

---

Detailbericht zum Forschungsprojekt WoodFlow

# Empirischer GIS Ansatz

---

Autoren: Nicolas Steeb, Alexandre Badoux, Christian Rickli, Dieter Rickenmann

Birmensdorf, Dezember 2019



Eidg. Forschungsanstalt für Wald,  
Schnee und Landschaft WSL

Erstellt im Rahmen des BAFU-Forschungsprogramms WoodFlow ([www.woodflow.ch](http://www.woodflow.ch))

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
1.1	Ziele / Verwendung .....	3
2	Grundlagen.....	4
2.1	Begriffe .....	4
2.2	Entstehung von Schwemmholz .....	5
3	Methodik.....	9
3.1	Generelles Konzept / GIS Modell .....	9
3.2	Datengrundlage & Preprocessing.....	10
3.3	Szenarien .....	13
3.4	Modellierung der Eintragsprozesse.....	15
3.5	Abminderungsfaktoren .....	22
3.6	Testeinzugsgebiete .....	23
4	Resultate.....	24
4.1	Schwemmholzpotenzial .....	24
4.2	Schwemmholzfracht.....	25
5	Diskussion.....	28
5.1	Anpassungsgüte / Skaleneffekte .....	28
5.2	Unsicherheiten .....	30
5.3	Vergleich mit empirischen Schätzformeln .....	31
5.4	Vor- und Nachteile des EGA .....	34
5.5	Ausblick.....	35
6	Literatur.....	36
7	Anhang .....	40
7.1	SH-Potenzial & -Fracht ausgewählter Testeinzugsgebiete.....	40
7.2	Übersichtstabelle Testeinzugsgebiete.....	45

# 1 Einleitung

Im ersten Kapitel des WoodFlow-Syntheseberichts (BAFU, 2020) sind Methoden und Tools zusammengestellt, die es Praktikern ermöglicht, den Eintrag von Schwemmholz (SH) zu quantifizieren. Im Kapitel 1.5 des Syntheseberichts sind empirische Formeln vorgestellt, die eine einfache und schnelle Abschätzung der zu erwartenden Schwemmholzfracht anhand verschiedener Einflussvariablen erlauben.

Komplementär dazu wird in Kapitel 1.2 des Syntheseberichts ein empirischer GIS-Ansatz (EGA) beschrieben, mit welchem potentielle Eintragsflächen von Schwemmholz lokalisiert werden können. Somit können einerseits potentielle Gefahrenherde identifiziert und durch gezielte forstliche Eingriffe und Gewässerunterhalt entschärft werden. Andererseits kann mithilfe des GIS-Modells die zu erwartende Schwemmholzmenge an einem bestimmten Punkt abgeschätzt werden, was für die Hochwasserprävention wertvoll ist (z.B. für die Dimensionierung von Retentionsstrukturen).

## 1.1 Ziele / Verwendung

Es wurde ein räumlich teilweise explizites GIS-Modell zur Abschätzung des Schwemmholzeintrags entwickelt, das auf einer national einheitlichen Datengrundlage basiert und grundsätzlich auf die ganze Schweiz anwendbar ist (kalibriert wurde das Modell jedoch ausschliesslich an Testeinzugsgebieten im Alpen- und Voralpenraum).

Anhand der Modellierung verschiedener Eintragsprozesse werden potentielle Waldflächen ausgeschieden, die Schwemmholz in das Gerinne liefern können. Mithilfe von Informationen über den Holzvorrat in den betroffenen Waldflächen wird daraus das Schwemmholspotenzial für ein bestimmtes Einzugsgebiet (EZG) abgeschätzt. Während eines Hochwasserereignisses wird jedoch kaum das ganze Schwemmholspotenzial mobilisiert und im Fliessgewässer transportiert. Unter Anwendung sogenannter Abminderungsfaktoren wird das SH-Potenzial deshalb weiter reduziert auf eine geschätzte Schwemmholzfracht. Das Modell wurde mit beobachteten Schwemmholzmengen verglichen und validiert.

Stichpunktartig können die Anwendungszwecke des EGA wie folgt aufgelistet werden:

- Einfaches und schnelles Verfahren zur räumlich expliziten Abschätzung des Schwemmholzeintrags
- Schweizweit einheitliche Datengrundlage für die regionale Vergleichbarkeit von Ergebnissen
- Modellierung potentieller Eintragsflächen aufgrund verschiedener geomorphologischer Gefahrenprozesse
- Abschätzung des Schwemmholzpotenzials ( $V_{pot}$ ) anhand des Holzvorrats auf Waldflächen
- Ermittlung der geschätzten Schwemmholzfracht ( $V_{est}$ ) anhand empirischer Abminderungsfaktoren
- Vergleich mit effektiv beobachteten Schwemmholz mengen ( $V_{obs}$ )

Auch in früheren Studien wurde versucht, das Schwemmholzaufkommen räumlich explizit zu quantifizieren. Mazzorana et al. (2009) haben einen Indikator entwickelt, um die relative Verfügbarkeit von Schwemmholz in einem Einzugsgebiet zu bestimmen, was laut Autoren als Grundlage für die Erarbeitung von Gefahrenkarten gebraucht werden kann. In der Studie von Kasprak et al. (2012) wird die gesamte Vegetation in der Talbreite als potentiell rekrutierbar angesehen, wobei ein Indikator (basierend auf Hangneigung, Talbreite und Sinuosität des Gerinnes) aufzeigt, ob Massenbewegungen oder Seitenerosion der dominierende Eintragsprozess ist. Es wurden auch komplexere Modelle für die Abschätzung des SH-Potenzials entwickelt, wie z.B. in Ruiz-Villanueva et al. (2014) mithilfe des Fuzzy-Logic Ansatzes. Dieser wurde im Zuge des WoodFlow Projekts explizit für die Anwendung in der Schweiz weiterentwickelt (Kap. 1.3 des Syntheseberichts) und steht komplementär zum hier vorgestellten empirischen GIS Ansatz zur Verfügung. Des Weiteren haben in der Schweiz diverse Ingenieurbüros ihre eigenen Tools entwickelt, um SH-Potenzial und –Fracht abzuschätzen (von Glutz, 2011).

## 2 Grundlagen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die theoretischen Grundlagen zur Schwemmholzthematik. Dabei wird hauptsächlich auf die Eintragsprozesse von Schwemmholz eingegangen sowie auf die Auswirkungen von Schwemmholz auf Mensch und Natur. Weiter wird ein Überblick gegeben über vergangene schwemmholzrelevante Hochwasserereignisse in der Schweiz.

### 2.1 Begriffe

Als „Schwemmholz“ wird das vom Wasser an- oder mitgeschwemmte Holz bezeichnet, welches üblicherweise länger als 1 Meter und breiter als 10 Zentimeter definiert ist (Wohl & Jaeger, 2009). Der Ausdruck „Schwemmholz“ ist in der Schweizer Fachliteratur am gängigsten und wird deshalb auch in dieser Arbeit gebraucht. Andere Begriffe sind „Treibholz“, welcher eher in Verbindung mit der Flösserei oder dem Rechengut bei Wasserkraftanlagen verwendet wird, „Wildholz“, der in Deutschland und Österreich vermehrt gebräuchlich ist, oder „Unholz/Schadholz“, welcher vor allem das Holz in Gewässern beschreibt, welches bei Unwetterereignissen negative Auswirkungen hat (Rickenmann, 1997; Rickli & Bucher, 2006). Im Englischen wird Schwemmholz als „instream wood“, «large wood»,

«driftwood» oder «woody debris» bezeichnet (Steeb et al., 2017).

Beim Schwemmholz wird unterschieden zwischen bereits abgestorbenem Holz im Flussgerinne oder in naheliegenden Waldstücken (Totholz), frischem Holz, welches erst beim Hochwasserereignis in das Wasser eingetragen wird (Grünholz) und verarbeitetem Holz (z.B. von Holzlager, Schreinereien oder Holzbrücken), welches von der Flut mitgerissen werden kann (Wirtschaftsholz) (Lange & Bezzola, 2006).

## 2.2 Entstehung von Schwemmholz

Die Menge an transportiertem Schwemmholz in einem Gewässer nimmt mit steigendem Abfluss zu und ist generell am höchsten bei sporadischen, d.h. seltenen und extremen Hochwasserereignissen. Wieviel Schwemmholz dabei jedoch anfällt, ist von vielerlei Faktoren abhängig; vor allem vom Zustand des Waldes und dessen Bewirtschaftung, den Bodeneigenschaften, der Geologie, der Exposition und Hangneigung, sowie von den involvierten Eintragsprozessen (Gurnell et al., 2002). Nebst dem Gewässer selbst sind also auch externe und menschliche Einflüsse für die Schwemmholzproduktion verantwortlich (Rudolf-Miklau et al., 2011). Da sich das bei Hochwasser anfallende Schwemmholz nebst dem frisch eingetragenen Grünholz auch aus dem bereits im Gerinne liegenden Totholz zusammensetzt (Rickli & Bucher, 2006), ist die vorhandene Schwemmholzmenge auch abhängig von vergangenen Hochwasserereignissen und dem nicht-fluvialen Eintrag seit jenem Zeitpunkt (Kramer & Wohl, 2017).

### 2.2.1 Eintragsprozesse

Eingetragen werden kann das Holz durch diverse Prozesse, abhängig von regionalen Unterschieden in klimatischen, hydrologischen und geomorphologischen Bedingungen. Dabei sind gewisse Prozesse während eines Unwetters aktiv, andere fallen jedoch nicht mit dem Zeitpunkt des Schwemmholztransportes überein. Zur ersteren Gruppe gehören im Wesentlichen die Prozesse Seitenerosion (und die daraus entstehenden Uferrutschungen), Hangrutschungen und murgangartige Prozesse (Rickli & Bucher, 2006).

Weitere Eintragsprozesse von Schwemmholz, welche nicht notwendigerweise während eines Unwetters geschehen, sind im Folgenden aufgelistet: Konkurrenz zwischen Bäumen oder der natürliche Alterungsprozess sind Ursachen für das Absterben von Totholz, welches direkt in das Gerinne fallen kann (Rickli & Bucher, 2006). Hohe Windgeschwindigkeiten können Auslöser für das Umfallen von Bäumen sein, welche dann selbst in das Gerinne fallen oder durch den Dominoeffekt andere Bäume dazu bringen (Rickli & Bucher, 2006; Ruiz-Villanueva et al., 2014). Weiter können Schnee und Eis zum Eintrag von Holz in das Flussgerinne führen. Besonders in mittleren Lagen kann Nassschnee als Schneelast Bäume oder Teile davon zum Um- oder Abknicken bringen. Grosse Mengen an Holz werden ausserdem teilweise auch durch Schneelawinen in nahe Gewässer hineintransportiert (Rickenmann et al., 1999; Rickli and Bucher, 2006; SLF, 1999). Zusätzlich kann schwimmendes Eis zu verstärkter Seitenerosion führen (Benda et al., 2003). Auch durch Waldbrände fallen neue Vorräte an Totholz an, welche zu potentiell Schwemmholz werden (Agee & Huff, 1987). Schliesslich kann auch der Mensch durch forstliche Massnahmen, ungünstig platzierte Holzlager oder verbautes Holz für zusätzliches potentielles Schwemmholz verantwortlich sein (Rickli & Bucher, 2006). Die Prozesse der zweiten Gruppe haben aber gemäss Waldner et al. (2007) während eines einzelnen Hochwasserereignisses weniger Bedeutung bezüglich Schwemmholzaufkommen.

In Abbildung 1 sind die Eintrags- und Ablagerungsprozesse von Schwemmh Holz schematisch dargestellt. In dieser Arbeit wird der Fokus auf den Eintrag durch Gerinneholz, Seitenerosion, Murgänge und Rutschungen gelegt, welche in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben werden.

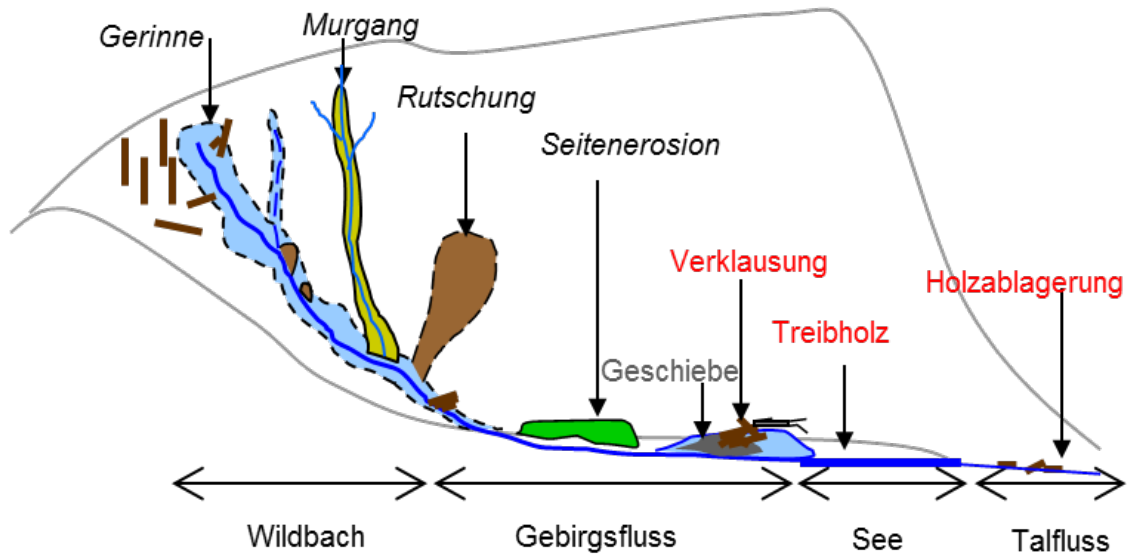


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Eintrags- und Ablagerungsprozesse von Schwemmh Holz (Waldner et al., 2009).

### 2.2.1.1 Gerinneholz

Zum Gerinneholz wird das Totholz gezählt, welches durch verschiedene Prozesse bereits vor dem Unwetter in den Hochwasserbereich eingetragen wurde, aber erst durch Hochwasserabfluss mobilisiert wird. Zusätzlich können auch lebende Bäume im Flussbett, auf Vegetationsinseln oder im Überschwemmungsgebiet von den Wassermassen mitgerissen werden (Ruiz-Villanueva et al., 2014).



Abbildung 2: Totholz im Gerinnebett der Sense, FR (Foto: N. Steeb, 2017)

### 2.2.1.2 Seitenerosion

Bei der Seitenerosion wird entlang von Fließgewässern durch die Schleppspannung des Abflusses Uferfläche wegerodiert. Bäume an dieser Stelle werden dadurch destabilisiert und stürzen in das Wasser. Gleiches passiert mit dem dort liegenden Totholz. Zusätzlich kann es infolge der Erosion zu Uferrutschungen kommen, welche weiteres Holz in das Gewässer einbringen können (Rickli & Bucher, 2006). Besonders gefährdet sind dabei Prallufer, Engstellen und steile Abschnitte (Rimböck, 2003). Da die Seitenerosion bei höherem Abfluss zunimmt (Bachmann Walker, 2012), treten diese hauptsächlich anlässlich von Hochwasserereignissen auf (Rickli & Bucher, 2006). Neben Abflussspitze und -volumen ist die Holzeintragsrate durch Seitenerosion auch abhängig von der Beschaffenheit und somit der Erodierbarkeit des Ufers (Benda et al., 2003). Ausserdem ist der Eintrag von Holz infolge Seitenerosion umso ausgeprägter, je grösser das Einzugsgebiet ist (Martin & Benda, 2001) und je breiter das Gerinne ist, wodurch höhere Abflüsse erwartet werden können (Bachmann Walker, 2012). Eine physikalische Berechnung der Rückgriffweite (Erosionsbreite) ist allerdings schwierig, da die Seitenerosion durch sehr viele Faktoren beeinflusst wird (Rousselot, 2012). Der Begriff „Seitenerosion“ wird in dieser Arbeit als Synonym von „Ufererosion“ verwendet.



Abbildung 3: Seitenerosion an der Kleinen Emme beim Hochwasser 2005 (Foto: Schweizer Flugwaffe, 2005).

### 2.2.1.3 Murgang

Ein Murgang ist ein Gemisch von Wasser und Feststoffen mit hohem Feststoffanteil, welcher in steilen Gerinnen langsam bis schnell hinabfliesst (BAFU, 2015). Die Auslösung eines Murganges ist vor allem abhängig von der Gerinneneigung, dem Niederschlag sowie der Geologie (Rickenmann et al., 2008). Oft gibt es mehrere Murgangschübe, welche eine grosse Erosionskraft ausüben (BAFU, 2015). Dadurch kann einerseits frisches Holz mitgerissen, andererseits aber auch bereits liegendes Gerinneholz weiter talwärts transportiert werden (Steeb et al., 2017). Umgekehrt ist es aber auch möglich, dass Schwemmholz Ursache für Murgänge ist, wenn beispielsweise eine Schwemmholzverkläuserung abrupt bricht (Rickenmann, 1997).



Abbildung 4: Murgang im Einzugsgebiet der Gaderia, Bozen, IT (18. Juli 2013). Quelle: <http://www.irpi.cnr.it>

#### 2.2.1.4 Rutschung

Grosse Niederschlagsmengen können durch Sättigung die Raumdicke des Bodens erhöhen und die rückhaltenden Kräfte verringern, was den Hang destabilisieren und Rutschungen zur Folge haben kann (Raetzo & Rickli, 2007). In dieser Arbeit werden flachgründige und tiefgründige Rutschungen sowie Hangmuren alle dem Prozess „Rutschung“ zugeordnet.

Befinden sich Bäume oder Totholz innerhalb der Rutschfläche, kann dieses Holz hangabwärts befördert werden. Erreicht die Rutschung ein Gewässer, wird das mittransportierte Holz zu Schwemmholz (Rickli & Bucher, 2006).

Schwemmholzeintrag durch Massenbewegungen wie Rutschungen und Murgänge setzt steile Hänge, enge Talsohlen und intensiven Niederschlag voraus. Deshalb ist der Schwemmholzeintrag durch Massenbewegung in gebirgigen Regionen deutlich wichtiger als in flacheren Regionen (Benda et al., 2003).



Abbildung 5: Rutschung "Cholrüti" in die Grosse Melchaa beim Hochwasser 2005 (Foto: P. Waldner, 2005)

### 3 Methodik

Im Folgenden werden die Datengrundlagen aufgelistet und erklärt und in einem weiteren Schritt deren konkrete Verwendung für die Modellierung der Eintragsprozesse erläutert.

#### 3.1 Generelles Konzept / GIS Modell

Der empirische GIS Ansatz (EGA) modelliert das Schwemmholtspotenzial  $V_{pot}$  eines Einzugsgebietes räumlich explizit mit Hilfe eines Geografischen Informationssystems (GIS). Vereinfacht gesagt geschieht dies mit der Verschneidung verschiedener Prozessflächen (potentieller SH-Eintrag) mit der Waldfläche (Holzvorrat) und dem Gewässernetz (Abbildung 6). Der Fokus liegt auf dem Eintrag bzw. der Mobilisierung von Schwemmholt während eines Hochwassers, namentlich Rutschungen, Seitenerosion, Murgänge und Mobilisierung von bereits im Gerinne liegendem Totholz. Holz, das in der Zeit vor einem Hochwasserereignis z.B. durch Windwurf, Schneedruck und Lawinen in das Gerinne eingetragen wurde, ist mit dem Anteil „Gerinneholz“ implizit berücksichtigt. In einem zweiten Modellierungsschritt wird aus dem Schwemmpotenzial die entsprechende Schwemmholtfracht  $V_{est}$  [m<sup>3</sup> Festmeter] aus einem Einzugsgebiet abgeschätzt. Durch die Verwendung von Abminderungsfaktoren sind z.B. effektive Rutschgebiete nicht mehr räumlich explizit ausgewiesen, sondern pauschal auf das untersuchte Einzugsgebiet bezogen. Das Modell wurde hauptsächlich an Einzugsgebieten im voralpinen und alpinen Raum getestet und validiert. Der EGA eignet sich demnach vor allem für die Abschätzung der Schwemmholtfracht in Gebirgsflüssen und Wildbächen.

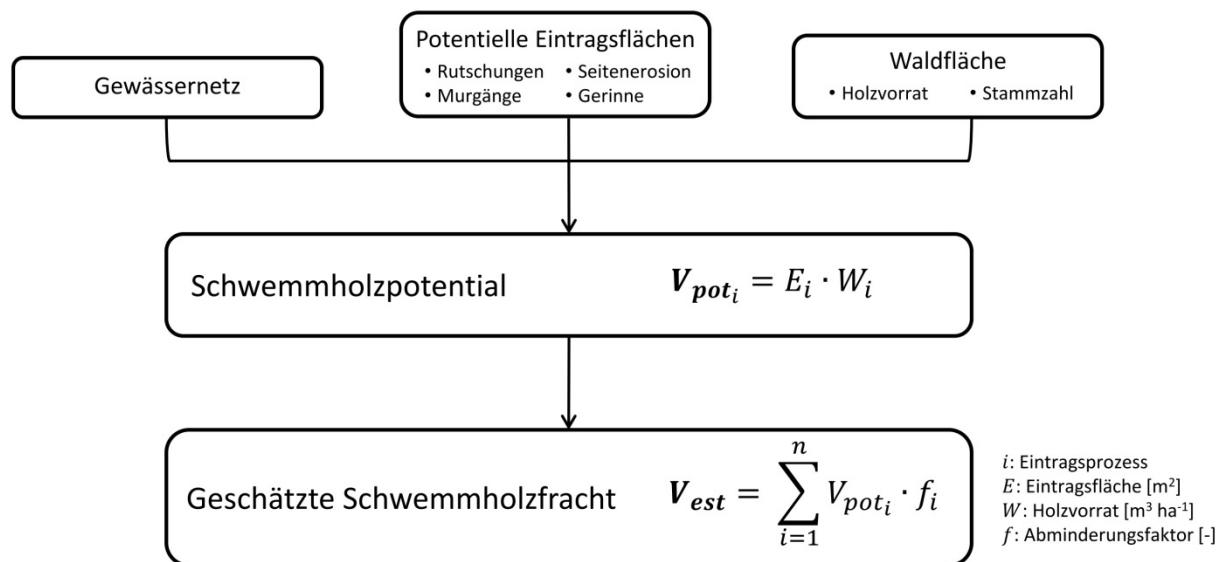


Abbildung 6: Konzeptionelles Schema des GIS-Modells.

Der EGA wurde mit ArcGIS 10.5 (ESRI) entwickelt und steht als Werkzeug in Form einer ModelBuilder-Toolbox (.tbx-Datei) zur Verfügung. Die entsprechende Toolbox sowie ein Manual für die Anwendung des EGA stehen auf der Projekt-Homepage [www.woodflow.ch](http://www.woodflow.ch) als Download zur Verfügung.

## 3.2 Datengrundlage & Preprocessing

In diesem Kapitel werden die Daten beschrieben, die für die Berechnung des Schwemmholtzpotenzials benötigt werden. Des Weiteren wird das Preprocessing (Bearbeiten/Anpassen) dieser Daten beschrieben, als Grundlage für die Anwendung des EGA.

Um eine regionale Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, werden als Input für die beiden GIS Ansätze schweizweit einheitliche Geodaten verwendet und weiterverarbeitet (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 Input-Daten benötigt:

### 3.2.1 Einzugsgebietsfläche

Das zu untersuchende Einzugsgebiet muss durch den Anwender selbst definiert werden und als Shapefile zur Verfügung stehen. 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 Einzugsgebietes stehen zum Download bereit.

### 3.2.2 Gewässernetz

Das Modell basiert auf dem Gewässernetz des topographischen Landschaftsmodells der Schweiz (TLM\_FLISSGEWAESSER: swissTLM3D © 2016 swisstopo (DV033594)), welches durch das ältere Landschaftsmodell (Vector25 © 2007 swisstopo (DV033594)), der FLOZ (CH-FLOZ: Vector25 © 2007 swisstopo (DV033594)) und der Ökomorphologie (BAFU 2008: Datenbank Ökomorphologie Stufe F) ergänzt wird. Dafür werden die verschiedenen Datentabellen mittels der „ObjectID“ zusammengefügt.

Durch diese Verlinkung konnten dem Gewässernetz wichtige Kriterien wie Flussordnungszahl und Gerinnebreite zugeordnet werden, welche für die Modellierung der Eintragsprozesse (Kap. 3.4) wichtig sind.

Für die Modellierung werden nur die Gewässernetz-Objektarten „Bach“, „Fluss“, „Bachachse“ sowie „Kanal“ berücksichtigt, da die restlichen für den Schwemmholtzeintrag in Fließgewässer keine Rolle spielen (u.a. Seeachsen, Druckstollen und unterirdische Bach- und Flussabschnitte). Im weiteren Verlauf dieses Detailberichts wird das prozessierte Gewässernetz als GWN bezeichnet.

#### 3.2.2.1 Transportfähigkeit des Gerinnes

Mächler (2009) geht in seiner Arbeit von einer Mindestgrösse des Einzugsgebietes von 1 km<sup>2</sup> aus, damit Schwemmholtz mit genügend Abfluss transportiert werden kann. Vergangene Hochwasser haben jedoch gezeigt, dass auch Bäche mit kleinerem Einzugsgebiet (Beispiel Erlenbach, SZ: 0.7 km<sup>2</sup>; Jochner et al., 2015) beachtliche Mengen an Schwemmholtz befördern können. Kuratli (2017) hat in seiner Masterarbeit deshalb eine deutlich kleinere Mindestgrösse des Einzugsgebietes für den Schwemmholtztransport von 0.1 km<sup>2</sup> angenommen. Demnach wurden Gewässerabschnitte mit einem Einzugsgebiet kleiner als 0.1 km<sup>2</sup> vom Gewässernetz abgezogen. Spätere Auswertungen haben jedoch

gezeigt, dass damit jedoch nur ein sehr kleiner Anteil des Fliessgewässernetzes abgezogen wird. In der vorliegenden Version des EGA wird deshalb auf dieses Kriterium verzichtet bzw. das Gewässernetz (GWN) nicht weiter eingegrenzt. Einerseits wird angenommen, dass das Gewässernetz im zugrundeliegenden Masstab von 1:25'000 bereits eine gewisse Abflusskapazität bzw. Einzugsgebietsgrösse verfügt. Andererseits hat das Verhältnis von Gerinnebreite zu Schwemmholzlänge mindestens einen ebenso grossen Einfluss auf die Transportfähigkeit von SH.

### 3.2.3 Waldfläche

Zur Abbildung der Schweizer Waldfläche wurde das Polygon-Feature „SILVA“ aus Silvaprotect-CH verwendet (Losey & Wehrli, 2013). SILVA besteht aus dem Datensatz „Vektor 25“, kombiniert mit den digitalisierten Vivian- und Lotharflächen. Aus den genannten Eingangsdaten wurden folgende Objekte verwendet:

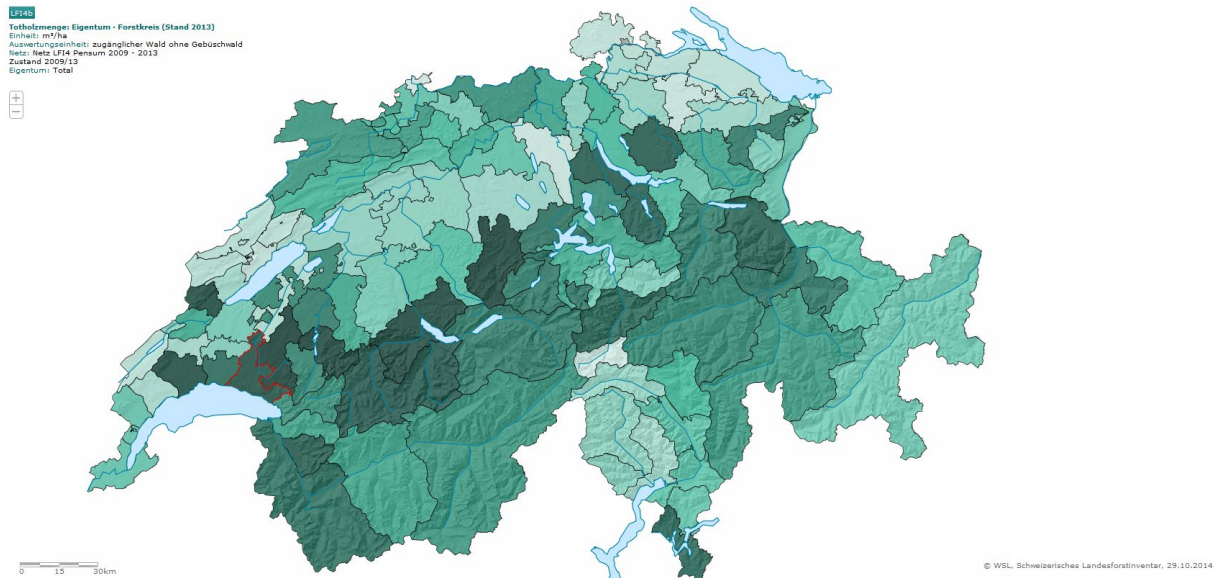
- Vector25 Primärflächen
  - Wald (geschlossen)
  - Wald offen
  - Geröll in Wald
  - Geröll in offenem Wald
  - Sumpf in Wald
  - Sumpf in offenem Wald
- Vivian90: Alle Flächen
- Lothar99: Alle Flächen

Obwohl für gewisse Prozesse (insbesondere Lawinenanrisse) auch die Gebüsche eine Schutzfunktion haben können, wurde das Objekt „Gebüsch“ aus dem Datensatz „Vector25 Primärflächen“ nicht verwendet, da es in sich nicht weiter differenzierbar ist.

### 3.2.4 Holzvorrat

Die Angaben zum Holzvorrat in Schweizer Wäldern, der als Grundlage für die Abschätzung des Schwemmholzpotenzials in den modellierten Eintragsflächen dient, stammen aus zwei verschiedenen Quellen des Schweizerischen Landesforstinventars.

Angaben zum Anteil des Totholzes am gesamten Holzvorrat im, welches auf dem Waldboden liegt, sowie die Schätzung der Anzahl aus den Eintragsflächen rekrutierter Baumstämme stammen aus der systematischen Stichprobeninventur (LFI3 und LFI4b; WSL, 2016), welche im Feld anhand einer festgelegten Probefläche aufgenommen wird. Der Totholzanteil wird dabei in m<sup>3</sup>/ha angegeben, und die Anzahl Baumstämme sind pro Hektar vermerkt. Diese zwei Zielgrössen sind auf der kleinstmöglichen Regionseinheit gemittelt, namentlich nach Forstkreisen (Abbildung 7).



**Abbildung 7: Totholzmenge im Wald gemäss LFI4, aufgeteilt nach Forstkreisen (Quelle: [www.lfi.ch](http://www.lfi.ch)).**

Die Angaben zum lebenden Holzvorrat (engl.: growing stock) basieren auf einem relativ neuen, Geodatenatz des LFI, welcher für die ganze Waldfläche der Schweiz in einer Auflösung von 25 x 25 m das Holzvolumen der lebenden Bäume und Sträucher in Kubikmeter pro Hektar ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) ausdrückt (Ginzler et al., 2019). Im Synthesebericht WoodFlow (BAFU, 2020) wird dieser Raster-Datenatz VHMV genannt, da der Vorrat (zweites V im Kürzel) massgeblich auf dem Vegetationshöhenmodell (VHM; Ginzler & Hobi, 2016) beruht. Dieses VHM basiert auf luftgestützten Stereobildern (ADS40/80), aus Sommeraufnahmen zwischen 2007 bis 2016. Von diesem Vegetationshöhenmodell wurden verschiedene erklärende Variablen für die statistische Modellierung des lebenden Holzvorrats abgeleitet, wie die mittlere Höhe, verschiedene Höhenperzentilen, Standardabweichung der Höhe über 3m, Dichte der Vegetationsschicht, Prozentsatz verschiedener Höhenklassen. Zusätzlich wurden die mittlere Sommertemperatur, die Höhenlage sowie der topographische Positionsindex als weitere erklärende Variablen einbezogen. Als Zielvariable dient der lebende Holzvorrat, wie er in den Erhebungen zum LFI3 bzw. LFI4 innerhalb der Stichprobenplots geschätzt wurde. Verschiedene Modellierungsansätze wurden getestet und validiert. Im Allgemeinen war die Leistung bzw. Güte zwischen linearen und nichtlinearen Modellen sehr ähnlich. Daher basierte die endgültige Implementierung auf dem linearen Regressionsansatz der kleinsten Quadrate, da dieser den einfachsten Ansatz zur Implementierung und Interpretation bietet, ohne die Vorhersagequalität zu beeinträchtigen. Schliesslich wurde die Modellierung durch Höhenunterschiede in die Klassen 0-1000m, 1000-1500m und über 1500m geschichtet und über die ganze Waldfläche der Schweiz extrapoliert (Abbildung 8).

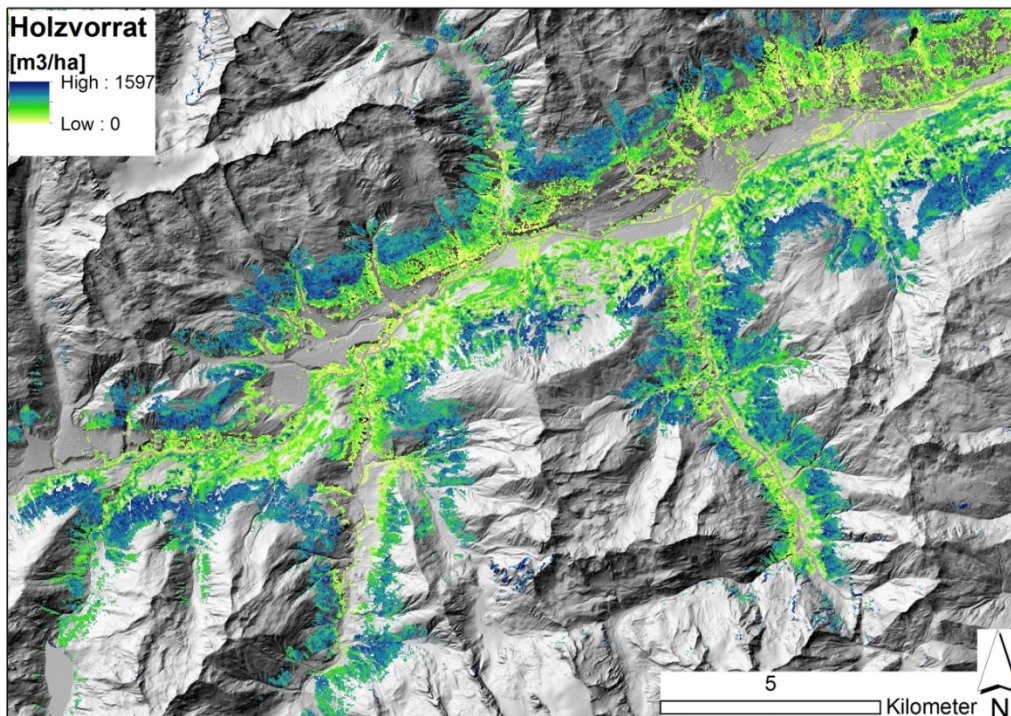


Abbildung 8: Auszug der Holzvorrat-Rasterkarte (VHMV) im Einzugsgebiet des Rheins bei Disentis/Mustér (GR). Hintergrund: digitales Oberflächenmodell (Relief), © swisstopo.

Die Datengrundlage für die Berechnung des Holzeintrages durch die Prozesse Murgang und Rutschung, stammt aus SilvaProtect-CH. Genauere Ausführungen dazu folgen im Kapitel 3.4.

### 3.3 Szenarien

Der empirische GIS Ansatz zur Abschätzung des Schwemmh Holzpotenzials rechnet für ein Einzugsgebiet jeweils drei verschiedene Szenarien, die sich nach der Eintretenswahrscheinlichkeit bzw. Wiederkehrperiode der involvierten Prozesse orientieren:

SH<sub>«30»</sub> | SH<sub>100</sub> | SH<sub>«300»</sub>

Die meisten der umfangreich dokumentierten Schwemmh Holzereignisse (Steeb et al., 2019) hatten bezüglich Niederschlag und/oder Abfluss eine Eintretenswahrscheinlichkeit von 50-150 Jahren, was hier durch das Szenario SH<sub>100</sub> beschrieben wird. Die anderen beiden Szenarien nennen die ungefähre Wiederkehrperiode in Anführungszeichen, da die dafür geschätzten SH-Frachten gutachterlich mit ad hoc Abminderungs- bzw. Einflussbreitenfaktoren bestimmt wurden, weil diese Faktoren aufgrund fehlender Daten nicht genauer quantifiziert werden konnten.

Beim EGA werden für die drei Szenarien jeweils unterschiedliche Pufferbreiten bezüglich der potentiell beitragenden Flächen sowie verschiedene Abminderungsfaktoren angenommen. Genauere Ausführungen dazu folgen im Kapitel 3.4.

## 3.4 Modellierung der Eintragsprozesse

Wie bereits in den Grundlagen erwähnt, wurde für die Implementierung des GIS-Modells der Fokus auf jene Eintragsprozesse gelegt, welche speziell während eines Unwetters bzw. Hochwasserereignis aktiv sind. Namentlich sind das Rutschungen, Murgänge, Seitenerosion sowie Gerinneholz-Mobilisierung. Folgend wird die Modellierung dieser vier Eintragsprozessen im Detail erklärt.

### 3.4.1 SilvaProtect-CH

Die Modellierung der Prozessflächen für Murgänge und Rutschungen beruht auf den für SilvaProtect-CH berechneten Trajektorien (SilvaProtect-CH © 2013 BAFU), welche basierend auf dem Relief und anhand diverser geologischer und geomorphologischer Kriterien ermittelt wurden und den Fließweg vom Anriss- bis zur Ablagerungspunkt abbilden (Losey & Wehrli, 2013).

Als Grundlagen für die Modellierung in SilvaProtect-CH wurde ein rasterbasiertes Geländemodell der gesamten Schweiz mit 10 Metern Auflösung aus den Vektor- und Rasterdaten des digitalen Höhenmodells DHM25 verwendet. Aus diesem Geländemodell wurden verschiedene Hilfsgrößen berechnet, welche für die Prozessmodellierungen von Murgängen und Rutschungen benötigt wurden, namentlich Hangneigung, Exposition sowie ein Topo-Index für die Ausscheidung der Anrisse. Des Weiteren wurde der Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES Blatt 2.4, extreme Punktregen 24h, 100J.) benutzt, um die als Input benötigt Niederschlagsintensität in Form von 3 Klassen schweizweit flächendeckend abzubilden. Letztlich wurde auch die digitale geotechnische Karte der Schweiz (SGTK, 1:200'000, Version 1/2000) verwendet, um die lithologischen Einheiten bezüglich ihrer Verwitterbarkeit und Stabilität (innere Reibung) zu klassieren.

Da einzelne Grundlagendaten (insbesondere die Geologie) eine grossmassstäbige Wiedergabe der natürlichen Verhältnissen liefern, empfehlen Losey & Wehrli (2013) die Daten nur bis auf Stufe Gefahrenhinweis zu verwenden.

### 3.4.2 Murgang

Über das gesamte Gebiet der Schweiz wurden 6.7 Mio. Murgang-Trajektorien gerechnet. Die Murgang-Trajektorien bilden in ihrer Gesamtheit den möglichen Prozessraum Murgang ab. Dabei wurden ausschliesslich Murgänge im Gerinne (inkl. Ablagerungsflächen auf dem Kegel) modelliert. Murgänge im Hang (beispielsweise in alpinen Schutthalden) wurden als Hangmuren bzw. Rutschungen ausgeschieden und sind als Rutschungs-Trajektorien abgelegt (Kap. 3.4.3). Andere geschiefbeführende Prozesse im Gerinne (Geschiebetransport, Erosion, Übersarung) wurden nicht ausgeschieden und sind im Prozessraum Murgang nicht enthalten.

Die Simulation von Murgangprozessen in SilvaProtect-CH wurde mit dem Modellpaket MGSIM (Zimmermann et al., 1997) durchgeführt. Die kritische Neigung für die Murgang-Initiierung wurde nach Zimmermann et al. (1997) in Abhängigkeit vom Einzugsgebiet definiert; je kleiner das Einzugsgebiet über einem Gerinneabschnitt ist, desto steiler muss der Gerinneabschnitt sein, damit Murgänge auftreten können. Die Auslaufstrecke der Murgänge wurde mit einem 2-Parameter-Massenpunktmodell auf der Basis des Voellmy-Lawinenmodells geschätzt (Perla et al., 1980; Rickenmann, 1990; Gamma, 2000; Rickenmann, 2005). Das Modell berechnet für gegebene Gerinneneigung und Reibungsparameter die Geschwindigkeit eines Murganges entlang des

Fließweges, bis die Geschwindigkeit auf null sinkt. Durch die Verwendung eines Random Walk-Ansatzes und mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen werden Trajektorien generiert, die die Ausbreitung von Murgängen auf dem Schwemmkegel nachbilden (Gamma, 2000; Wichmann and Becht, 2003).

Die Anzahl der Trajektorien kann je nach Grösse des untersuchten Einzugsgebiets mehrere 10'000 Objekte beinhalten. Um sich auf die SH-relevanten Murgänge zu konzentrieren, werden im Modell nur diejenigen Trajektorien berücksichtigt, welche eine Waldfläche sowie auch das Gewässernetz schneiden. So fallen Murgang-Ereignisse weg, welche entweder kein Holz befördern und/oder kein Gewässer erreichen.

Um aus den Linien-Objekten Prozessflächen zu generieren, wird eine Pufferbreite bestimmt, welche den Einflussbereich eines Murganges berücksichtigen soll. Für das Projekt SilvaProtect wurden die Murgang-Trajektorien mit 10 m gepuffert (Losey & Wehrli, 2013). Für die im EGA definierten Szenarien sind folgende Pufferbreiten definiert:

$$SH_{\langle 30 \rangle} = 5 \text{ m}; SH_{100} = 10 \text{ m}; SH_{\langle 300 \rangle} = 15 \text{ m}$$

In einem letzten Schritt werden die gepufferten Murgangflächen mit dem Wald verschnitten, um die potentiellen SH-Eintragsflächen durch Murgänge einzugrenzen.

### 3.4.3 Rutschung

Die Modellierung der Rutschungs-Prozessflächen basiert auf den Trajektorien „Hangmure/Rutschung“ von SilvaProtect-CH (© 2013 BAFU), wobei ausschliesslich flachgründige Bodenrutschungen (soil slips / spontane Rutschungen) und Hangmuren modelliert wurden.

Die Modellierung der Anrissgebiete in SilvaProtect-CH erfolgte mit Hilfe der Stabilitätsberechnungsmethode Infinite-Slope-Analysis, wobei die Hangstabilität für jede Rasterzelle berechnet wird. Mit dem Infinite Slope Model wird ein Sicherheitsfaktor (FS) berechnet, der auf einer Grenzgleichgewichtsanalyse basiert und das Gleichgewicht zwischen der Scherspannung, die den Bruch entlang der vermeintlichen Versagensebene induziert, und der Scherfestigkeit, die dem Scherbruch entgegenwirkt, bestimmt (Lee und Park, 2016; Selby, 1993). Die benötigten Parameter werden flächendeckend aus den vorliegenden digitalen Geologiedaten abgeleitet und ins Modell eingegeben. Die massgebenden Parameter sind die Hangneigung, welche aus dem digitalen Höhenmodell berechnet wird, der Untergrundwasserstand und die Scherparameter (Kohäsion und Reibungswinkel) des geologischen Untergrundes, die aus der geotechnischen Karte der Schweiz abgeleitet werden (Liener und Kienholz, 1998; Tobler et al., 2013a, 2013b).

Über das gesamte Gebiet der Schweiz wurden demnach 47.6 Mio. Rutschungs-Trajektorien in SilvaProtect-CH gerechnet. Die Modellierung der Hangmuren ergibt generell ein sehr pessimistisches Bild bei ungünstigen Voraussetzungen, da unter anderem die stabilisierende Waldwirkung nicht berücksichtigt wurde. Effektive Rutschungen und Hangmuren-Ereignisse betreffen nur einen geringen Flächenanteil der modellierten Prozessfläche. Zudem können die Auslaufzonen bei Hangmuren und insbesondere bei spontanen Lockermaterialrutschungen oft kürzer sein als die in SilvaProtect-CH

modellierten Trajektorien. Gemäss Losey & Wehrli (2013) genügen die Daten deshalb lediglich einer generalisierten Gefahrenhinweisstufe.

Angewendet auf den empirischen GIS-Ansatz, kann die Anzahl der Trajektorien je nach Grösse des untersuchten Einzugsgebiets mehrere 100'000 Objekte bzw. Rutschungs-Trajektorien beinhalten (d.h. signifikant mehr im Vergleich zu den Murgang-Trajektorien). Im EGA wird die grosse Zahl an Rutschungs-Trajektorien reduziert, indem nur jene für die weitere Modellierung berücksichtigt werden, welche einerseits eine Waldfläche und andererseits aber auch das Gewässernetz schneiden. Weiter wird ein maximaler Abstand von 50 m des Startpunktes zum Gewässernetz als Bedingung für eine relevante Trajektorie festgelegt. Damit werden nur jene Rutschungen für den Schwemholzbeitrag als relevant betrachtet, welche nicht weiter als 50 m vom Fließgewässer beginnen. Eine solche Eingrenzung senkrecht zur Uferlinie wurde auch in der Schwemholzstudie Sihl (Flussbau AG, 2009) gemacht, in welcher die Rutschflächen ebenfalls auf eine maximale Ausdehnung reduziert werden. Plausibilisiert wurde die maximale Distanz von 50 m zum Gerinne durch Studien von Raetzo & Rickli (2007) sowie Benda & Bigelow (2014), welche aufzeigen, dass ein Grossteil der Rutschungen Auslaufstrecken von  $\leq 50$  m haben. Die so reduzierten Trajektorien werden mit 5 m ( $SH_{\llcorner 30}$ ), 10 m ( $SH_{100}$ ) und 15 m ( $SH_{\llcorner 300}$ ) gepuffert, um damit die Einflussbreite der Rutschungsprozesse zu definieren. Die Abschätzung dieser Breiten basiert auf den Hangmure-Trajektorien von SilvaProtect, welche einheitlich mit 10 m gepuffert wurden (Losey & Wehrli, 2013). Bestätigt wird die Wahl der Pufferbreite durch die empirisch dokumentierten Rutschungsbreiten in der Schweizer Rutschungsdatenbank (Rickli et al., 2016).

In einem letzten Schritt werden die gepufferten Rutschungsflächen mit dem Wald verschnitten, um die potentiellen SH-Eintragsflächen durch Rutschungen weiter einzugrenzen.

#### 3.4.4 Gerinneholz

Laut Steeb et al. (2017) kann Totholz im Gerinne einen nicht zu vernachlässigbaren Anteil am gesamten Schwemholzvorkommen bei Hochwasser ausmachen. Für die Ermittlung des Gerinneholzpotenzials wurden empirische Werte abgeleitet, ausgedrückt in  $m^3/ha$  Gerinnefläche (standardisierte Einheit).

In einem ersten Schritt wurde die Gerinnebreite des verwendeten Gewässernetzes GWN definiert. Als Grundlage für die Bestimmung der Gerinnebreite diente die mittlere Sohlenbreite des Datensatzes Ökomorphologie Stufe F (Zeh Weissmann et al., 2009). Diese war jedoch nur für etwa ein Drittel des gesamten Schweizer Gewässernetzes erfasst worden. Bezüglich GWN ist die Gerinnebreite für 42% (ca. 25'300 km) der Fließgewässer bekannt. Die unbekannte Gerinnebreite der restlichen rund 35'000 Laufkilometer Fließgewässer (GWN) wurde anhand der vorhandenen Werte extrapoliert.

Dazu wurden die bekannten Sohlenbreiten in mehrere Klassen nach unterschiedlichen Flussordnungszahlen (FLOZ 1-9) und 4 Höhenlagen (Angabe in m ü.M.) unterteilt. Der nach der Gerinnelänge gewichtete Mittelwert der verschiedenen Klassen wird als Sohlenbreite für die restlichen Gewässerabschnitte mit der entsprechenden FLOZ und Höhenklasse übernommen (Tabelle 1). Allgemein nimmt mit steigender FLOZ-Nummer die Anzahl Flusskilometer rasch ab. Zudem sind über 80% der dokumentierten Gerinnebreiten unterhalb von 1200 m ü.M. zu finden (Tabelle 2). Da Fließgewässer mit hoher FLOZ ab einer gewissen Höhe fehlen, wurden für diese Klassen keine Werte ermittelt.

**Tabelle 1: Extrapolierte Werte für die Definition der Gewässerbreite anhand der Flussordnungszahl (gemäss Strahler, 1957) sowie Höhenlage (m ü.M.). Datengrundlage: Ökomorphologie Stufe F (Zeh Weissmann et al., 2009).**

Gerinnebreite [m]					
Höhenlage	< 600	600-1200	1200-1800	>1800	Mittelwert
FLOZ 1	1.2	1.3	2.3	5.1	2.5
FLOZ 2	1.8	2.1	3.9	8.2	4.0
FLOZ 3	3.2	4.2	7.3	11.0	6.4
FLOZ 4	5.1	9.3	15.9	17.2	11.9
FLOZ 5	13.1	17.3	22.6	17.2	17.6
FLOZ 6	17.4	27.3	24.2	-	23.0
FLOZ 7	29.4	42.0	-	-	35.7
FLOZ 8	70.9	-	-	-	70.9
FLOZ 9	82.7	-	-	-	82.7
Mittelwert	25.0	14.8	12.7	11.8	

**Tabelle 2: Kumulierte Fliessstrecke entsprechend der Sohlenbreiten-Klassen in Tabelle 1.**

Länge GWN [km]						
Höhenlage	< 600	600-1200	1200-1800	>1800	Summe	Anteil
FLOZ 1	2'641	3'973	1'163	431	8'207	32%
FLOZ 2	2'100	2'493	872	278	5'744	23%
FLOZ 3	1'811	1'575	590	259	4'235	17%
FLOZ 4	1'229	1'107	578	168	3'082	12%
FLOZ 5	694	901	301	14	1'910	8%
FLOZ 6	563	404	20	-	988	4%
FLOZ 7	500	80	-	-	580	2%
FLOZ 8	341	-	-	-	341	1%
FLOZ 9	247	-	-	-	247	1%
Summe	10126.7	10532.4	3524.6	1150.2	<b>25'334</b>	
Anteil	40%	42%	14%	5%		

Anhand der Gerinnebreite wurden in einem nächsten Schritt typische Totholzvolumen definiert. Die empirisch abgeleiteten Werte für den Totholzvorrat im Gerinne werden in m<sup>3</sup>/ha Gerinnefläche (standardisierte Einheit) ausgedrückt. Dafür wurden Felddaten aus europäischen Fliessgewässern ausgewertet (Datensatz aus Ruiz-Villanueva et al., 2016), inklusive Referenzwerte aus bewaldeten Schweizer Wildbächen (Rickli et al., 2018; Rickli & Bucher, 2006). Anhand dieser Grundlage wurden schliesslich für drei verschiedene Gerinnebreitenklassen (<5 m; 5-10 m; >10 m) Mittelwerte definiert und dem gesamten Gewässernetz (GWN) zugeordnet (Abbildung 9).

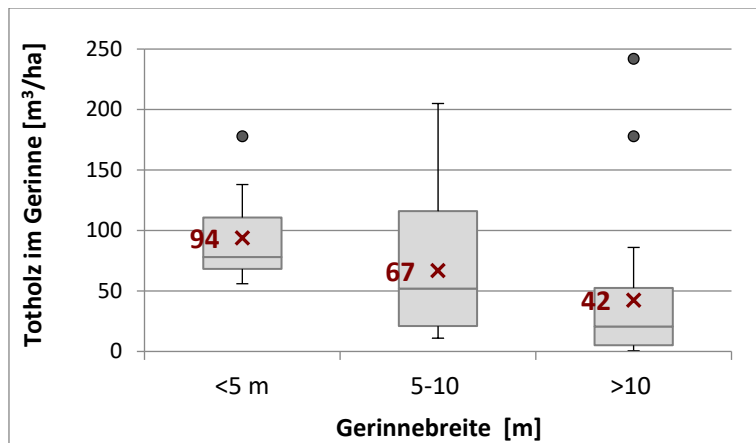


Abbildung 9: Boxplot des Gerinneholzpotenzials, eingeteilt in drei Gerinnebreitenklassen (x = Mittelwert). Abgeleitet aus Ruiz-Villanueva et al. (2016) und Rickli & Bucher (2006).

Weitere Methoden zur Abschätzung des Gerinneholzpotenzials wurden im Rahmen einer Masterarbeit ebenfalls getestet (Kuratli, 2017). Beispielsweise mit einem pauschalen Schwemmholzvorrat von 80 m<sup>3</sup> pro Kilometer Gerinnelänge (gemäss Waldner et al., 2009) oder mit einer Abschätzungsgleichung nach Gurnell (2013). In Kuratli (2017) wurde das Gerinneholzpotenzial allerdings nur für jene Gewässernetzabschnitte berechnet, welche weniger als 25 Meter von Waldgebiet entfernt sind. Diese Länge kann als mittlere Baumhöhe angenommen werden (bestätigt durch die Analyse des Vegetationshöhenmodells der Schweiz gemäss Ginzler & Hobi (2016), was zur Folge hat, dass der Baum beim Umfallen im Einflussbereich des Gewässers zu liegen kommt (Rimböck, 2001). In der finalen Version des EGA wurde dieser Fokus nur auf bewaldetes Gerinne wieder verworfen, da Schwemmholz nach einem Hochwasser auch in unbewaldeten Abschnitten abgelagert werden kann und dies im Modell auch berücksichtigt werden soll.

### 3.4.5 Ufererosion

In der Praxis hat es sich bisher bewährt, Erosionsbreiten als ein Vielfaches der bestehenden Gerinnebreite zu definieren. So wurden zum Beispiel während des Hochwassers von 2005 in Gebirgsflüssen, in denen die Abflussspitze eine Wiederkehrdauer von mehr als 100 Jahren aufwies, Erosionsbreiten von bis zu viermal der Gerinnebreite beobachtet (Bachmann Walker, 2012; Hunzinger & Durrer, 2009).

Für den EGA wurden die potentiellen Seitenerosionsflächen entsprechend mit einer Pufferbreite abhängig von der Gerinnebreite modelliert. Basierend auf den Studien von Hunzinger & Durrer (2009) und Bachmann Walker (2012) zum Hochwasser 2005 wurden folgende Verhältnisse zwischen maximaler Rückgriffweite der Seitenerosion und Gerinnebreite für die unterschiedlichen Szenarien festgelegt:

$$SH_{\langle 30 \rangle} = 1.5; SH_{100} = 3; SH_{\langle 300 \rangle} = 4.5$$

Da Seitenerosion auf beiden Seiten eines Gewässers möglich ist, wird das Gerinne beidseitig mit der Rückgriffweite gepuffert. Es werden nur die bewaldeten Seitenerosionsflächen als potentielle SH-Eintragsflächen definiert.

### 3.4.6 Technische Bemerkungen

Das Zusammenführen der gepufferten Murgang- und Hangmure-Trajektorien brachte enorm lange Rechenzeiten und teilweise sogar Abbrüche der Software mit sich. Dieses Problem wurde im GIS-Modell dadurch gelöst, indem die Polygone in ein Raster umgewandelt und danach wieder als Shapefile abgespeichert werden.

Die einzeln ausgeschiedenen Prozessflächen überschneiden sich teilweise (siehe auch Kapitel 3.4.7). Deshalb wurde eine Prioritätenreihenfolge bestimmt, damit solche Überschneidungsflächen nicht mehrfach gezählt werden. Diese wurde nach folgendem Grundsatz definiert: Je näher am Gerinne, umso grösser die Mobilisierungsmöglichkeit aufgrund der hydraulischen Exponierung, ergo grössere Priorität. Folglich entstand diese Prioritätenreihenfolge der Eintragsflächen:

**Gerinne > Murgang > Seitenerosion > Rutschung**

Somit werden also zum Beispiel Überschneidungsflächen von Murgängen und Seitenerosion der Prozessfläche Murgang zugeteilt. Der Abzug der Überschneidungsflächen reduziert das Schwemholzpotenzial deutlich. Ohne Mehrfachzählung dieser Flächen wird das Holzvolumen um ca. 20 – 50 % reduziert, was aufzeigt, dass gemäss Modell eine beachtliche Fläche von mehreren Eintragsprozessen betroffen ist. Es ist jedoch anzumerken, dass für die Berechnung des gesamten Schwemholzpotenzials die Reihenfolge bzw. Priorisierung der Eintragsflächen keine Rolle spielt.

### 3.4.7 Kombinierte Eintragsfläche

Neben der Differenzierung der Waldverlustflächen nach Eintragsprozessen (Murgang, Seitenerosion, Rutschung oder Gerinneholzmobilisierung), bestimmt der EGA auch explizit die kombinierten Eintragsflächen. Dies entspricht den Waldflächen, die im EGA sowohl von Murgang, Seitenerosion als auch von Rutschungen betroffen sind (Abbildung 10).

Diese kombinierte potentielle Eintragsfläche weist ein minimal zu erwartendes Schwemholzpotenzial auf bzw. definiert die Potenzialflächen mit der grössten Mobilisierungswahrscheinlichkeit. Um aus Sicht von Forst- bzw. Gewässerunterhalt das Schwemholzaufkommen zu reduzieren, besteht bei diesen Flächen somit der grösste Handlungsbedarf.

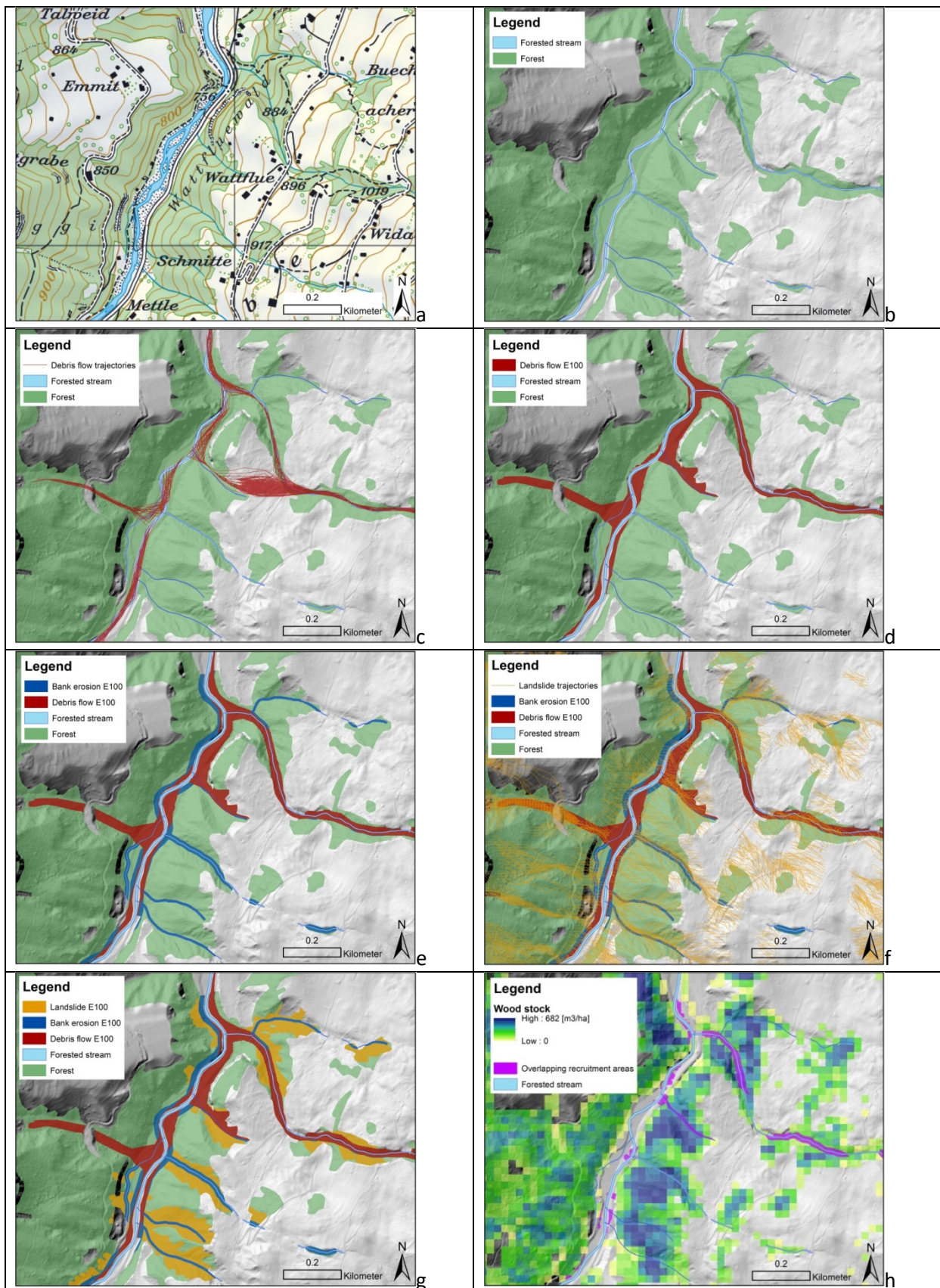


Abbildung 10: Visualisierung der Eintragsmodellierung mittels EGA für das Szenario SH<sub>100</sub>. Ausschnitt im Einzugsgebiet der Chiene, Kanton Bern. a) topografische Karte als Überblick; b) Gewässernetz (GWN) mit Gerinnebreite abgeleitet von ökomorphologischen Daten; c) Murgang-Trajektorien (rote Linien); d) potentielle Eintragsfläche durch Murgang (gepufferte Murgang-Trajektorien im Wald); e) potentielle Eintragsfläche durch Seitenerosion (dunkelblau); f) Rutschungs-Trajektorien (orange Linien); g) potentielle Eintragsfläche durch Rutschung (gepufferte Rutschungs-Trajektorien im Wald, orange); h) kombinierte Eintragsfläche (violett; Überschneidung von Murgang-, Seitenerosion- und Rutschungsflächen) mit Holzvorrat-Rasterkarte (VHMV) im Hintergrund.

### 3.5 Abminderungsfaktoren

Bei einem Unwetter ist es unwahrscheinlich, dass das gesamte potentielle Schwemmholumen in das Gewässer eingetragen und transportiert wird. Inaktive Prozessflächen, variable Intensität der Eintragsprozesse oder unterschiedlicher Widerstand durch die Vegetation sind Gründe für eine Abnahme vom potentiellen zum effektiven Schwemmholumen. Diese Reduktion wird durch einen Abminderungsfaktor beschrieben, welcher die geschätzte Schwemmholumenfracht als Anteil des SH-Potenzials angibt. Dabei kann der Abminderungsfaktor von verschiedenen Gegebenheiten abhängig sein, wie beispielsweise von der Art des Eintragsprozesses, dem Niederschlagsereignis, der Vegetation oder der Geomorphologie (Hunziker, 2017; Ruiz-Villanueva et al., 2014).

Die Abminderungsfaktoren für den EGA wurden auf drei verschiedene Arten eruiert:

- **Literaturvergleich:** Kuratli (2017) hat unterschiedliche Abminderungsfaktoren aus verschiedenen Berichten und Arbeiten miteinander verglichen. Diese dienen als Orientierungsgrundlage bzw. erste Grösseneinordnung der Abminderungsfaktoren.
- **Vergleich der Eintragsflächen:** Durch das Verhältnis der modellierten potentiellen Eintragsflächen mit den dokumentierten Eintragsflächen (z.B.: aus Ereignisanalysen, digitalisierten und georeferenzierten StorMe-Einträgen, Fotos, (GIS-)Karten, etc.) innerhalb eines bestimmten Untersuchungsperimeters bzw. von Gewässerabschnitten, lassen sich Abminderungsfaktoren ableiten. Für die Definition der Abminderungsfaktoren durch Seitenerosion wurden beispielsweise dokumentierte Erosionsflächen (mit Angaben zu Breite und Länge) von Hunzinger & Durrer (2009) sowie Bachmann Walker (2012) verwendet. Für die Definition der Abminderungsfaktoren durch Rutschungen wurden die potentiellen Eintragsflächen mit den Angaben aus der Rutschungsdatenbank von Rickli et al. (2016) verglichen.
- **Vergleich der Schwemmholumen:** Analog zum Vergleich der Eintragsflächen wurde auch das Volumen des SH-Potenzials in einem bestimmten Einzugsgebiet mit den dokumentierten SH-Frachten verglichen, um durch dieses Verhältnis die Bandbreite möglicher Abminderungsfaktoren abzuschätzen. Dieser Vergleich konnte für alle 34 Testeinzugsgebiete gemacht werden (Kapitel 3.6).

Das gut dokumentierte August 2005 Hochwasser war auch für die Einschätzung anderer Abminderungsfaktoren eine massgebende Referenzquelle.

- **Gerinneholzmobilisierung:** In Waldner et al. (2009) und Steeb et al. (2017) wurde die Mobilisierungsrate des im Gerinne liegenden Totholzes abgeschätzt. Diese Werte schwanken zwischen 5-50% und geben eine gute Einordnung der entsprechenden Abminderungsfaktoren.
- **Murgangaktivität:** In Rickenmann et al. (2008) wird beschrieben, dass rund 10-20% der untersuchten Wildbäche beim Hochwasser 2005 aktiv waren. Diese Werte geben eine gute Einordnung der entsprechenden Abminderungsfaktoren.

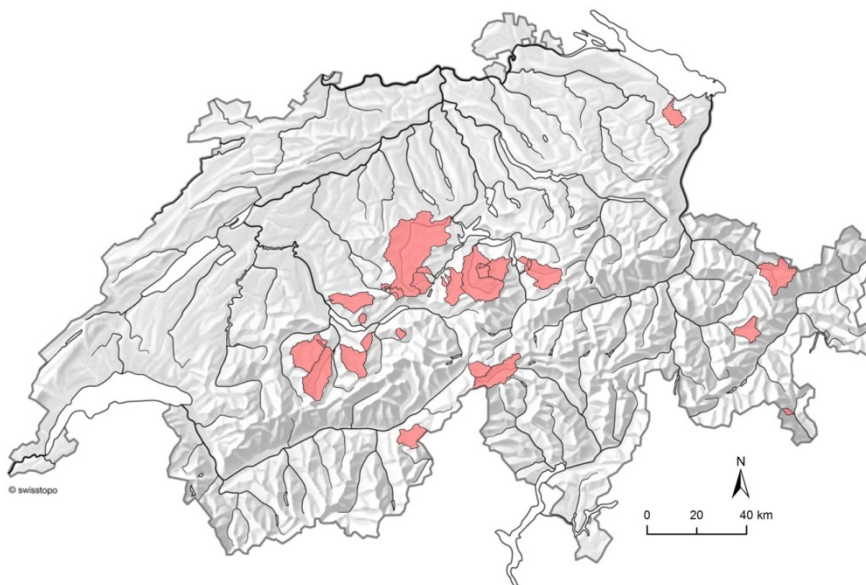
Die Abminderungsfaktoren basieren also im Wesentlichen auf einem Vergleich des Schwemmholzpotenzials und effektiv mobilisierten SH-Frachten und sind somit empirisch bestimmt.

**Tabelle 3: Übersicht der EGA-Abminderungsfaktoren unterteilt nach Eintragsprozess und Szenario.**

Scenario	Gerinneholz	Murgang	Seitenerosion	Rutschung
<b>SH<sub>30</sub></b>	0.1	0.05	0.05	0.01
<b>SH<sub>100</sub></b>	0.3	0.1	0.1	0.05
<b>SH<sub>300</sub></b>	0.7	0.3	0.2	0.1

### 3.6 Testeinzugsgebiete

Für die Kalibrierung und Validierung des GIS-Modells EGA wurden insgesamt 34 Einzugsgebiete verwendet, in welchen bei vergangenen Hochwasserereignissen beträchtliche Mengen an Schwemmholz aufgetreten und gut dokumentiert sind (Abbildung 11). Ein Grossteil stammt aus Ereignisanalysen des Hochwassers 2005, in denen die Schwemmholzfrachten in den einzelnen Einzugsgebieten detailliert untersucht wurden. Kapitel 7.2 enthält eine Übersichtstabelle der 34 Testeinzugsgebiete und deren Charakteristika (basierend auf der Schwemmholzdatenbank von Steeb et al., 2019).



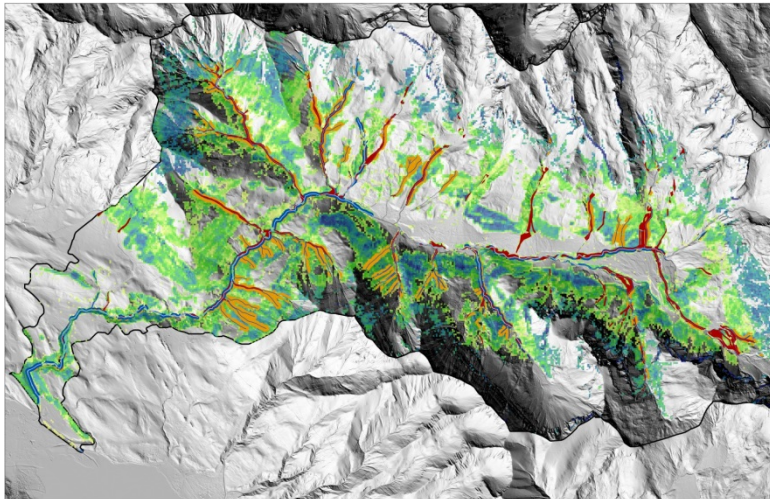
**Abbildung 11: Übersicht der verwendeten Testeinzugsgebiete.**

## 4 Resultate

Als Fallbeispiel in diesem Kapitel dient das Einzugsgebiet der Grossen Melchaa (Kanton Obwalden, 73 km<sup>2</sup>, 22% Waldfläche, Höhenlage 480-2686 m ü.M.). Weitere Resultate anderer Einzugsgebiete sind im Anhang in Kapitel 7.1 zu finden.

### 4.1 Schwemmholzpotenzial

Nach Anwendung des EGA (siehe Manual für detaillierte Anwendung; Download auf [www.woodflow.ch](http://www.woodflow.ch)) resultieren die potentiellen Eintragsflächen im Untersuchungsgebiet in Form von räumlichen Geodaten (Abbildung 12). Die generierten Raster und Shapefiles können nun in ArcMap geladen und visualisiert werden. Sie helfen, die potentiellen Eintragsflächen von Schwemmholz räumlich explizit zu identifizieren. So können z.B. besonders gefährdete Teileinzugsgebiete identifiziert werden, in denen Handlungsbedarf besteht (z.B. für forstliche oder wasserbauliche Massnahmen).



**Abbildung 12: Potentielle Eintragsflächen im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa (OW), mit Holzvorrats-Rasterkarte und Topographie im Hintergrund.**

Des Weiteren kann mithilfe einer Excel-Vorlage je Eintragsprozess bzw. Szenario die potentielle bewaldete Eintragsfläche (in Hektaren) sowie die potentielle Schwemmholzmenge (in m<sup>3</sup> Festmetern) explizit quantifiziert werden. Das gesamte Schwemmholzpotenzial ( $V_{pot}$ ) sowie das kombinierte, d.h. sich überlappende Schwemmholzpotenzial ( $V_{kombi}$ ) wird ebenfalls zusammengefasst. Zusätzlich wird die Anzahl rekrutierter Bäume geschätzt und differenziert zwischen dem Anteil an Frisch- bzw. Totholz (Tabelle 4).

**Tabelle 4: Output des GIS-Modells am Beispiel des Einzugsgebiets der Grossen Melchaa (OW). Je Eintragsprozess bzw. Szenario werden die potenzielle bewaldete Eintragsfläche und die potenzielle Schwemmh Holzmenge in Festmetern quantifiziert. Zusätzlich wird das gesamte Schwemmh Holzpotenzial ( $V_{pot}$ ) sowie das kombinierte, d. h. sich überlappende Schwemmh Holzpotenzial ( $V_{kombi}$ ) zusammengefasst.**

	SH <sub>«30»</sub>		SH <sub>100</sub>		SH <sub>«300»</sub>	
	Potenzielle Eintragsfläche [ha]	Potenzielle Schwemmh Holzmenge [m <sup>3</sup> ]	Potenzielle Eintragsfläche [ha]	Potenzielle Schwemmh Holzmenge [m <sup>3</sup> ]	Potenzielle Eintragsfläche [ha]	Potenzielle Schwemmh Holzmenge [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

Für das Beispiel der Grossen Melchaa veranschaulicht (Tabelle 4) ist der Anteil der Rutschungsflächen im EGA GIS-Modell am grössten. Das Übergewicht an Rutschungen beim SH-Potenzial ist bei den meisten der untersuchten Einzugsgebiete feststellbar. Tendenziell wird der Schwemmh Holzbeitrag durch Rutschungen überschätzt. Diese werden in SilvaProtect-CH ohne Einfluss der Vegetation bzw. ohne Waldwirkung modelliert, weshalb es eher zu einer pessimistischen Schätzung bzw. hohen Anzahl Trajektorien kommt.

Der geschätzte Totholzanteil (Gerinneholz plus Totholz in der Waldfläche) am gesamten Schwemmh Holzpotenzial liegt bei den 34 Testeinzugsgebieten zwischen 6-19 % (Mittelwert = 10.5; Median = 10.0). Dieser Wertebereich wird durch andere Studien und Ereignisanalysen bestätigt. Daraus lässt sich schliessen, dass Totholz im Allgemeinen nur einen kleinen Anteil der anfallenden Schwemmh Holzmenge ausmacht. Vielmehr ist es frisch eingetragenes Holz, das den Hauptteil der Schwemmh Holzfracht ausmacht.

Die ökologischen Vorteile von Totholz, sowohl auf dem Waldboden wie auch im Gerinne selbst, führen demnach kaum zu einem vergrösserten Risiko aus Naturgefahrnsicht. Aus Management-Perspektive spricht demnach nichts gegen Revitalisierungsprojekte. Auch die Waldböden müssen nicht komplett aufgeräumt sein und dürfen gerne liegendes oder stehendes Totholz enthalten.

## 4.2 Schwemmh Holzfracht

Wie in Kap. 3.5 beschrieben, kann durch die Anwendung der Abminderungsfaktoren (d.h. Multiplikation derselben mit dem SH-Potenzial) die Schwemmh Holzfracht abgeschätzt werden. Wie am Beispiel der Grossen Melchaa ersichtlich ist (Abbildung 13), verändert sich dadurch der Anteil der einzelnen Eintragsprozesse. Im Allgemeinen sinkt dabei der Anteil an Rutschungen (dessen SH-Potenzial eher überschätzt wird) zugunsten der anderen Eintragsprozesse. Je nach Einzugsgebiet können demnach verschiedene Eintragsprozesse die Schwemmh Holzfracht dominieren.

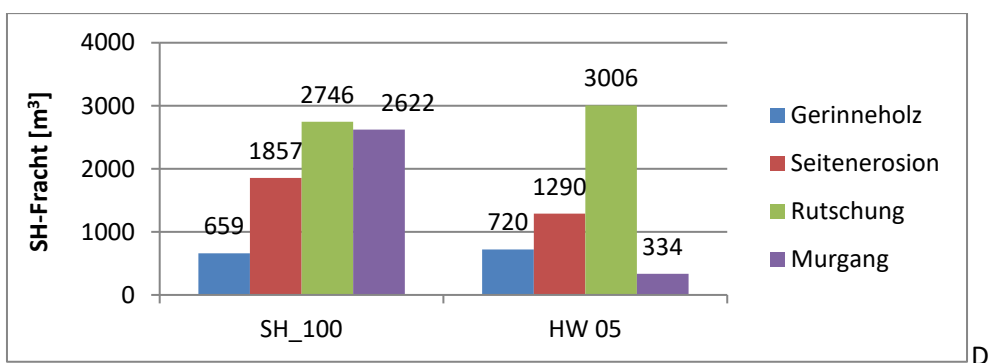
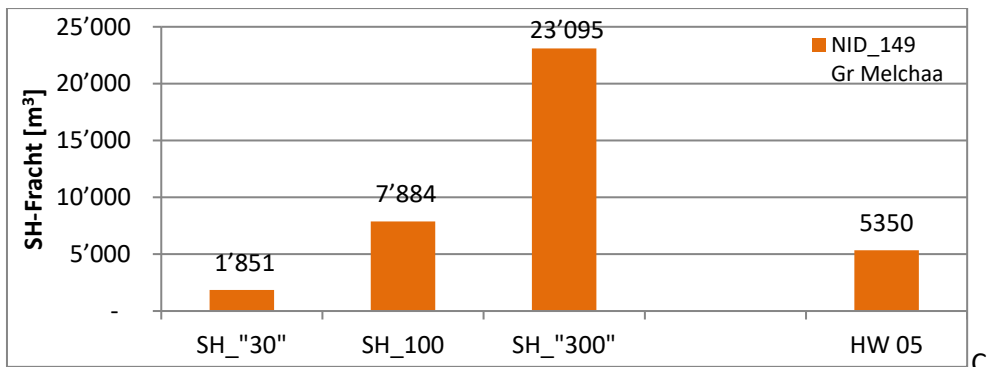
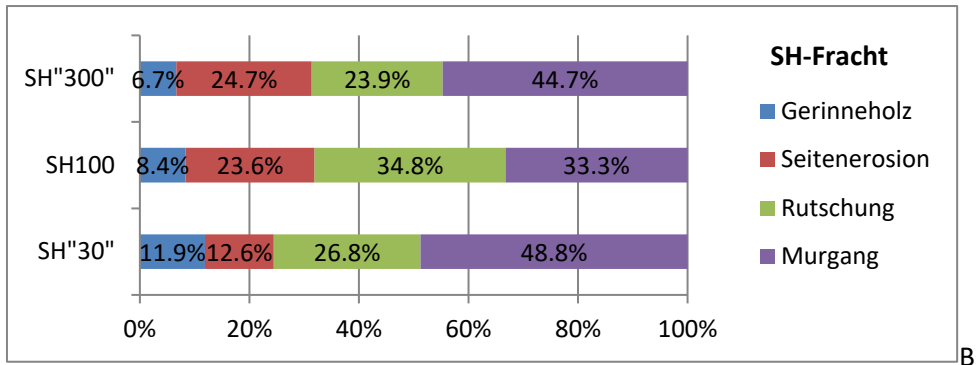
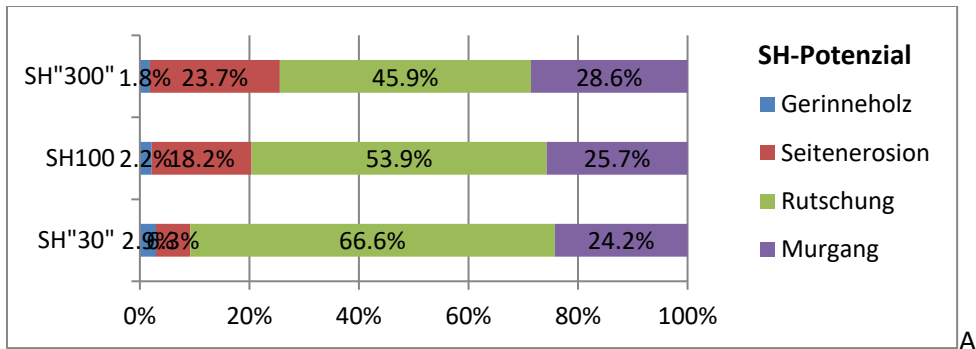


Abbildung 13: Übersicht der EGA Modellresultate am repräsentativen Beispiel der Grossen Melchaa. A) Anteil der einzelnen Eintragsprozesse am SH-Potenzial je Szenario. B) Anteil der einzelnen Eintragsprozesse an der SH-Fracht je Szenario. C) Absolute Werte der gesamten geschätzten SH-Fracht [m<sup>3</sup> Festmeter] je Szenario im Vergleich zur dokumentierten Schwemmholzmengende des August 2005 Hochwassers. D) Absolute Werte der geschätzten SH-Fracht, unterteilt nach Eintragsprozessen im Vergleich zur dokumentierten Schwemmholzmengende des August 2005 Hochwassers, ebenfalls unterteilt nach rekonstruierten Eintragsprozessen.

Neben dem Fallbeispiel Grosse Melchaa sind in Abbildung 14 auch die Resultate für die anderen Testeinzugsgebiete visualisiert. Im Vergleich zur Jährlichkeit des Ereignisses führen die mithilfe des GIS Modells und der gewählten Abminderungsfaktoren berechneten Schwemmh Holzfrachten tendenziell eher zu einer Überschätzung der Holzmenge (vgl. Abbildung 14B). Dies ist bewusst so gewählt bzw. kalibriert und entspricht aus Sicht der Gefahrenprävention einer konservativen Schätzung.

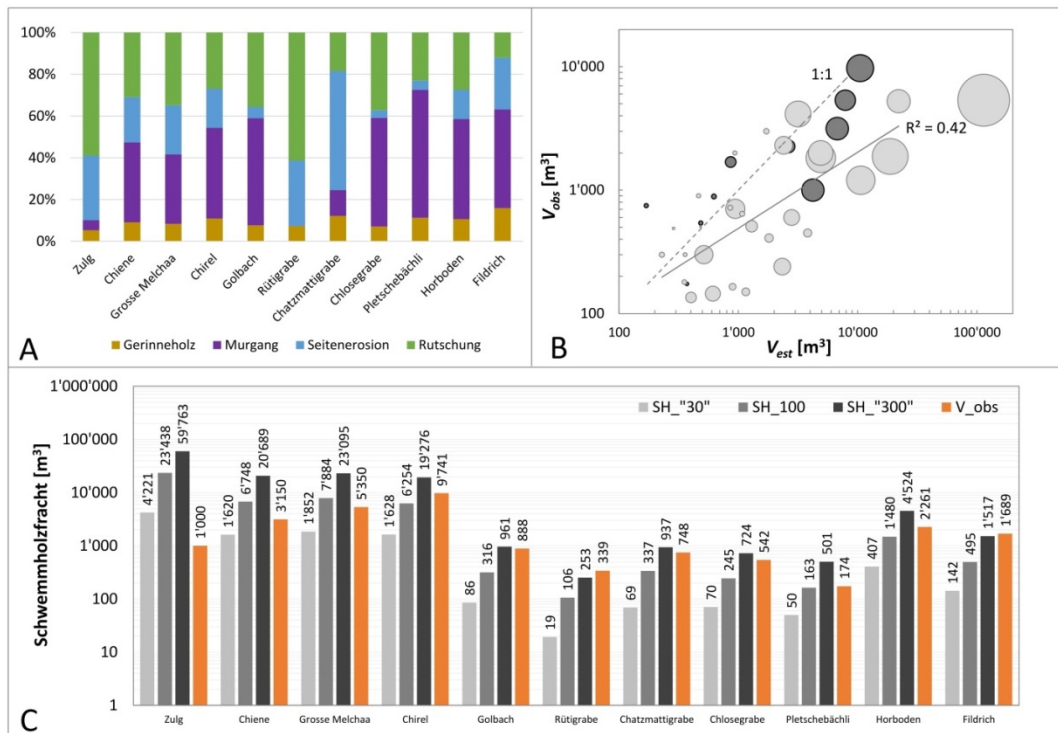


Abbildung 14: Resultate des empirischen GIS Ansatzes: (A) Prozentsatz der Schwemmh Holzfracht je Eintragsprozess (Gerinneholz, Murgang, Seitenerosion und Rutschung) für verschiedene Einzugsgebiete; (B) Geschätzte Schwemmh Holzfracht und Vergleich mit den für das Hochwasser 2005 (bzw. 2012 für die Zulg) dokumentierten Schwemmh Holzfrachten. Die Grösse der Kugeln zeigt die Grösse des Einzugsgebiets. Die dunkel eingefärbten Datenpunkte sind in (A) und (C) weiter aufgeschlüsselt und entsprechen den Fallbeispielen, die auch mit dem Fuzzy-Logic GIS Ansatz (FGA) gerechnet wurden. Die hellgrauen Kreise beziehen sich auf Berechnungen für die restlichen der 34 Testeinzugsgebiete, die nur mit dem EGA durchgeführt wurden; (C) Schwemmh Holzfracht für die drei Szenarien SH<sub>30</sub>, SH<sub>100</sub>, SH<sub>300</sub>, und die verschiedenen Untersuchungsgebiete.

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 Schwemmh Holzpotenzials, das bei einem Ereignis gemäss GIS-Ansatz mobilisiert wird.

## 5 Diskussion

Folgendes Kapitel ordnet die Resultate des EGA ein, gibt Auskunft über die Vorhersagegüte und vergleicht die EGA-Resultate mit anderen Abschätzverfahren von Schwemmholz.

### 5.1 Anpassungsgüte / Skaleneffekte

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 EZG (>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 Abbildung 15). Hier ist während eines Unwetters aber meist nur ein Teil des Gebiets betroffen und entsprechend geomorphologisch aktiv. In diesem Fall sind die in Tabelle 3 aufgeführten Abminderungsfaktoren tendenziell zu gross, sodass die Schwemmholzfracht tendenziell überschätzt wird ( $V_{est} > V_{obs}$ ; Abbildung 16A&C). Aus Sicht der Gefahrenprävention ist eine solche konservative Überschätzung durchaus gewollt, damit z.B. Schutzmassnahmen wie Rückhaltestrukturen nicht zu klein dimensioniert werden.

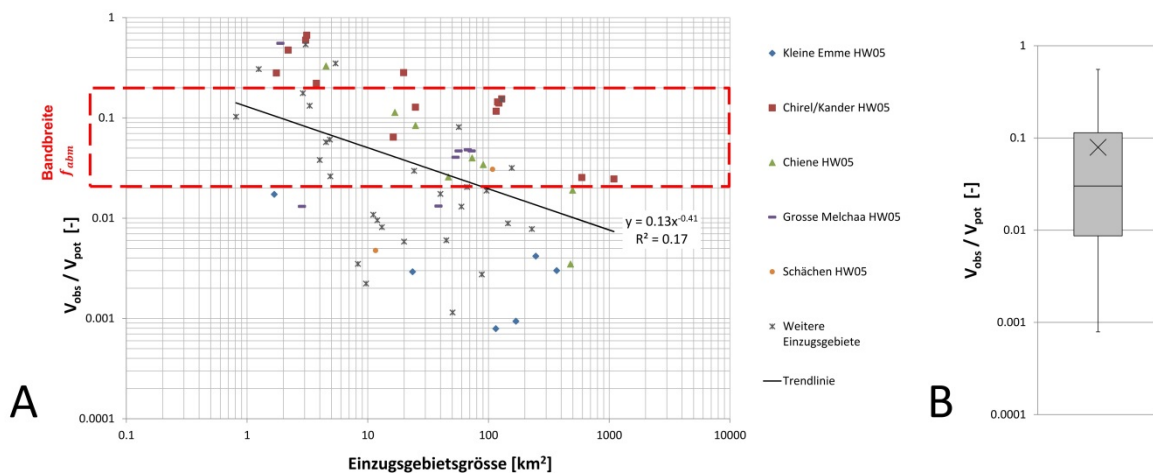


Abbildung 15: Anwendung des empirischen GIS Modells auf insgesamt 34 Testgebiete. Für gewisse Testgebiete konnten auch Daten bezogen auf Teileinzugsgebietsflächen verwendet werden (Ereignisanalyse Hochwasser 2005). (A) Es zeigt sich die Tendenz, dass das Verhältnis von beobachteter zu potentieller Schwemmholzfracht,  $V_{obs}/V_{pot}$ , mit zunehmender Einzugsgebietsgrösse im Durchschnitt abnimmt. (B) Ein Boxplot illustriert die Verteilung der Werte  $V_{obs}/V_{pot}$  für alle Testgebiete (x = Mittelwert).

Vergleicht man die Schwemmholzfracht aus kombinierten Eintragsflächen ( $V_{kombi}$ ) mit den beobachteten Schwemmholzmengen, sieht man, dass die erwähnte Überschätzung geringer ausfällt (Abbildung 16B&D). D.h. die Schätzungen von  $V_{kombi}$  sind generell kleiner als die von  $V_{est}$ . Entsprechend gibt es auch mehr Beispiele, bei denen  $V_{obs}$  allein durch die kombinierte Eintragsfläche unterschätzt wird. Ebenfalls nimmt das Verhältnis von  $V_{kombi}/V_{obs}$  tendenziell mit steigender Einzugsgebietsgrösse

zu. Von den untersuchten Testgebieten weicht das Verhältnis von  $V_{kombi}/V_{obs}$  bzw.  $V_{est}/V_{obs}$  maximal eine Größenordnung von eins ab. Bei  $V_{kombi}$  ist die Streuung jedoch leicht grösser als bei  $V_{est}$  (vgl. Abbildung 16C&D). Im Hinblick auf die vielen möglichen Unsicherheitsquellen in der Berechnung der Schwemmholzmenge (vgl. Kapitel 5.2), sind die Schätzungen jedoch recht gut. Ähnliche Unsicherheiten sind auch in der Abschätzung von Sedimenttransport zu erwarten (Rickenmann, 2014).

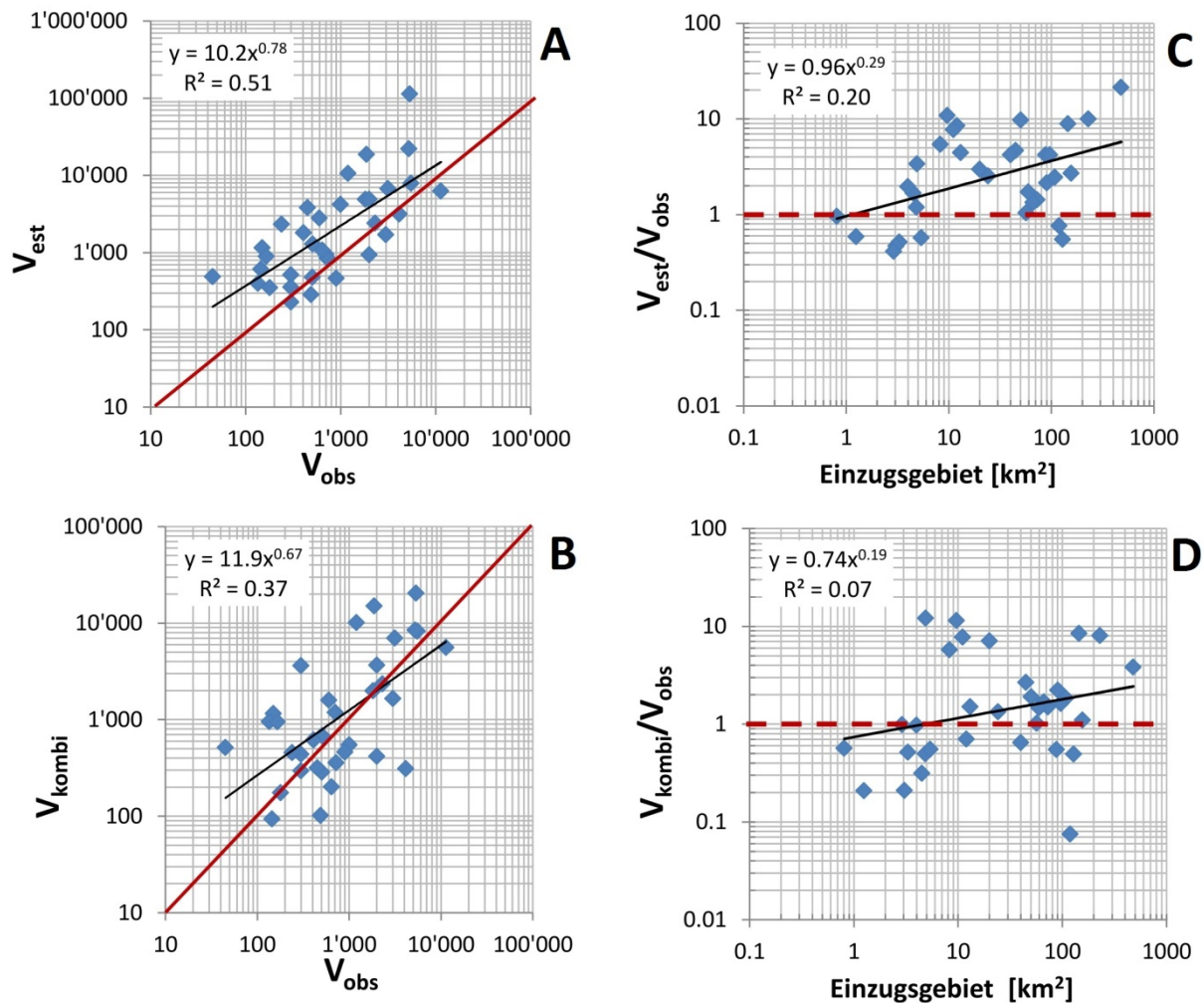


Abbildung 16: Vergleich der modellierten ( $V_{est}$ ) mit der beobachteten Schwemmholzmenge ( $V_{obs}$ ) für (A) die gesamte Schwemmholzfracht sowie für (B) die kombinierten Eintragsflächen. (C) und (D) zeigen das Verhältnis von  $V_{est}/V_{obs}$  gegenüber der Einzugsgebietsgröße. Die Wahl des verwendeten EGA-Szenario je Datenpunkt ist angelehnt an die Jährlichkeit des entsprechenden Hochwassers wie sie in den Ereignisanalysen angegeben wurde.

Abbildung 17 stellt ebenfalls die modellierte Schwemmholzfracht ( $V_{est}$ ) der beobachteten Schwemmholzfracht ( $V_{obs}$ ) gegenüber. Im Vergleich zu Abbildung 16 wurde jedoch nicht das nächst liegende Szenario gemäss Ereignisanalyse von  $V_{obs}$  verwendet, sondern  $V_{obs}$  gegenüber allen drei möglichen EGA-Szenarien (SH<sub>«30»</sub> | SH<sub>100</sub> | SH<sub>«300»</sub>) geplottet. Am nächsten zur 1:1-Linie liegen die modellierten Werte von Szenario SH<sub>«30»</sub>, wobei auch einige Schwemmholzfrachten unterschätzt werden. Beim Szenario SH<sub>«300»</sub> gibt es hingegen kaum noch Unterschätzung von  $V_{obs}$ , jedoch auch extreme Überschätzung von bis zu zwei Größenordnungen. Entsprechend zeigt Szenario SH<sub>100</sub> die

besten Resultate als Kompromiss zwischen Über- und Unterschätzung. Dies liegt unter anderem auch daran, dass die meisten dokumentierten Ereignisse eine HQ-Jährlichkeit von 50-150 Jahren haben.

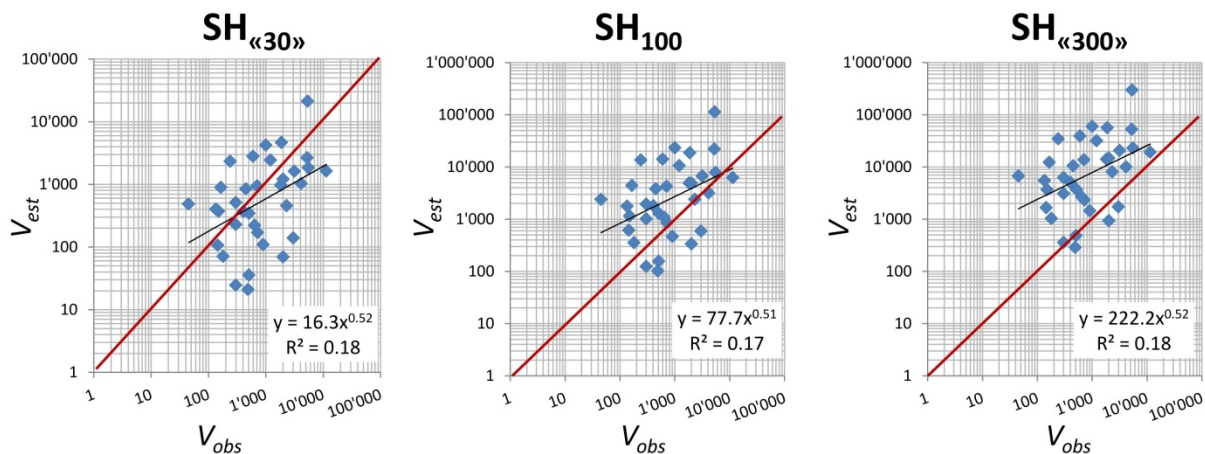


Abbildung 17: Vergleich der modellierten Schwemmholzfracht ( $V_{est}$ ) je Szenario mit der beobachteten Schwemmholzfracht ( $V_{obs}$ ).

## 5.2 Unsicherheiten

Die Modellierung von Eintragsprozessen und die Abschätzung von Schwemmholzpotenzial und -fracht sind mit vielen Unsicherheiten verbunden. Der EGA erlaubt 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 manchmal 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 Hochwasser vom August 2005 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, muss die fehlende Waldfläche vor der Modellierung hinzugefügt werden.
- **Eintragsprozesse:** Schwemmholztransport trifft oft am Ende einer langen Prozesskette auf. 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 die Gesamtmenge an Schwemmh Holz relevant.

- **Holzvorrat:** Mit Holzvorratskarte VHMV steht eine räumlich explizite Methode zur Bestimmung des Holzvorrats in Einzugsgebieten zur Verfügung. Auch hier sind jedoch Unsicherheiten in der Quantifizierung zu erwarten. VHMV ist eine schweizweite Rasterkarte, welche jeweils einen Holzvorratswert pro 25 x 25 m Pixel definiert. Das 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 die Holzvorratskarte 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 empirische Erfahrungswerte aus früheren Ereignissen (Abminderungsfaktoren je Szenario) nutzt, wurden im Forschungsprojekt WoodFlow auch noch andere Ansätze entwickelt. Der Fuzzy-Logic GIS-Ansatz (Kap. 1.3 des Syntheseberichts) verwendet Entscheidungsmatrizen, um die potentiellen Eintragsflächen weiter einzugrenzen, welche am ehesten zur SH-Fracht beitragen. *Slide/BankforMAP* (Kap. 1.4 des Syntheseberichts) wiederum verwendet für die Umrechnung von  $V_{pot}$  zu  $V_{est}$  die probabilistisch berechneten Rutschungs- und Ufererosionswahrscheinlichkeiten. Keiner der drei Ansätze (EGA, FGA, *Slide/BankforMAP*) weist im Vergleich zu den beobachteten SH-Frachten  $V_{obs}$  klar die besten Prognosen auf. Vielmehr sollten die Ansätze komplementär angewendet werden, um die Bandbreite möglicher SH-Frachten besser eingrenzen zu können.
- **Szenarien:** Um den oben aufgelisteten Unsicherheiten gerecht zu werden, berechnen die Modelle unterschiedliche Szenarien. Auf diese Weise lässt sich die Bandbreite der möglichen Schwemmh Holzfrachten aufzeigen. Dazu ist anzumerken, dass v.a. das Szenario SH<sub>100</sub> mit empirischen Daten abgestützt ist (vgl. Kapitel 3.3). 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 Schwemmh Holzfrachten ausschlaggebend. Auch die Dauer des Hochwassers ist von grosser Bedeutung (Steeb et al., 2019).

### 5.3 Vergleich mit empirischen Schätzformeln

Auf die anderen im WoodFlow-Projekt vorgestellten Ansätze zur Abschätzung der Schwemmh Holzfracht (*BankforMAP/SlideforMAP*, Fuzzy Logic GIS-Ansatz, empirische Schätzformeln) und den Vergleich untereinander wird im Synthesebericht eingegangen (Fallstudie am Beispiel des Chirel, Kap. 1.7 des Syntheseberichts). Hier wird ein detaillierter Vergleich zwischen dem EGA und den ebenfalls an der WSL entwickelten empirischen Schätzformeln (vgl. Kap. 1.5 des Syntheseberichts) bzw. deren Einflussfaktoren gemacht.

Abbildung 18 zeigt das Verhältnis  $V_{obs}/V_{pot}$  gegenüber der Jährlichkeit der beobachteten Ereignisse. Daraus lässt sich ablesen, dass ein umso grösserer Anteil des SH-Potenzials mobilisiert wird, je extremer das Ereignis ist.

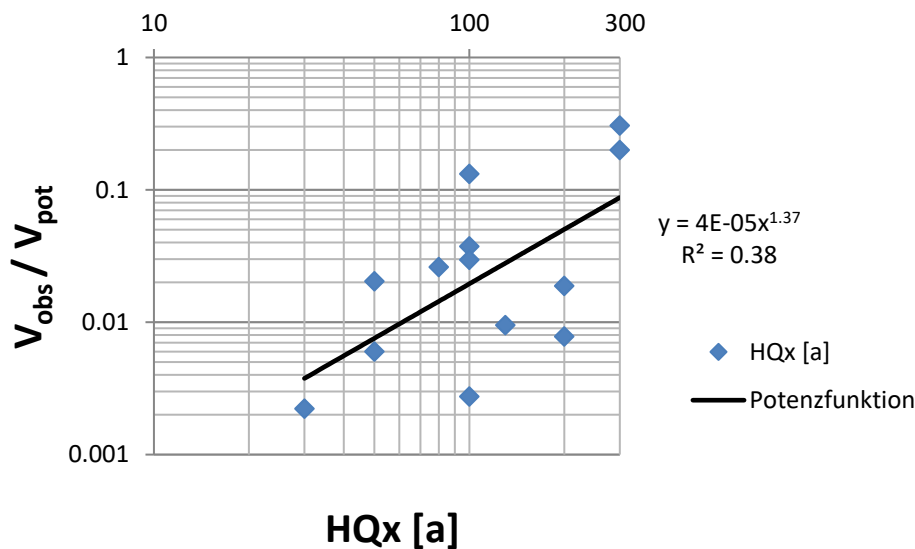


Abbildung 18: Verhältnis der beobachteten Schwemmholzfracht ( $V_{obs}$ ) zum SH-Potenzial ( $V_{pot}$ ) gegenüber der Jährlichkeit HQx der beobachteten Ereignisse.

Abbildung 19 stellt die beobachteten Schwemmholzfrachten ( $V_{obs}$ ) den geschätzten Schwemmholzfrachten gemäss EGA ( $V_{est}$ ) bzw. den geschätzten Schwemmholzfrachten mittels empirischer Schätzformel ( $V_{reg}$  hier beispielhaft anhand Gl. (1.4) des Syntheseberichts mit der Einzugsgebietsgrösse als Kontrollvariable) gegenüber. So kann man feststellen, dass EGA die Holzmenge wie bereits beschrieben tendenziell überschätzt (Abbildung 19B), während die empirische Schätzformel die Holzmenge eher unterschätzt (Abbildung 19A) – insbesondere bei Schwemmholzfrachten  $V_{obs} \geq 500 \text{ m}^3$  (Steeb et al., 2019). Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei den anderen empirischen Schätzformeln in Kapitel 1.5 des Syntheseberichts.

Für eine erste grobe Abschätzung der Schwemmholzfracht bieten die empirischen Schätzformeln also ein schnelleres Vorgehen. Ist man jedoch auch interessiert an der räumlichen Verteilung potentieller Eintragsflächen, so eignet sich die Anwendung des EGA.

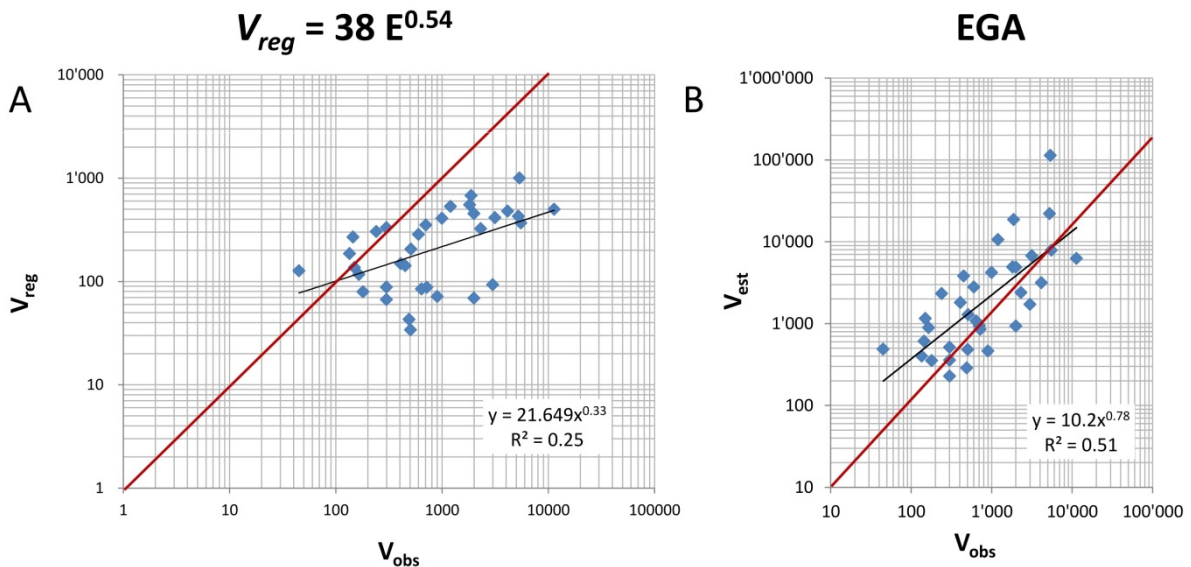


Abbildung 19: Vergleich der beobachteten Schwemmholzfracht  $V_{obs}$  gegenüber (A) der modellierten Schwemmholzfracht  $V_{reg}$  gemäss empirischer Schätzformel nach Einzugsgebietsgrösse und (B) der modellierten Schwemmholzfracht  $V_{est}$  gemäss EGA.

Es wurde auch evaluiert, inwiefern ein von der Einzugsgebietsgrösse abhängiger Abminderungsfaktor die Schätzung der Schwemmholzfracht beeinflusst. Dieser skalenabhängige Abminderungsfaktor wurde aus der Regression der Datenpunkte in Abbildung 15 abgeleitet:

$$y \approx 0.13 * x^{-0.41}$$

bzw.

$$f' \approx 0.13 * EZG^{-0.41}$$

Abbildung 20A zeigt die geschätzte Schwemmholzfracht berechnet mithilfe des skalenabhängigen Abminderungsfaktors (wobei  $V_{est'} = V_{pot} * f' = V_{pot} * 0.13 * EZG^{-0.41}$ ) im Vergleich zur empirischen Schätzformel gemäss Einzugsgebietsgrösse. Es zeigt sich wiederum, dass  $V_{est'}$  mit EGA klar höher ausfällt als  $V_{reg}$  mit der empirischen Formel. Dies zeigt sich auch bei allen anderen empirischen Schätzformeln gemäss Kap. 1.5 des Syntheseberichtes. Vergleicht man  $V_{est'}$  mit  $V_{obs}$ , so sieht man wiederum eine klare Überschätzung der beobachteten Schwemmholzfracht. Die Streuung von  $V_{est'}$  ist noch grösser als bei den geschätzten Schwemmholzfrachten gemäss EGA ( $V_{est}$ ), entsprechend ist auch das Bestimmtheitsmass kleiner ( $R^2 = 0.11$ ). Die Anwendung eines skalenabhängigen Abminderungsfaktors ist demnach nicht sehr geeignet; bessere Ergebnisse werden mit den prozess- und szenarioabhängigen Abminderungsfaktoren gemäss Tabelle 3 erreicht.

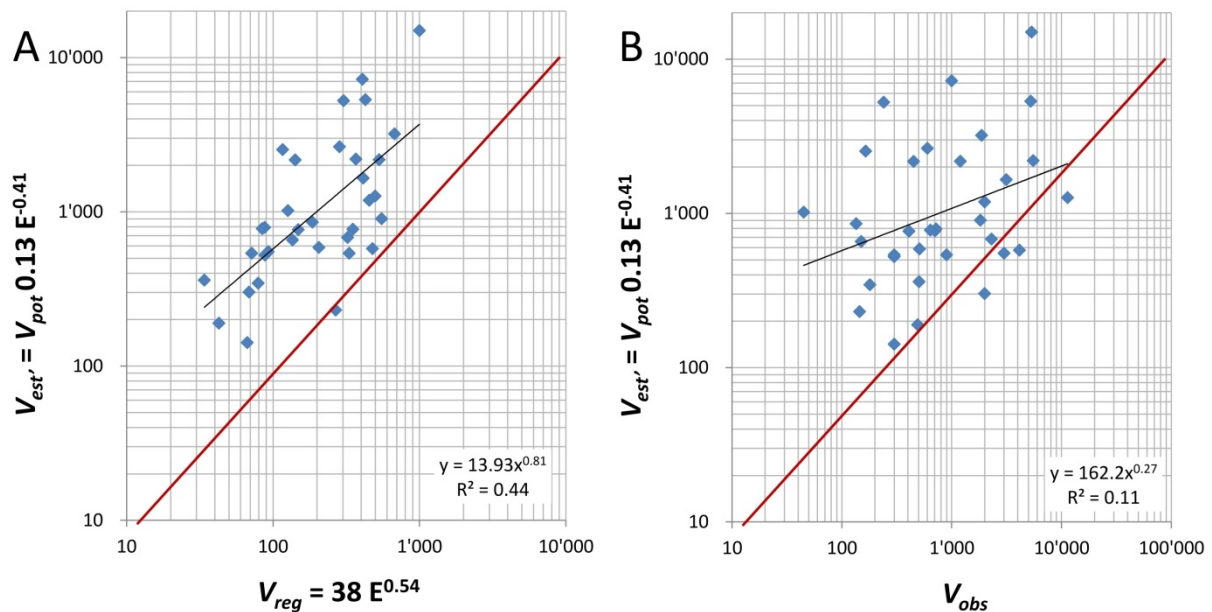


Abbildung 20: Vergleich der geschätzten Schwemmholtfrachten mit empirischer Schätzformel nach Einzugsgebietsgrösse dem mit EGA modellierten SH-Potenzial, dessen Schwemmholtfracht mit dem obengenannten skalenabhängigen (Abminderungsfaktor berechnet wurde).

## 5.4 Vor- und Nachteile des EGA

EGA erlaubt eine schnelle und räumlich explizite Identifizierung von potentiellen Eintragsflächen und SH-Mengen. Dabei sind die geschätzten SH-Frachten konservativ gehalten, d.h. sie tendieren eher zu einer Überschätzung als Unterschätzung der SH-Menge. Am besten eignet sich EGA für die Anwendung auf Wildbäche und Gebirgsflüsse mit Einzugsgebietsgrössen von 5-200 km<sup>2</sup>. Das GIS Modell liefert Grundlagen für den Unterhalt und für Dimensionierung von Wasserbauten (z.B. SH-Rechen) oder hilft durch die Identifizierung von Gefahrenherden bei der Planung von forstlichen Eingriffen. Ein weiterer Vorteil des EGA ist die Verwendung von schweizweit einheitlichen Daten, was einen regionalen Vergleich des Schwemmholtpotenzials zulässt. Die Methode ist flexibel in seiner Anwendung und könnte relativ einfach an unterschiedliche Inputdaten angepasst werden (beispielsweise für die Schwemmholtmodellierung in anderen Gebieten als der Schweiz).

Schwemmholttransport findet am Ende einer langen Prozesskette statt, demnach ist die Abschätzung von Schwemmholtmengen mit diversen Unsicherheiten verbunden. In Kapitel 5.2 sind die potentiellen Fehlerquellen und Unsicherheiten beschrieben. Gutachterliche Beurteilungen und/oder Feldbegehungen sind hilfreich, um die schwemmholtrelevanten Teileinzugsgebiete weiter eingrenzen zu können. Typische Fragen in diesem Zusammenhang sind: Ist die Konnektivität des Fließgewässers gegeben bzw. gibt es Rückhaltstrukturen (Rechen, Geschiebebecken oder Seen als Schwemmholt-speicher)? Welche Gebiete sind geomorphologisch besonders aktiv? Für aktivere Teileinzugsgebiete wie z. B. Wildbäche empfiehlt sich für eine genauere Beurteilung der möglichen Schwemmholtfracht 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.

Auf der Internetseite [www.woodflow.ch](http://www.woodflow.ch) sind das EGA Modell sowie dessen Manual und die benötigten Inputdaten zur Verfügung gestellt.

## 5.5 Ausblick

Der hier vorgestellte empirische GIS-Ansatz zur Abschätzung von Schwemmh Holzpotenzial und -fracht in Einzugsgebieten sowie die anderen im Rahmen des Forschungsprojekts WoodFlow entwickelten Werkzeuge entsprechen dem heutigen Stand des Wissens und müssen nun auf ihre Tauglichkeit in der Praxis geprüft werden.

Weiterentwicklungspotenzial hinsichtlich des EGA besteht aus heutiger Sicht in zwei Bereichen. Erstens kann mit einer kontinuierlich erweiterten Datengrundlage zu Hochwasserereignissen mit Schwemmholzaufkommen die Kalibrierung und Validierung des EGA weiter vorangetrieben werden. So können beispielsweise die Abminderungsfaktoren zur Umrechnung von Schwemmh Holzpotenzial auf Schwemmh Holzfracht weiter verfeinert oder regionalisiert werden.

Zweitens, beinhaltet die räumliche Modellierung und Identifizierung von Eintragsprozessen wohl eine der grössten Unsicherheiten in der Quantifizierung von Schwemmh Holz mengen. Indem die Grundlagenforschung das Prozessverständnis und die Quantifizierung von Rutschungen, Murgängen und des Geschiebetransportes inklusive Seitenerosion weiter vorantreibt, kann analog dazu auch die räumliche Modellierung dieser Prozesse verbessert werden, was schliesslich auch zu einer genaueren Abschätzung von Schwemmh Holz führen wird. Die Grundstruktur des EGA ist deshalb bewusst modular aufgebaut, damit man die Modellierung einzelner Eintragsprozesse flexibel anpassen oder ersetzen kann. So ist auch eine Anwendung des Modells ausserhalb der Schweiz denkbar, sofern eine geeignete Datengrundlage vorhanden ist.

## 6 Literatur

- Agee, J.K., Huff, M.H., 1987. Fuel succession in a western hemlock/Douglas-fir forest. *Can. J. For. Res.* 17 (7), 697–704.
- Bachmann Walker, A., 2012. Ausmass und Auftreten von Seitenerosionen bei Hochwasser. Auswertung von hydraulisch verursachten Seitenerosionen und Herleitung von empirischen Zusammenhängen zur Ermittlung des Erosionsausmasses und -auftreten. Geographisches Institut der Universität Bern.
- BAFU, 2020. Schwemmholz in Fließgewässern. Ein praxisorientiertes Forschungsprojekt. Bern.
- BAFU, 2015. Hochwasser und Murgang. Faktenblätter Gefahrenprozesse.
- Benda, L., Bigelow, P., 2014. On the patterns and processes of wood in northern California streams. *Geomorphology* 209, 79–97. doi:10.1016/j.geomorph.2013.11.028
- Benda, L.E., Miller, D., Martin, D., Bilby, R.E., Veldhuisen, C., Dunne, T., 2003. Wood recruitment processes and wood budgeting, in: Gregory, S., Boyer, K., Gurnell, A. (Eds.), *The Ecology and Management of Wood in World Rivers*. American Fisheries Society Symposium 37. Bethesda, Maryland, pp. 49–74.
- FlussbauAG, 2009. Schwemmholzstudie Sihl. Zürich.
- Gamma, P., 2000. dfwalk – Ein Murgangsimulationprogramm zur Gefahrenzonierung. *Geographica Bernensia*, G66. Geographisches Institut der Universität Bern, 144 p. [in German].
- Ginzler, C., Hobi, M.L., 2016. Das aktuelle Vegetationshöhenmodell der Schweiz: spezifische Anwendungen im Waldbereich. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwes.* 167, 128–135. doi:10.3188/szf.2016.0128
- Ginzler, C., Price, B., Bösch, R., Fischer, C., Hobi, M.L., Psomas, A., Rehush, N., Wang, Z., Waser, L.T., 2019. Area-Wide Products, in: Fischer, C., Traub, B. (Eds.), *Swiss National Forest Inventory – Methods and Models of the Fourth Assessment*. Springer International Publishing, Cham, pp. 125–142. doi:10.1007/978-3-030-19293-8\_7
- Gurnell, A.M., 2013. Wood in Fluvial Systems, in: *Treatise on Geomorphology*. Elsevier, pp. 163–188. doi:10.1016/B978-0-12-374739-6.00236-0
- Gurnell, A.M., Piégay, H., Swanson, F.J., Gregory, S. V., 2002. Large wood and fluvial processes. *Freshw. Biol.* 47, 601–619. doi:10.1046/j.1365-2427.2002.00916.x
- Hunziker, G., 2017. Schwemmholz Zulg. Untersuchungen zum Schwemmholzaufkommen in der Zulg und deren Seitenbächen. Steffisburg.
- Hunzinger, L., Durrer, S., 2009. Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Seitenerosion. Projektbericht vom 31.05.2009 für das Bundesamt (in German; unpublished report). für Umwelt BAFU, Bern. Bern, Schweiz.
- Jochner, M., Turowski, J.M., Badoux, A., Stoffel, M., Rickli, C., 2015. The role of log jams and exceptional flood events in mobilizing coarse particulate organic matter in a steep headwater stream. *Earth Surf. Dyn.* 3, 311–320. doi:10.5194/esurf-3-311-2015
- Kasprak, A., Magilligan, F.J., Nislow, K.H., Snyder, N.P., 2012. A LIDAR-derived evaluation of watershed-scale large woody debris sources and recruitment mechanisms: Coastal Maine, USA. *River Res. Appl.* 28, 1462–1476. doi:10.1002/rra.1532

- Kramer, N., Wohl, E., 2016. Rules of the road: A qualitative and quantitative synthesis of large wood transport through drainage networks. *Geomorphology* 279, 74–97. doi:10.1016/j.geomorph.2016.08.026
- Kuratli, B., 2017. Eine GIS-basierte Schätzung des potentiellen Schwemmhölzeintrages in alpine Fließgewässer und Vergleich mit effektiv transportierten Schwemmhölzfrachten. Universität Zürich.
- Lange, D., Bezzola, G.R., 2006. Schwemmhölz. Probleme und Lösungsansätze. *Mitteilungen* 188. Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETHZ, Zürich, 135 pp. (in German).
- Lee, J.H., Park, H.J., 2016. Assessment of shallow landslide susceptibility using the transient infiltration flow model and GIS-based probabilistic approach. *Landslides* 13, 885–903. doi:10.1007/s10346-015-0646-6
- Liener, S., Kienholz, H., 1998. Predicting the spatial distribution of shallow landslides - the improved model SLIDISP, in: Buccianti, A., Nardi, G., Potenza, R. (Eds.), *Proceedings of the International Association for Mathematical Geology IAMG'98. Isola d'Ischia, Naples*, pp. 229–234.
- Losey, S., Wehrli, A., 2013. *Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald*. Bern.
- Mächler, M., 2009. GIS-Modellierung von potentiellen Schwemmhölzeinträgen durch Rutschungen (Semesterarbeit). Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften.
- Martin, D., Benda, L., 2001. Patterns of in-stream wood recruitment and transport at the watershed scale, in: *Transactions of the American Fisheries Society* 130. pp. 940–958.
- Mazzorana, B., Zischg, A., Largiader, A., Hübl, J., 2009. Hazard index maps for woody material recruitment and transport in alpine catchments. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 197–209. doi:10.5194/nhess-9-197-2009
- Perla, R., Cheng, T.T., McClung, D.M., 1980. A two-parameter model of snow-avalanche motion. *J. Glaciol.* 26, 197–207.
- Raetzo, H., Rickli, C., 2007. Rutschungen, in: Bezzola, G.R., Hegg, C. (Eds.), *Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden Und Erste Einordnung*. Umwelt-Wissen Nr. 0707, Bundesamt für Umwelt BAFU & Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bern, pp. 198-210 (in German).
- Rickenmann, D., 1990. Debris flows 1987 in Switzerland: modelling and sediment transport. *IAHS Publ.* no. 194, pp. 371-378. International Association of Hydrological Sciences.
- Rickenmann, D., 2014. *Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen*, WSL Berichte. Birmensdorf.
- Rickenmann, D., 2005. Runout prediction methods, in: Jakob, M., Hungr, O. (Eds.), *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Praxis-Springer, Heidelberg, pp. 263–282.
- Rickenmann, D., 1997. Schwemmhölz und Hochwasser. *Wasser, Energie, Luft* 89, 115-119 (in German).
- Rickenmann, D., Canuto, N., Koschni, A., 2008. Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teilprojekt Vertiefung Wildbäche: Einfluss von Lithologie/Geotechnik und Niederschlag auf die Wildbachaktivität beim Hochwasser 2005. Birmensdorf, Switzerland.
- Rickenmann, D., Hegg, C., Schwer, P., 1999. *Lawinenholz in Fließgewässern. Eine Übersichtsstudie*.

WSL, Birmensdorf.

- Rickli, C., Badoux, A., Rickenmann, D., Steeb, N., Waldner, P., 2018. Large wood potential, piece characteristics, and flood effects in Swiss mountain streams. *Phys. Geogr.* 3646, 1–23. doi:10.1080/02723646.2018.1456310
- Rickli, C., Bucher, H., 2006. Einfluss ufernaher Bestockungen auf das Schwemmholtzvorkommen in Wildbächen, Projektbericht zuhanden des Bundesamts für Umwelt BAFU. Eidg. Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, 94 pp. (in German).
- Rickli, C., McArdeell, B., Badoux, A., Loup, B., 2016. Database shallow landslides and hillslope debris flows, in: Koboltschnig, G. (Ed.), 13th Congress INTERPRAEVENT 2016. 30 May to 2 June 2016. Lucerne, Switzerland. International Research Society INTERPRAEVENT, Klagenfurt, Austria, pp. 242–243.
- Rimböck, A., 2003. Schwemmholtzrückhalt in Wildbächen: Grundlagen zu Planung und Berechnung von Seilnetzsperrern, Ausgabe 94. ed. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München.
- Rimböck, A., 2001. Luftbildbasierte Abschätzung des Schwemmholtzpotentials (LASP) in Wildbächen. In: Festschrift aus Anlass des 75-jährigen Bestehens der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München in Oberrach.
- Rousselot, P., 2012. Seitenerosion - Prozesse und deren Berechnung. *FAN Agenda* 2, 3–4.
- Rudolf-Miklau, F., Hübl, J., Schattauer, G., Rauch, H.P., Kogelnig, A., Habersack, H., Schulev-Steindl, E., 2011. Handbuch Wildholz – Praxisleitfaden. Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Klagenfurt.
- Ruiz-Villanueva, V., Díez-Herrero, A., Ballesteros, J.A., Bodoque, J.M., 2014. Potential large woody debris recruitment due to landslides, bank erosion and floods in mountain basins: a quantitative estimation approach. *River Res. Appl.* 30, 81–97. doi:10.1002/rra.2614
- Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Gurnell, A.M., Marston, R.A., Stoffel, M., 2016. Recent advances quantifying the large wood dynamics in river basins: New methods and remaining challenges. *Rev. Geophys.* 54, 611–652. doi:10.1002/2015RG000514
- Selby, M.H., 1993. Hillslope materials and processes. Oxford University Press, Oxford.
- SLF, 1999. Der Lawinenwinter 1999. Ereignisanalyse. Davos.
- Steeb, N., Badoux, A., Rickli, C., Rickenmann, D., 2019. Detailbericht zum Forschungsprojekt WoodFlow: Empirische Schätzformeln. 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:https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.10.011
- Strahler, A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union* 38, 913–920. doi:10.1029/TR038i006p00913
- Tobler, D., Riner, R., Pfeifer, R., 2013a. Runout Modelling of Shallow Landslides Over Large Areas with SliDepot, in: Margottini, C., Canuti, P., Sassa, K. (Eds.), *Landslide Science and Practice*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 239–245. doi:10.1007/978-3-642-31310-3\_32
- Tobler, D., Riner, R., Pfeifer, R., 2013b. Modeling Potential Shallow Landslides over Large Areas with

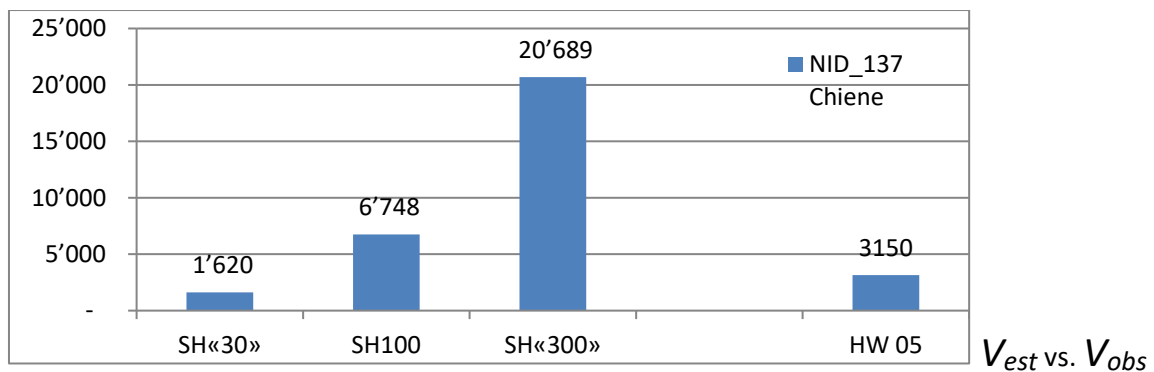
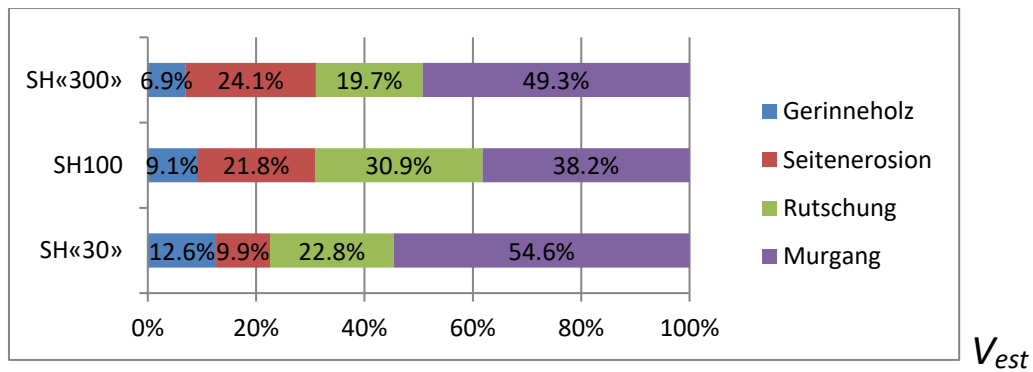
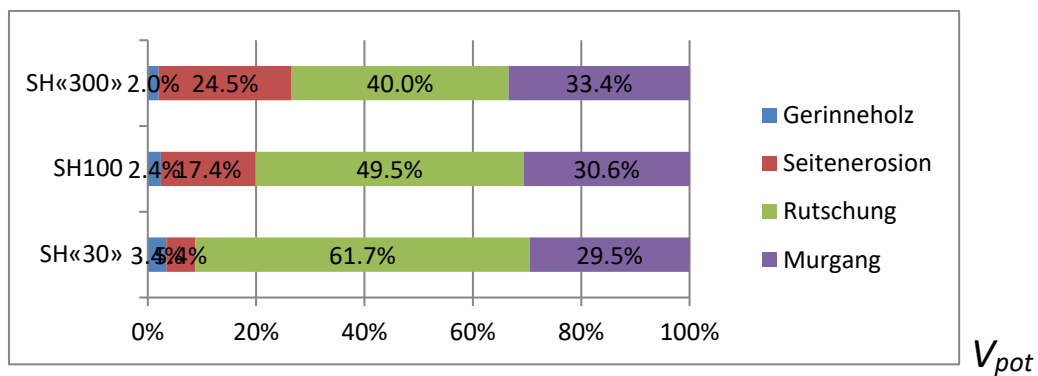
- SliDisp+, in: Margottini, C., Canuti, P., Sassa, K. (Eds.), *Landslide Science and Practice*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 37–45. doi:10.1007/978-3-642-31310-3\_6
- von Glutz, M., 2011. Verfahren zur Abschätzung des Schwemmholzpotentials von Wildbächen. Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft (SHL).
- Waldner, P., Köchli, D., Usbeck, T., Schmocker, L., Sutter, F., Rickli, C., Rickenmann, D., Lange, D., Hilker, N., Wirsch, A., Siegrist, R., Hug, C., Kaennel, M., 2009. Schwemmholz des Hochwassers 2005. Schlussbericht des WSL-Teilprojekts Schwemmholz der Ereignisanalyse BAFU/WSL des Hochwassers 2005. Birmensdorf, 70 pp. (in German).
- Waldner, P., Rickli, C., Köchli, D., Usbeck, T., Schmocker, L., Sutter, F., 2007. Schwemmholz, in: Bezzola, G.R., Hegg, C. (Eds.), *Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden Und Erste Einordnung*. Umwelt-Wissen Nr. 0707, Bundesamt für Umwelt BAFU & Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bern, pp. 181-193 (in German).
- Wichmann, V., Becht, M., 2003. Modelling of geomorphological processes in an alpine catchment, in: 7th International Conference on GeoComputation. Southampton.
- Wohl, E., Jaeger, K., 2009. A conceptual model for the longitudinal distribution of wood in mountain streams. *Earth Surf. Process. Landforms* 34, 329–344. doi:10.1002/esp.1722
- WSL, 2016. Schweizerisches Landesforstinventar LFI. Daten der Erhebungen 2004/06 (LFI3) und 2009/13 (LFI4). Markus Huber 06.06.2016.
- Zeh Weissmann, H., Könitzer, C., Bertiller, A., 2009. Strukturen der Fliessgewässer in der Schweiz. Zustand von Sohle, Ufer und Umland (Ökomorphologie); Ergebnisse der ökomorphologischen Kartierung. Umwelt-Zustand Nr. 0926. Bern.
- Zimmermann, M., Mani, P., Gamma, P., 1997. Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. vdf Hochschulverlag, Zürich.

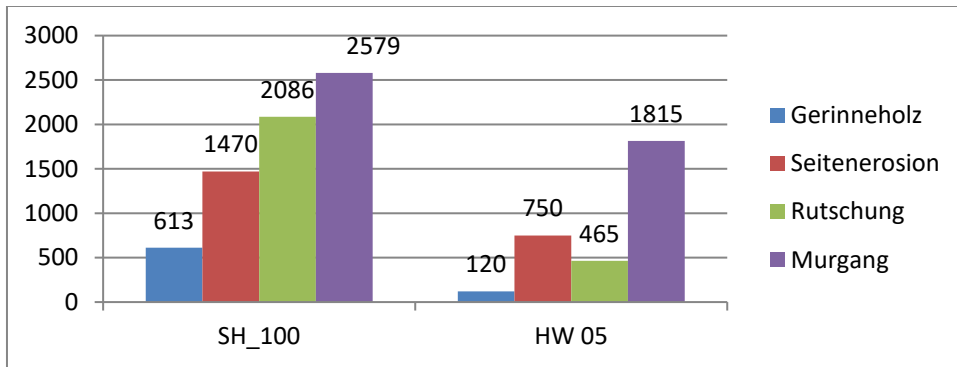
## 7 Anhang

### 7.1 SH-Potenzial & -Fracht ausgewählter Testeinzugsgebiete

#### 7.1.1 Beispiel Chiene

$V_{pot}$				$V_{est}$			
	SH«30»	SH100	SH«300»		SH«30»	SH100	SH«300»
	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]		[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]
Gerinneholz	2'043	2'043	2'043	Gerinneholz	204	613	1'430
Seitenerosion	3'223	14'700	24'968	Seitenerosion	161	1'470	4'994
Rutschung	37'017	41'717	40'721	Rutschung	370	2'086	4'072
Murgang	17'694	25'791	33'978	Murgang	885	2'579	10'193
<b>Total</b>	<b>59'978</b>	<b>84'251</b>	<b>101'710</b>	<b>Total</b>	<b>1'620</b>	<b>6'748</b>	<b>20'689</b>
				Anteil $V_{pot}$	2.7%	8.0%	20.3%





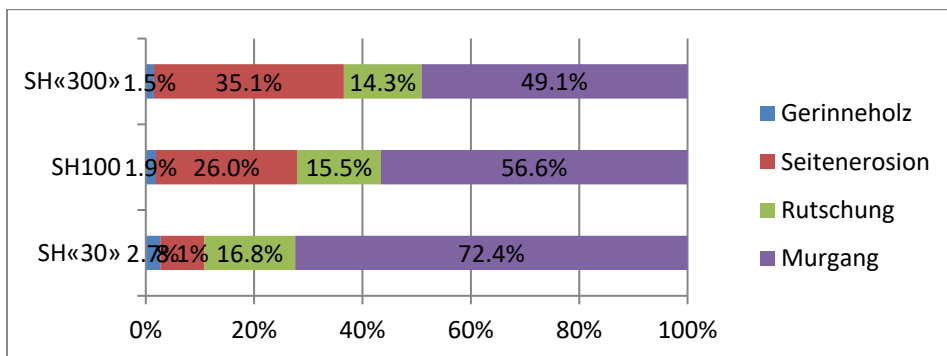
$V_{est}$  vs.  $V_{obs}$

### 7.1.2 Beispiel Landquart

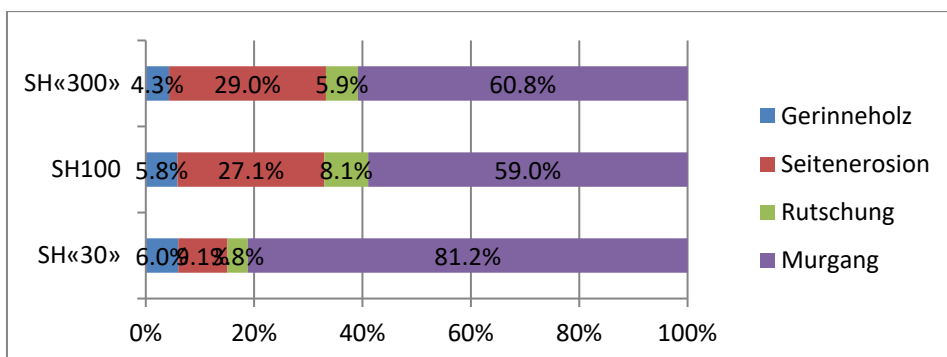
$V_{pot}$

$V_{est}$

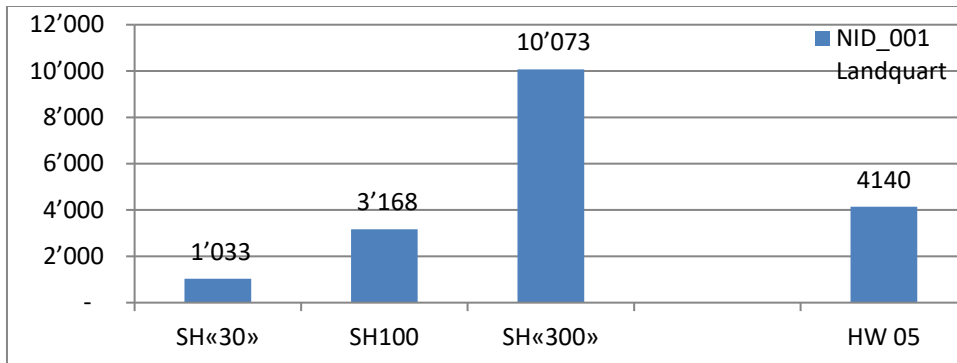
	SH«30»	SH100	SH«300»		SH«30»	SH100	SH«300»
	[m³]	[m³]	[m³]		[m³]	[m³]	[m³]
Gerinneholz	617	617	617	Gerinneholz	62	185	432
Seitenerosion	1'883	8'591	14'591	Seitenerosion	94	859	2'918
Rutschung	3'883	5'118	5'954	Rutschung	39	256	595
Murgang	16'764	18'679	20'425	Murgang	838	1'868	6'128
<b>Total</b>	<b>23'147</b>	<b>33'005</b>	<b>41'588</b>	<b>Total</b>	<b>1'033</b>	<b>3'168</b>	<b>10'073</b>
				Anteil $V_{pot}$	4.5%	9.6%	24.2%



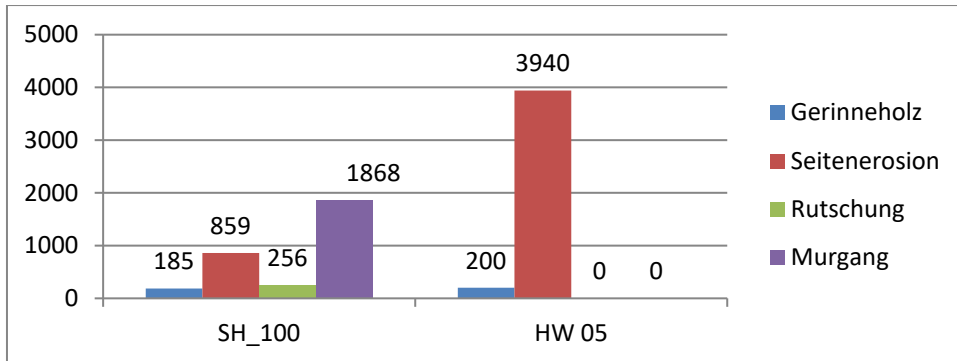
$V_{pot}$



$V_{est}$



$V_{est}$  vs.  $V_{obs}$



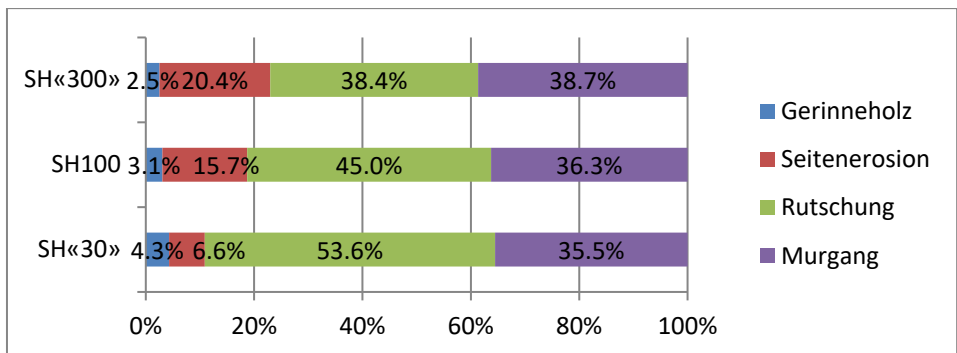
$V_{est}$  vs.  $V_{obs}$

### 7.1.3 Beispiel Chirel

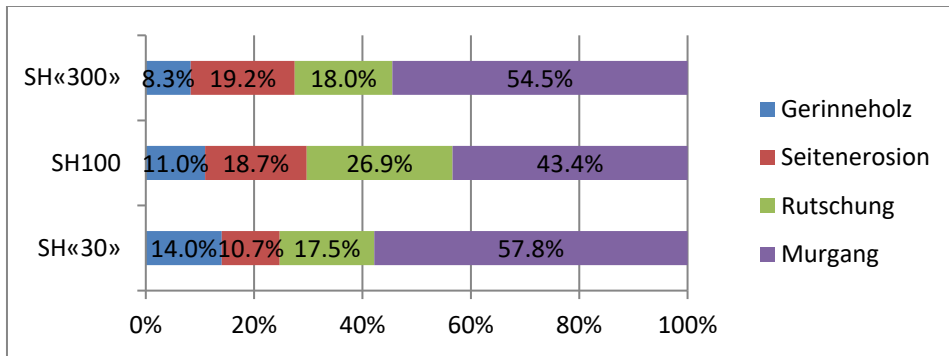
$V_{pot}$

$V_{est}$

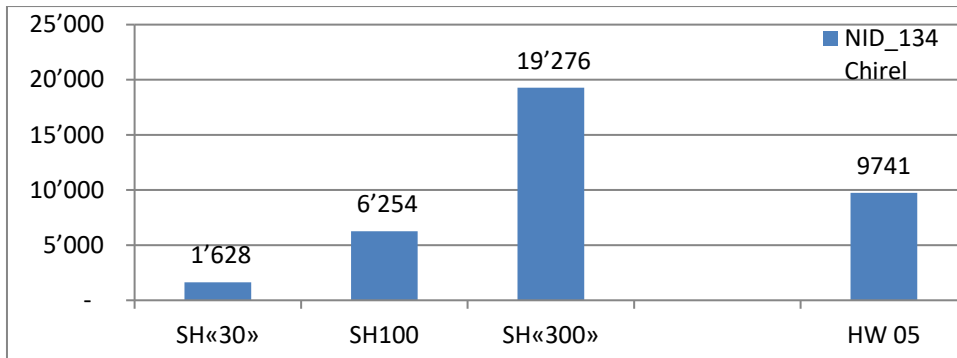
	SH«30» [m <sup>3</sup> ]	SH100 [m <sup>3</sup> ]	SH«300» [m <sup>3</sup> ]		SH«30» [m <sup>3</sup> ]	SH100 [m <sup>3</sup> ]	SH«300» [m <sup>3</sup> ]
Gerinneholz	2'285	2'285	2'285	Gerinneholz	229	686	1'600
Seitenerosion	3'482	11'714	18'502	Seitenerosion	174	1'171	3'700
Rutschung	28'417	33'676	34'749	Rutschung	284	1'684	3'475
Murgang	18'827	27'132	35'002	Murgang	941	2'713	10'501
<b>Total</b>	<b>53'011</b>	<b>74'808</b>	<b>90'539</b>	<b>Total</b>	<b>1'628</b>	<b>6'254</b>	<b>19'276</b>
				Anteil $V_{pot}$	3.1%	8.4%	21.3%



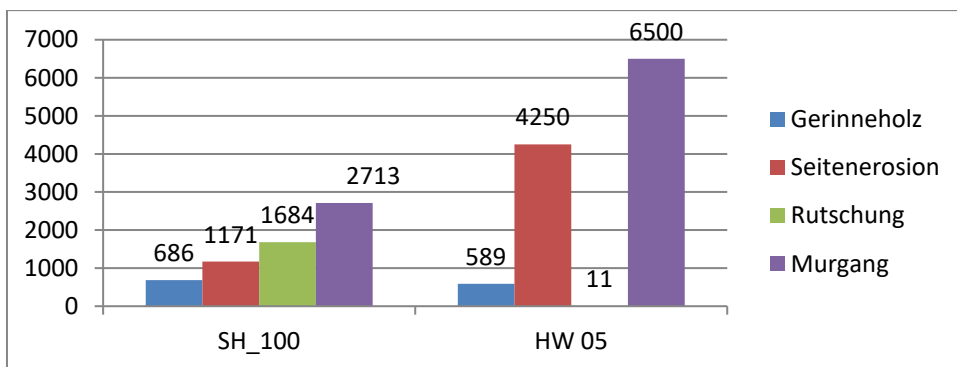
$V_{pot}$



$V_{est}$



$V_{est}$  vs.  $V_{obs}$



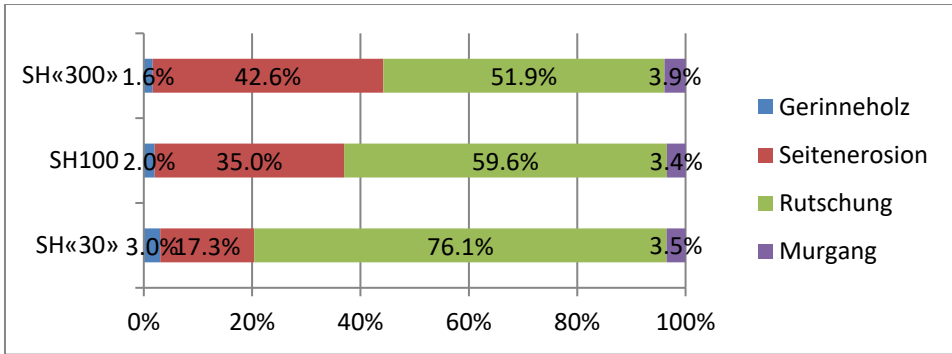
$V_{est}$  vs.  $V_{obs}$

#### 7.1.4 Beispiel Kleine Emme

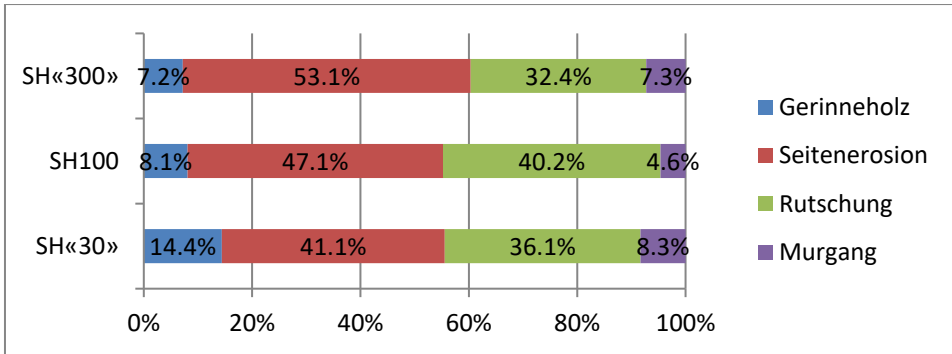
$V_{pot}$

$V_{est}$

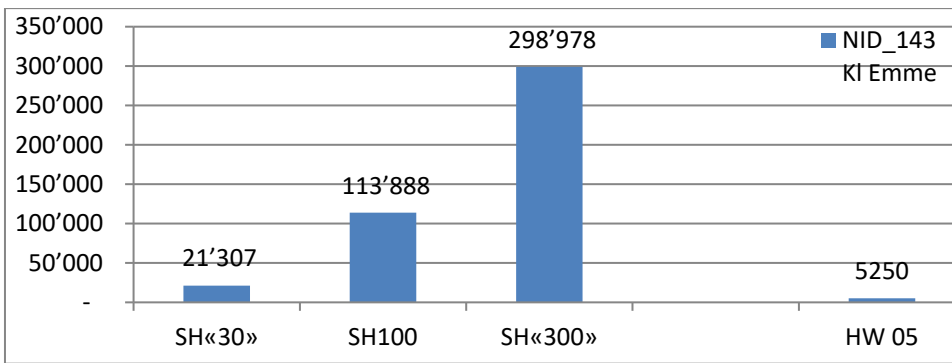
	SH«30»	SH100	SH«300»		SH«30»	SH100	SH«300»
	[m³]	[m³]	[m³]		[m³]	[m³]	[m³]
Gerinneholz	30'701	30'701	30'701	Gerinneholz	3'070	9'210	21'491
Seitenerosion	175'347	536'726	794'361	Seitenerosion	8'767	53'673	158'872
Rutschung	769'839	914'753	968'775	Rutschung	7'698	45'738	96'878
Murgang	35'419	52'669	72'458	Murgang	1'771	5'267	21'737
<b>Total</b>	<b>1'011'306</b>	<b>1'534'850</b>	<b>1'866'295</b>	<b>Total</b>	<b>21'307</b>	<b>113'888</b>	<b>298'978</b>
				Anteil $V_{pot}$	2.1%	7.4%	16.0%



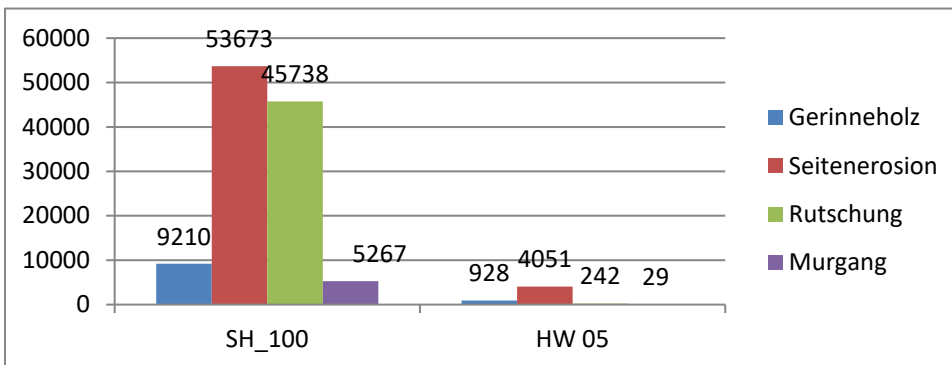
$V_{pot}$



$V_{est}$



$V_{est}$  vs.  $V_{obs}$



$V_{est}$  vs.  $V_{obs}$

## 7.2 Übersichtstabelle Testeinzugsgebiete

Bach/Fluss	Ereignisdatum	Kanton	Schwemmholzmenge [m3]	Einzugsgebiet [km <sup>2</sup> ]	Gerinnelänge [km]	Bewaldete Gerinnelänge Lw [km]	Wald [km2]	Abflussspitze [m <sup>3</sup> /s]	HQx [a]	Wasserfracht [m <sup>3</sup> ]	Feststofffracht [m <sup>3</sup> ]	Melton	Niederschlag Dauer [h]	Niederschlag Menge [mm]
Chirel	22.08.2005	BE	11'350	128.7	134.8	72.1	30.1	100		5'414'123	90'000	0.17		101
Grosse Melchaa	22.08.2005	OW	5'530	72.6	110.6	61.3	16.1			9'362'585	125'000	0.26		226
Kleine Emme	22.08.2005	LU	5'350	478.4	1518.2	1149.8	180.1					0.09		
Landquart	22.08.2005	GR	4'140	119	148.1	11.2	6.1	150		6'725'221	200'000	0.19	72	150
Chiene	22.08.2005	BE	3'150	90.45	116.0	50.8	16.2	90	50-100	6'135'402	90'000	0.31		162
Holdenbach	18.09.2006	UR	3'000	5.41	11.6	6.8	1.2				12'000	0.71		
Ava da Tuors	08.08.2009	GR	2'310	56.8	85.7	20	5.0					0.28	2	29
Schächen	22.08.2005	UR	2'000	108	129.3	60.9	18.1	120		6'992'233	200'000	0.27	48	245
Horbodenbach (Chratzmattigraben)	22.08.2005	BE	2'000	3.06	3.9	3.1	0.6			131'782	30'000	0.91		135
Engelberger Aa	22.08.2005	NW	1'875	229	296.0	142.0	48.3	230	200	28'997'813	210'000	0.18	48	186
Ticino (Airolo)	25.08.1987	TI	1'824	156	18.8	6.5	19.0	210		8'000'000		0.09		
Engstlige	10.10.2011	BE	1'200	145	246.9	116.9	23.6	115		3'246'811	20'000	0.21	16	68
Zulg	04.07.2012	BE	1'000	88.15	298.0	247.7	35.0	210	100		15'000	0.16	2.5	60
Steinibach (Dorfbach)	15.08.1997	OW	900	3.3	4.2	3	1.7	40	100		26'000	0.85	2.5	140
Buembachgrabe	24.07.2014	BE	717	4.85	4.6	3.9	1.4	59				0.51		97
Ganterbach (Saltina)	24.09.1993	VS	705	66.5	101.9	32.9	16.0	85	50	1'350'000	250'000	0.33		
Schöniseibach	24.07.2014	BE	641	4.5	1.5	1.3	0.7	55				0.55		81
Lau	31.05.2017	OW	600	44.8	149.8	121.3	25.0	90	30-50		10'000	0.24	1	100
Secklisbach	01.08.2005	NW	510	24.2	35.3	15.2	4.4	80	100		60'000	0.41		
Sädelgrabe	24.07.2014	BE	490	1.25	2.0	2.0	0.3	30	300		17'000	0.97	7	96
Steinibach (Giswil)	09.06.1996	OW	450	12	10	8	5.4	50	> 100	45'000	200'000	0.41	2	
Maienbach (inkl. Spisbach & Sigetsbach)	15.08.1997	OW	300	4.9	8.5	7.1	1.5	35	<100		13'500	0.74	2.5	120
Isentalerbach	22.08.2005	UR	300	59.7	63.3	29.8	12.7			6'247'710	10'000	0.32		106
Haldibach	22.08.2005	NW	300	2.9	4.1	2.7	1.0			309'636	250'000	0.82	48	163
Gärtelbach	24.07.2014	BE	260	0.81	1.7	1.7	0.2	18	300		8'000	1.18	7	96
Goldach	01.06.2009	TG	240	50.44	140.9	125.5	15.9					0.12		
Varuna	18.07.1987	GR	180	4	5.1	1.7	1.2	2		64'800	200'000	1.2		
Gruonbach	22.08.2005	UR	165	8.3	16.4	14.7	4.1			773'867	40'000	0.62		115
Schwendibach	24.08.2005	BE	150	11.1	25.3	8.1	2.0	60			11'000	0.55	65	275
Goneri (Gerewasser)	24.09.1993	VS	145	40	61.9	7	1.6					0.29		
Bärselbach	24.07.2014	BE	141	13.1	7.0	6.3	3.5	108				0.31		92
Saxetebach	03.07.1987	BE	135	20	8.3	4.6	7.0					0.49		
Sundgraben	02.01.2012	BE	45	9.68	23.4	22.2	5.1	250	30		40'000	0.48	115	61