abschätz-<br/>gleichung<br/>Gl. (3.1)<br/>und (3.2)<br/>(Kap. 3.1.1)</b> | Ermittlung der Ver-<br>klausungswahr-<br>scheinlichkeit $p$                        | Pfeilerdurch-<br>messer;<br>Pfeileranzahl;<br>Zufluss-Fließ-<br>geschwindig-<br>keit; Holzlänge;<br>Holztransport               | Verklausungs-<br>wahrschein-<br>lichkeit $p$ für<br>Einzeltransport<br>und schubweisen<br>Schwemmholz-<br>transport           | Taschen-<br>rechner o. ä.       | $F_o = 0.08...1.2$<br>bzw.<br>$0 \leq LW_p \leq 0.53$                                | Streuung der<br>Daten: $\pm 30\%$<br>$R^2 = 0.83$                                                           | Skala: Quer-<br>schnitt;<br>Gleichung<br>abgeleitet von<br>Modellversu-<br>chen (Mass-<br>stab 1:20)                  | Gering                        | 4) 5)                         |
| <b>Empirische<br/>Abschätz-<br/>gleichung<br/>Gl. (3.3) bis<br/>(3.5)<br/>(Kap. 3.3.1)</b> | Ermittlung des Auf-<br>staus $\Delta h$ infolge<br>Schwemmholzver-<br>klausung     | Zufluss-Froude-<br>Zahl; Verklaus-<br>ungslänge;<br>Holzdurchmes-<br>ser; Auflocke-<br>rungsfaktor;<br>Anteil Feinma-<br>terial | Höhe des zu<br>erwartenden Auf-<br>staus $\Delta h$                                                                           | Taschen-<br>rechner o. ä.       | $F_o = 0.2...1.4$ bzw.<br>$LW_A = 0...1.0$                                           | Streuung der<br>Daten: $\pm 20\%$<br>$R^2 = 0.95$                                                           | Skala: Quer-<br>schnitt;<br>Gleichung<br>abgeleitet von<br>Modellversu-<br>chen (Mass-<br>stab 1:50, 1:30<br>und 1:6) | Gering                        | 4) 5)                         |
| <b>Empirische<br/>Abschätz-<br/>gleichung<br/>Gl. (3.6)<br/>und (3.7)<br/>(Kap. 3.3.1)</b> | Ermittlung des<br>charakteristischen<br>Schwemmholzvolu-<br>mens $V_c$             | Zufluss-<br>Wassertiefe;<br>Zufluss-Froude-<br>Zahl; mittlerer<br>Korndurchmes-<br>ser                                          | Schwemmholzvo-<br>lumen $V_c$ , das zu<br>dem massgeben-<br>den Aufstau führt                                                 | Taschen-<br>rechner o. ä.       | $F_o = 0.3...1.5$ für<br>feste Sohle<br>$F_o = 0.5...1.5$<br>für bewegliche<br>Sohle | Streuung der<br>Daten: $\pm 30\%$<br>$R^2 = 0.89$ (feste<br>Sohle)<br>$R^2 = 0.98$<br>(bewegliche<br>Sohle) | Skala: Quer-<br>schnitt;<br>Gleichung<br>abgeleitet von<br>Modellversu-<br>chen (Mass-<br>stab 1:30 und<br>1:6)       | Gering                        | 4) 5)                         |
| <b>Empirische<br/>Abschätz-<br/>gleichung<br/>Gl. (3.8)<br/>(Kap. 3.3.1)</b>               | Abschätzung des<br>Einflusses des<br>Schwemmholzvolu-<br>mens auf den Auf-<br>stau | Annahmen für<br>Verhältnis zwi-<br>schen Fest-<br>volumen und<br>charakteristi-<br>schem Volumen                                | Aufstauverhält-<br>nis $\eta = \Delta h / \Delta h_c$<br>( $\Delta h_c$ = Aufstau mit<br>dem charakteris-<br>tischen Volumen) | Taschen-<br>rechner o. ä.       | $F_o = 0.3...1.5$                                                                    | Streuung der<br>Daten: $\pm 30\%$<br>$R^2 = 0.93$                                                           | Skala: Quer-<br>schnitt;<br>Gleichung<br>abgeleitet von<br>Modellversu-<br>chen (Mass-<br>stab 1:30 und<br>1:6)       | Gering                        | 4) 5)                         |

\*  
vgl. Beschrei-  
bung am Ende  
von Anhang A3

| Ansatz/<br>Werkzeug                                                          | Ziel                                                                                                | Daten Input                                                                                                                                                                                                      | Daten Output                                         | Benötigte<br>Soft-/<br>Hardware | Gültigkeits-<br>bereich/Grenzen                                                                                                          | Unsicherheiten                                                               | Skalen/<br>Massstäbe                                                                                 | Bearbeitungs-<br>aufwand/Zeit | Praktische<br>Anwen-<br>dung*                            |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------|
| <b>Empirische<br/>Abschätz-<br/>gleichung<br/>Gl. (3.9)<br/>(Kap. 3.3.2)</b> | Ermittlung des<br>maximalen lokalen<br>Kolks $S_{max}$ infolge<br>Schwemmholzver-<br>klausung       | Spezifischer<br>Durchfluss;<br>Korngrößen;<br>Schwemmholz-<br>volumen                                                                                                                                            | Kolkentiefe beim<br>Schwemmholzre-<br>chen $S_{max}$ | Taschenrech-<br>ner o. ä.       | $F_o = 0.5 \dots 1.5$<br>bzw. $S_{max}/d_{50} > 2$<br>und<br>$LW_A = 0 \dots 120$                                                        | Streuung der<br>Daten: $\pm 30\%$<br>$R^2 = 0.97$                            | Skala: Quer-<br>schnitt;<br>Gleichung<br>abgeleitet von<br>Modellversu-<br>chen (Mass-<br>stab 1:30) | Gering                        | 4) 5)<br>vgl. Beschrei-<br>bung am Ende<br>von Anhang A3 |
| <b>Freibord<br/>Gl. (3.10)<br/>bis (3.12)<br/>(Kap. 3.5)</b>                 | Ermittlung des Teil-<br>freibordes aufgrund<br>von Schwemmholz-<br>transport bei Brü-<br>cken $f_i$ | Holztyp<br>(Stamm vs.<br>Wurzelstock);<br>Schwemm-<br>holztrans-<br>portfaktor $K$ ;<br>Verklausungs-<br>wahrscheinlich-<br>keit; Holzlänge;<br>effektive Quer-<br>schnittsbreite;<br>Brückenbe-<br>schaffenheit | Teilfreibord $f_i$ bzw.<br>Freibord $f_e$            | Taschenrech-<br>ner o. ä.       | Gültigkeitsbe-<br>reich der ver-<br>wendeten<br>Gleichung zur<br>Berechnung der<br>Verklausungs-<br>wahrscheinlich-<br>keit (Kap. 3.1.1) | Abschätzung<br>Holztyp und<br>-länge; Sensi-<br>tivitätsanalyse<br>empfohlen | Skala: Quer-<br>schnitt                                                                              | Gering                        | 5)                                                       |

---

## Praktische Anwendungsbeispiele der vorgeschlagenen Ansätze

\* Siehe entsprechende Nummerierung in obiger Übersichtstabelle von Anhang A3

### 1) Identifizierung gefährdeter Gebiete

- Potenzielle Waldverlustflächen räumlich explizit darstellen
- Unterscheidung nach Eintragsprozessen und Ereignisszenarien

### 2) Ausscheidung von Schutzwaldflächen

### 3) Abschätzung von Schwemmholzmengen

- Schwemmholzpotenzial  $V_{pot}$
- Geschätzte Schwemmholzfracht  $V_{est}$  bzw.  $V_{reg}$

### 4) Identifizierung von Schwachstellen im Gerinne

- Verklausung, Kolkbildung, Aufstau

### 5) Bemessungsgrundlagen für wasserbauliche Massnahmen

- SH-Rückhaltestrukturen
- Dimensionierung von Brücken (Freibord) und Durchlässen

### 6) Waldbauliche und ingenieurbioökologische Massnahmen

- Forstliche Eingriffe (Rodung, Aufforstung, Schutzwaldpflege)
- Ingenieurbioökologische Massnahmen (Revitalisierung, Böschungsverbau)

# Anhang 4 Übersichtstabelle und Vergleich der verschiedenen GLS-Ansätze (Beispiel Chirel)

|             | SH <sub>«30»</sub> |                  |                    |                  |                    |  | SH <sub>100</sub> |                  |                    |                  |                    |  | SH <sub>«300»</sub> |                  |                    |                  |                    |                  | HW <sub>2005</sub> |  |
|-------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|--|-------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|--|---------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|--|
|             | V <sub>pot</sub>   | V <sub>est</sub> | V <sub>kombi</sub> | F <sub>pot</sub> | F <sub>kombi</sub> |  | V <sub>pot</sub>  | V <sub>est</sub> | V <sub>kombi</sub> | F <sub>pot</sub> | F <sub>kombi</sub> |  | V <sub>pot</sub>    | V <sub>est</sub> | V <sub>kombi</sub> | F <sub>pot</sub> | F <sub>kombi</sub> | V <sub>obs</sub> | F <sub>obs</sub>   |  |
| Chlosegrabe | Slide/BankforMAP   | 138              | 53                 | 4.6              |                    |  | 429               | 132              |                    | 7.1              |                    |  | 1757                | 706              |                    | 14.6             |                    |                  |                    |  |
|             | EGA                | 2707             | 70                 | 11.5             | 1.0                |  | 3244              | 245              | 427                | 13.8             | 2.5                |  | 3556                | 724              | 641                | 15.1             | 3.7                | 542              | 2.8                |  |
|             | FGA                |                  | 571                |                  |                    |  |                   | 1122             |                    |                  |                    |  |                     | 2559             |                    |                  |                    |                  |                    |  |
| Horboden    | Slide/BankforMAP   | 1528             | 313                | 34.8             |                    |  | 2207              | 541              |                    | 44.5             |                    |  | 4650                | 1864             |                    | 68.6             |                    |                  |                    |  |
|             | EGA                | 13525            | 407                | 55.2             | 5.3                |  | 17811             | 1480             | 2845               | 75.5             | 13.1               |  | 20949               | 4524             | 4097               | 88.5             | 19.4               | 3103             | 11.2               |  |
|             | FGA                |                  | 2129               |                  |                    |  |                   | 4668             |                    |                  |                    |  |                     | 9126             |                    |                  |                    |                  |                    |  |
| Chirel      | EGA                | 53011            | 1628               | 214.9            | 8.7                |  | 74808             | 6254             | 5598               | 304.6            | 29.6               |  | 90539               | 19276            | 9050               | 364.9            | 47.9               | 9741             | 32.8               |  |
|             | FGA                |                  | 3809               |                  |                    |  |                   | 8846             |                    |                  |                    |  |                     | 18744            |                    |                  |                    |                  |                    |  |

V = SH-Volumen (m<sup>3</sup>)

F = Fläche (ha)

pot = SH-Potenzial; est = geschätzte SH-Menge (Eintrag); kombi = überlappende Eintragsfläche (nur beim EGA)

Hinweis: Leere Felder können mit dem entsprechenden Ansatz nicht explizit quantifiziert werden.

---

## Anhang 5 Feldprotokoll für die Aufnahme von Schwemmholz

### Allgemeine Beschreibung

Gewässer:

---

Ort:

Fotos:

---

X:

Y:

Z:

---

Geomorphologie (Kaskaden, Stufen und Becken, ebene Sohle, Becken-Riffel, gewellt, verzweigt):

---

Durchschnittliche Sohlneigung:

---

Gerinnebreite (bei bordvollem Abfluss):

---

Gerinnetiefe (bei bordvollem Abfluss):

---

Breite Flusstal:

---

Einengung:

---

Seitliche Hangneigung:

---

Korngrößenverteilung:

---

Waldart (dominante Arten) und Dichte:

---

# Feldprotokoll für die Aufnahme von Holzansammlungen

[illegible]

## Feldprotokoll für die Aufnahme von einzelnen Schwemmholzstücken

[illegible]

## Feldprotokoll: read me

| Variable                          | Beschreibung/Kategorie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Einzelne Schwemmholzstücke</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Länge                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Durchmesser                       | Es wird empfohlen, den Durchmesser mindestens an den beiden Enden des Stücks zu messen; falls die Stückform variiert, ist eine dritte Messung in der Stückmitte von Vorteil.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Ausrichtung                       | Angabe des Winkels zwischen Holzstück und Ufer/Fliessrichtung; falls Winkelklassen gebildet werden: 0°: <b>parallel</b> , 90°: <b>senkrecht</b> (lotrecht), 45°: <b>schräg</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Geomorphologische Lage im Gerinne | Gerinnebett, Geschiebebank, Ufer, Insel, Überflutungsbereich (Schwemmebene)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Baumart                           | Falls feststellbar; falls nicht erkennbar, Angabe ob Laub- oder Nadelbaum                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Typ/Stabilität*                   | <b>Unbefestigt</b> (ganzes Stück liegt im Gerinne, wobei es nicht eingegraben oder verklemmt ist); <b>Brücke</b> (beide Stückenden liegen oberhalb des bordvollen Gerinnebettes, die Stückmitte hängend über dem Gerinnequerschnitt); <b>zusammengebrochene Brücke</b> (beide Enden liegen oberhalb des Gerinnebettes, Bruchstelle in der Mitte); <b>Rampe</b> (ein Stückende liegt im Gerinne, das andere liegt oberhalb des bordvollen Gerinnebettes); <b>verankert</b> (ein Teil oder das ganze Holzstück ist mit anderen Stücken im Gerinne verkeilt/festgeklemmt); <b>Holzstufe</b> (Holzstück ist Teil einer Stufe); <b>eingegraben</b> (das ganze Stück oder ein Teil davon ist im Gerinnebett eingegraben) |
| Morphologische Effekte            | Sedimentrückhalt flussaufwärts eines Stückes; Kolkbildung in Becken flussabwärts eines Stückes; Strömungsumlenkung; Umwandlung von Strömungsenergie; Uferstabilisierung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Vermorschung                      | Maximum 6 Klassen (können zu 3 oder 4 Klassen gruppiert werden):<br><b>6: verrottet</b> (sehr weiches Holz, das einfach von Hand zerkleinert werden kann); <b>5: verwittert</b> (relativ weiches Holz, das von Hand zerkleinert werden kann); <b>4: kahl</b> (sehr wenig bis gar keine Rinde vorhanden); <b>3: frisch</b> (Äste noch vorhanden, Rinde teilweise oder ganz intakt); <b>2: sehr frisch</b> (ganze Rinde intakt, ein deutlich frisches Stück Holz); <b>1: lebend</b>                                                                                                                                                                                                                                  |
| Wurzeln (Wurzelstock)             | Ja/Nein, falls vorhanden; Ausrichtung bezüglich Fliessrichtung sowie Masse angeben                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Herkunft (Eintragsprozess)        | Ufererosion (inkl. Schwemmebene); Rutschung (Hänge); Murgang (Zubringer); Totholz Gerinne; Bauholz; unbekannt                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Stückart                          | <b>Stammstück</b> (Baumteil ohne Stock; grösserer Teil gehörte nicht zu Krone; bzw. ohne starke Äste); <b>Stammstück mit Stock</b> (Baumteil mit Stock; grösserer Teil ohne Verzweigungen/Kronen/Äste); <b>Stock</b> (Baumteil mit Stock bis Länge 1.3 m ab Wurzelanlauf) <b>Kronenstück</b> (Stammteil; grösserer Teil aus Krone; mit Astanläufen oder starken Ästen); <b>ganzer Baum</b> (inkl. Stock und inkl. Krone mit Zopf/Ästen ≤7 cm Durchmesser)                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Schnittstellen                    | Künstliche Eingriffe mit Motorsäge, z.B. Stamm-Trennschnitte, Entastungsschnitte                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

| Holzansammlungen                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Länge                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Breite                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Höhe                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Porenraum (Hohlraum)                                                                          | Gemäss Lange & Bezzola (2006), Anteil Porenvolumen 20–50 % je nach Ablagerungsdichte                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Anzahl Stücke                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Häufigste Baumart                                                                             | Falls feststellbar; falls nicht erkennbar, Angabe, ob Laub- oder Nadelbaum                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Geomorphologische Lage im Gerinne und Verankerung                                             | <b>Baum/Wurzelstock</b> (verbunden mit einem lebenden Baum oder einem Wurzelstock); <b>grosser Block</b> (verbunden mit einem grossen Block im Gerinne); <b>Mäander</b> (abgelagert auf der Kurvenaußenseite); <b>Geschiebebank</b> (abgelagert auf alternierenden Böden oder auf Geschiebeinseln im Gerinne); <b>Felsuntergrund</b> (eingeklemmt im Fels); <b>Biberdamm</b> (in einem Biberdamm integriert); <b>Ufer</b> (eingebettet im Ufer, mit Erde oder anderem Ufermaterial bedeckt); <b>Holzstufe</b> (eine natürliche Stufe im Gerinnebett bildend); <b>vergraben</b> (teilweise im Gerinnebett vergraben, jedoch keine Stufe bildend) |
| Flussaufwärts gespeichertes Feststoffvolumen; Vermessung der Ablagerung; häufigste Korngrösse |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Gewässer                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Geomorphologischer Typ                                                                        | Kaskade, Stufen und Becken, ebenes Gewässerbett, Schnellen und Becken, Dünen und Riffeln, verzweigtes Gerinne                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Mittlere Gerinneneigung                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Breite bei bordvollem Abfluss                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Abflusshöhe bei bordvollem Abfluss                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Talbreite                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Häufigste Baumart im Bestand und Bestandesdichte                                              | Baumart (bzw. Laub- oder Nadelholz); die Bestandesdichte kann in Klassen angegeben werden (z. B. dicht, spärlich, kein Wald).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Fels-/Lockergestein                                                                           | Angabe des vorherrschenden Sohlentyps                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |