



**Universität
Zürich** UZH

Geographisches Institut



Eine GIS-basierte Abschätzung des potentiellen Schwemmholzeintrages in alpine Fließgewässer und Vergleich mit effektiv transportierten Schwemmholzfrachten

GEO 511 Masterarbeit

Eingereicht durch

Benjamin Kuratli:

11-715-729

Betreut durch

Nicolas Steeb:

Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf
nicolas.steeb@wsl.ch

Dr. Dieter Rickenmann:

Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf
dieter.rickenmann@wsl.ch

Fakultätsvertretung

Prof. Dr. Jan Seibert

27. Juni 2017

Geographisches Institut, Universität Zürich

Zusammenfassung

Bei vergangenen Hochwasserereignissen wurden immer wieder grosse Mengen an Schwemmholz mitgeführt. Die mitgeschwemmten Holzstücke bewirkten Schäden an der Infrastruktur oder führten durch Verklausungen bei Engstellen zu Ausuferungen, was die Risiken eines Hochwassers beträchtlich erhöht. Für den Umgang mit dieser Problematik und die Planung von Massnahmen zur Minderung der Schäden sind bessere Kenntnisse zum Eintrag von Holz in die Gewässer und Beurteilungen von möglichen Holzmengen unabdingbar.

Zu diesem Zweck präsentierte diese Arbeit eine Methode zur Berechnung des Schwemmholzpotentials und zur Abschätzung effektiv anfallender Holzvolumen. Basierend auf national vorhandenen Daten und Annahmen zu den Reichweiten der wichtigsten Eintragsprozesse wurden potentielle Eintragsflächen modelliert und anhand des Holzvorrates Schätzungen zu den Schwemmholzpotentialen gemacht. Diese Methode wurde zu einem GIS-Modell weiterentwickelt, welches die Berechnung des potentiellen Schwemmholzvolumens eines ganzen Einzugsgebietes und der verschiedenen Eintragsprozesse automatisiert und auf Gebiete in der ganzen Schweiz angewandt werden kann. Weiter sind im Vergleich mit den beim Hochwasser 2005 angefallenen Schwemmholzmengen Abminderungsfaktoren erarbeitet worden, welche für die Reduktion des Potentials zu den effektiven Holzmengen stehen. So konnten Faktoren einbezogen werden, welche dafür sorgen, dass bei einem Ereignis nicht alle Eintragsprozesse aktiv sind oder nicht alles Holz mobilisiert wird.

Die Anwendung des GIS-Modells auf verschiedene Einzugsgebiete hat gezeigt, dass vor allem grossflächige Eintragsprozesse wie Rutschungen und Murgänge ein grosses Potential ausüben. Werden diese allerdings nicht ausgelöst oder erreichen sie kein Gewässer, so können auch gerinnennahe Prozesse, wie Seitenerosion oder die Mobilisation von Gerinneholz, den effektiven Schwemmholeintrag dominieren. Dies wies der Vergleich mit dokumentierten Schwemmholzmengen von vergangenen Hochwasserereignissen auf. Die Reduktion der Potentiale durch die quantifizierten Abminderungsfaktoren hat deutlich gemacht, dass mittels dieser Methode Schwemmholzmengen abgeschätzt werden können, mit welchen bei einem Hochwasser ungefähr gerechnet werden kann. Um die Genauigkeit dieser Abschätzung aber noch erhöhen zu können, werden Vorschläge zur Anpassung der Abminderungsfaktoren an die lokalen Bedingungen des Einzugsgebietes und des Unwetters gemacht.

Abstract

During past flood events instream wood was frequently carried along the rivers. The transported wood caused damage to the infrastructure or log jams at narrow points resulted in overflow of the rivers what increases considerably the risks of a flood. To deal with that issue and to plan interventions to reduce the damages, better knowledge of the input of wood into the waters and assessments of the potential amount of wood are necessary.

For this purpose, this work presents a method to calculate the potential of instream wood and to estimate the effectively mobilized wood. Based on national available data and assumptions of the ranges of the most important input processes, potential input areas are modeled. By means of the timber stock, estimations of the potential volumes of instream wood are made. This method was developed to a GIS-model that automates the calculation of the potential instream wood within a whole catchment and of the different input processes. The model can be applied to areas in whole Switzerland. The comparison to the effectively mobilized quantities of instream wood during the flood in 2005 was the basis of the worked-out reduction factors. They stand for the reduction of the potential to the effective volume. Like this, factors were included, which are the reasons that during a flood event not every process is active or not all of the wood is mobilized.

The application of the GIS-model to different catchments has showed that especially large-scale input processes like landslides and debris flows has a great potential. But if they are not released or if they don't reach a water body, other processes close to the channel, like bank erosion or the mobilization of channel wood, can dominate the effective wood input. This was showed by the comparison with the documented quantities of instream wood of past floods. The reduction of the potential volumes by the quantified reduction factors point out that this method estimates quantities of instream wood which can roughly be expected during a flood event. To raise the accuracy of the estimation, suggestions are made to adapt the reduction factors to the local conditions of the catchment and the event.

Danksagung

Ein herzlicher Dank geht an Nicolas Steeb und Dieter Rickenmann von der WSL für die hervorragende Betreuung meiner Masterarbeit. Während dem ganzen Arbeitsprozess standen sie mir bei Fragen und Problemen zur Seite und gaben wertvolle Inputs und Ideen.

Weiter bedanke ich mich bei Prof. Dr. Jan Seibert für die Fakultätsvertretung. Bei Fragen zum Ablauf der Arbeit konnte ich mich immer bei ihm melden.

Inhalt

Zusammenfassung.....	I
Abstract	II
Danksagung.....	III
Inhalt.....	IV
Abbildungen.....	VII
Tabellen.....	X
Abkürzungen	XII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.1 Forschungsziele.....	2
1.2 Vorgehensweise.....	3
2 Grundlagen	5
2.1 Begriffe.....	5
2.2 Entstehung von Schwemmholz	5
2.2.1 Eintragsprozesse.....	5
2.2.2 Schwemmholzpotential	8
2.3 Auswirkungen von Schwemmholz.....	8
2.3.1 Positive Auswirkungen.....	9
2.3.2 Negative Auswirkungen	9
2.3.3 Unterschied Europa – Nordamerika	10
2.4 Historische Ereignisse	10
2.4.1 Hochwasser 2005	11
3 Methoden.....	13
3.1 Modellierung	13
3.1.1 Einzugsgebiete.....	13
3.1.2 Gewässernetz.....	16
3.1.3 Holzvorrat.....	17
3.1.4 1. Iteration	18

3.1.5	2. Iteration	20
3.1.6	Zusammenführung der Prozessflächen.....	22
3.2	Abminderungsfaktoren.....	24
3.2.1	Abminderungsfaktoren aus der Literatur.....	24
3.2.2	Quantifizierung der Abminderungsfaktoren.....	26
3.3	GIS-Modell.....	29
3.4	Validierung des GIS-Modells und der Abminderungsfaktoren.....	31
3.5	Zusammenhang der Schwemmholzmenge mit anderen Variablen	31
4	Resultate.....	32
4.1	Modellierung	32
4.1.1	1. Iteration	32
4.1.2	2. Iteration	35
4.1.3	Vergleich der beiden Iterationen	39
4.1.4	Totholz.....	41
4.2	Quantifizierung der Abminderungsfaktoren.....	41
4.2.1	Prozesse.....	41
4.3	Vergleich mit den Daten vom Hochwasser 2005	46
4.3.1	Relative Anteile der verschiedenen Prozesse	46
4.3.2	Absolute Schwemmholzvolumen.....	50
4.3.3	Totholzanteil.....	54
4.4	Weitere Einzugsgebiete.....	54
4.4.1	Schwemmholzpotential	54
4.4.2	Effektive Schwemmholzvolumen	57
4.5	Abminderungsfaktoren.....	59
4.5.1	Abminderungsfaktoren aus der Literatur.....	59
4.6	Zusammenhang der Schwemmholzmenge mit anderen Variablen	61
5	Diskussion.....	65
5.1	Methoden.....	65
5.1.1	Gerinneholz	65
5.1.2	Seitenerosion	65

5.1.3	Rutschungen	66
5.1.4	Murgänge.....	66
5.1.5	Zusammenführung der Prozessflächen.....	67
5.2	GIS-Modell.....	68
5.2.1	Schwemmholzpotential	68
5.2.2	Effektives Schwemmholzvolumen.....	70
5.2.3	Anwendung des GIS-Modells	72
5.3	Zusammenhang der Schwemmholzmenge mit anderen Variablen	72
5.4	Anpassung der Abminderungsfaktoren	74
6	Fazit und Ausblick.....	76
7	Literatur.....	78
8	Daten	85
9	Anhang	86

Abbildungen

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Eintrags- und Ablagerungsprozesse von Schwemmholtz (Waldner et al., 2009).....	6
Abbildung 2: Seitenerosion an der Kleinen Emme beim Hochwasser 2005 (Waldner et al., 2009).....	7
Abbildung 3: Rutschung "Cholrüti" in die Grosse Melchaa beim Hochwasser 2005 (Waldner et al., 2009).....	8
Abbildung 4: Schwemmholtzverklausung in Thun beim Hochwasser 2005 (Waldner et al., 2009).....	9
Abbildung 5: Übersicht der behandelten Einzugsgebiete	13
Abbildung 6: Visualisierung der Schwemmholtz relevanten Seitenerosionsfläche der 1. Iteration.....	18
Abbildung 7: Visualisierung der Schwemmholtz relevanten Murgang- und Rutschungsflächen.....	19
Abbildung 8: Visualisierung der Schwemmholtz relevanten Gerinne- und Seitenerosionsfläche der 2. Iteration	22
Abbildung 9: Visualisierung der gesamten modellierten Schwemmholtzeintragsprozessflächen	23
Abbildung 10: Visualisierung der Waldfläche und des Gerinnenetzes	23
Abbildung 11: Visualisierung der bewaldeten modellierten Schwemmholtzeintragsprozessflächen	23
Abbildung 12: Vergleich der Erosionsstellen (gemäss Bachmann Walker (2012)) mit den modellierten bewaldeten Erosionsflächen am Beispiel der Chirel	27
Abbildung 13: Resultierende Rutschungskarte im Perimeter Appenzell 2002	28
Abbildung 14: Häufigkeitsverteilung der Rutschungswahrscheinlichkeiten der Pixel im Perimeter Appenzell 2002	28
Abbildung 15: Resultierendes Gerinneholzpotential (HQ100) auf Grundlage der drei verschiedenen Berechnungsansätze für die Einzugsgebiete der Grossen Melchaa, Chiene, Landquart und Chirel (links) sowie der Kleinen Emme (rechts).....	39
Abbildung 16: Resultierendes Schwemmholtzpotential (HQ100) durch Seitenerosion auf Grundlage der beiden Berechnungsansätze für die Einzugsgebiete der Grossen Melchaa, Chiene, Landquart und Chirel (links) sowie der Kleinen Emme (rechts).....	40
Abbildung 17: Modellierte Schwemmholtzpotentiale (HQ100) für die Einzugsgebiete der Grossen Melchaa, Chiene, Landquart und Chirel (links) sowie der Kleinen Emme (rechts).....	41
Abbildung 18: Vergleich der beiden Abminderungsfaktoren-Ansätze für Rutschungen im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa	45
Abbildung 19: Vergleich der beiden Abminderungsfaktoren-Ansätze für Rutschungen im Einzugsgebiet der Landquart.....	46
Abbildung 20: Vergleich der prozentualen Anteile der verschiedenen Eintragsprozesse im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa	47
Abbildung 21: Vergleich der prozentualen Anteile der verschiedenen Eintragsprozesse im Einzugsgebiet der Chiene.....	47

Abbildung 22: Vergleich der prozentualen Anteile der verschiedenen Eintragsprozesse im Einzugsgebiet der Landquart.....	48
Abbildung 23: Vergleich der prozentualen Anteile der verschiedenen Eintragsprozesse im Einzugsgebiet der Chirel	49
Abbildung 24: Vergleich der prozentualen Anteile der verschiedenen Eintragsprozesse im Einzugsgebiet der Kleinen Emme	50
Abbildung 25: Modellierte Schwemmholzmenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2005 im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa	51
Abbildung 26: Modellierte Schwemmholzmenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2005 im Einzugsgebiet der Chiene.....	51
Abbildung 27: Modellierte Schwemmholzmenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2005 im Einzugsgebiet der Landquart.....	52
Abbildung 28: Modellierte Schwemmholzmenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2005 im Einzugsgebiet der Chirel	53
Abbildung 29: Modellierte Schwemmholzmenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2005 im Einzugsgebiet der Kleinen Emme	53
Abbildung 30: Berechnete Schwemmholzpotentiale im Einzugsgebiet des Sundgrabens.....	54
Abbildung 31: Berechnete Schwemmholzpotentiale im Einzugsgebiet der Zulg	55
Abbildung 32: Berechnete Schwemmholzpotentiale im Einzugsgebiet des Secklisbachs.....	55
Abbildung 33: Berechnete Schwemmholzpotentiale im Einzugsgebiet des Schächens	56
Abbildung 34: Berechnete Schwemmholzpotentiale im Einzugsgebiet der Saltina	56
Abbildung 35: Modellierte Schwemmholzmenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2005 im Einzugsgebiet des Sundgrabens	57
Abbildung 36: Modellierte Schwemmholzmenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2012 im Einzugsgebiet der Zulg	57
Abbildung 37: Modellierte Schwemmholzmenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2005 im Einzugsgebiet des Secklisbachs	58
Abbildung 38: Modellierte Schwemmholzmenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2005 im Einzugsgebiet des Schächens	58
Abbildung 39: Modellierte Schwemmholzmenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 1993 im Einzugsgebiet der Saltina.....	59
Abbildung 40: Abminderungsfaktoren aus der Literatur angewendet auf das modellierte Schwemmholzpotential im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa.....	60
Abbildung 41: Abminderungsfaktoren aus der Literatur angewendet auf das modellierte Schwemmholzpotential im Einzugsgebiet der Kleinen Emme	61
Abbildung 42: Zusammenhang zwischen der effektiven Schwemmholzmenge und der Einzugsgebietsfläche	62

Abbildung 43: Zusammenhang zwischen der effektiven Schwemmholzmenge und der Einzugsgebietsfläche	63
Abbildung 44: Zusammenhang zwischen der effektiven Schwemmholzmenge und der Wasserfracht	64
Abbildung 45: Schematischer Aufbau des GIS-Modells	86

Tabellen

Tabelle 1: Charakteristika der behandelten Einzugsgebiete.....	14
Tabelle 2: Forstkreise und jeweiliger mittlere Holzvorrat der Testeinzugsgebiete.....	17
Tabelle 3: Gerinnebreite gemäss Höhenklasse und FLOZ.....	20
Tabelle 4: Schwemmholz-Vorrat unterteilt nach Gerinnebreite (gemäss Ruiz-Villanueva et al. (2016))	21
Tabelle 5: Verhältnis maximaler Rückgriffweite - Gerinnebreite nach Jährlichkeit.....	21
Tabelle 6: Zusammenfassung der Abminderungsfaktoren aus der Literatur.....	26
Tabelle 7: Beschreibung der Input- und Output-Variablen des GIS-Modells.....	30
Tabelle 8: Potentielle Schwemmholzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa (1. Iteration).....	32
Tabelle 9: Potentielle Schwemmholzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Chiene (1. Iteration).....	33
Tabelle 10: Potentielle Schwemmholzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Landquart (1. Iteration).....	33
Tabelle 11: Potentielle Schwemmholzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Chirel (1. Iteration).....	34
Tabelle 12: Potentielle Schwemmholzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Kleinen Emme (1. Iteration).....	34
Tabelle 13: Berechnete Gerinneholzvolumen [m ³] mit zwei unterschiedlichen Ansätzen für die fünf Testeinzugsgebiete	35
Tabelle 14: Potentielle Schwemmholzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa (2. Iteration).....	36
Tabelle 15: Potentielle Schwemmholzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Chiene (2. Iteration).....	36
Tabelle 16: Potentielle Schwemmholzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Landquart (2. Iteration).....	37
Tabelle 17: Potentielle Schwemmholzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Chirel (2. Iteration).....	38
Tabelle 18: Potentielle Schwemmholzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Kleinen Emme (2. Iteration).....	38
Tabelle 19: Totholzanteile gemäss GIS-Modell der Schwemmholzpotentiale in den Testeinzugsgebieten	41
Tabelle 20: Anteile an mobilisiertem Totholz für verschieden Einzugsgebiete (übernommen von Steeb et al. (2017)).....	42

Tabelle 21: Anteil der dokumentierten Erosionsflächen (gemäss Bachmann Walker (2012) & Hunzinger & Durrer (2009)) an der modellierten bewaldeten Erosionsfläche (gemäss GIS-Modellierung).....	42
Tabelle 22: Vergleich der dokumentierten Rutschungsfläche (gemäss Rutschungsdatenbank von McArdell & Rickli (2017) mit der modellierten Rutschungsfläche (gemäss GIS-Modellierung) in verschiedenen Perimetern.....	43
Tabelle 23: Grenzwert der Rutschungswahrscheinlichkeit zwischen „Rutschungsfläche“ und „Nicht-Rutschungsfläche“ im Verhältnis zur maximalen Rutschungswahrscheinlichkeit in verschiedenen Perimetern	43
Tabelle 24: Anteil der Murgang-aktiven Wildbäche am gesamten Gebirgsfluss-Einzugsgebiet (übernommen von Rickenmann et al. (2008)).....	44
Tabelle 25: Zusammenfassung der quantifizierten Abminderungsfaktoren.....	44
Tabelle 26: Totholzanteil der berechneten Schwemmhholzpotentiale in den fünf Testeinzugsgebieten	54
Tabelle 27: Ergebnisse der Rangkorrelationsanalyse zwischen der effektiven Schwemmhholzmenge und unterschiedlichen Variablen	62
Tabelle 28: Vergleich der Wiederkehrperiode des Hochwasserereignisses mit den modellierten Ereignisintensitäten	70
Tabelle 29: Rechenzeit des GIS-Modells für die verschiedenen Einzugsgebiete	87
Tabelle 30: Potentielle Schwemmhholzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Grosse Melchaa (GIS-Modell)	88
Tabelle 31: Potentielle Schwemmhholzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Grosse Melchaa (GIS-Modell)	88
Tabelle 32: Potentielle Schwemmhholzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Landquart (GIS-Modell).....	89
Tabelle 33: Potentielle Schwemmhholzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Chirel (GIS-Modell).....	89
Tabelle 34: Potentielle Schwemmhholzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Kleinen Emme (GIS-Modell).....	89

Abkürzungen

ArcGIS: GIS-Softwareprodukte der Firma ESRI (u. a. ArcMap)

BAFU: Bundesamt für Umwelt

FLOZ: Flussordnungszahl

GIS: Geographisches Informationssystem

HQ30, HQ100, HQ300: Hochwasser mit einer Wiederkehrperiode von 30, 100 bzw. 300 Jahren

LFI: Landesforstinventar

Master-GWN: Schwemmholtz relevantes Gewässernetz der Schweiz

SPSS: Statistik- und Analyse-Software der Firma IBM

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Beim Hochwasser im August 2005 führten zahlreiche Flüsse in weiten Teilen der Schweiz Schwemmholz mit sich. Durch verschiedene Prozesse gelangte Grün- wie auch Totholz in die Gewässer, wo es von den Fluten mitgerissen und teilweise bis weit in das Mittelland hinein transportiert wurde. Stellenweise staute sich das Holz aber auch an Brücken und Wehren, was mancherorts Gerinneausbrüche und Überschwemmungen zur Folge hatte (Waldner et al., 2009).

Die Problematik des Schwemmholzes in der Schweiz war allerdings nicht neu. So wurde beispielsweise bereits 1480 dokumentiert, dass entlang der Aare bei einem grossen Hochwasser mehrere Brücken durch den Aufprall von Schwemmholz zerstört wurden (Pfister & Wetter, 2011). Trotzdem wurde der Schwemmholzproblematik lange Zeit nicht wirklich Beachtung geschenkt. Dies änderte sich erst in den letzten Jahrzehnten, nachdem es bei mehreren Ereignissen durch Schwemmholz zu grösseren Schäden gekommen war (Lange & Bezzola, 2006).

Vor allem in gebirgigen Waldgebieten sorgen verschiedene Prozesse für den Eintrag von Bäumen oder sonstigem Holz in naheliegende Bäche und Flüsse (Ruiz-Villanueva et al., 2014). Bei Hochwasserereignissen sind dies hauptsächlich Rutschungen, Murgänge, Seitenerosion und die Mobilisierung von Gerinneholz (Steeb et al., 2017). Durch die hohen Abflussgeschwindigkeiten wird dieses Holz im überfluteten Gebiet mitgerissen und flussabwärts transportiert. Besonders in besiedelten Gebieten stellt Schwemmholz ein grosses Risiko dar. Durch das Aufprallen von Holz ist aber auch möglich, dass Bauten beschädigt oder zerstört werden. Schwemmholz kann sich aber auch bei Engstellen wie Brücken oder Wehren verkeilen und so Verklausungen bilden. Dadurch wird Wasser aufgestaut und es kommt zu Überschwemmungen. Brechen solche Verklausungen, hat dies eventuell Schwallwellen oder Murgänge zur Folge. Schwemmholzablagerungen haben jedoch auch positive Auswirkungen auf die Ökologie und die Dynamik eines Gewässers, indem sie als Lebensraum für Pflanzen und Tiere dienen und die natürliche Abflussdynamik unterstützen (Rudolf-Miklau et al., 2011).

Die Bedeutsamkeit von Schwemmholz und dessen Auswirkungen erkennt man daran, dass in zahlreichen Schweizer Flüssen und Bächen Schutzvorrichtungen für den Schwemmholzrückhalt gebaut werden. Ein Beispiel ist der Schwemmholzrechen Sihl, welcher für mehrere Millionen Franken bei Langnau am Albis gebaut wird, um unter anderem die Stadt Zürich vor grossen Mengen an angeschwemmtem Holz zu schützen (Flussbau AG, 2009).

Die Quantifizierung des Schwemmholzeintrages durch die verschiedenen Prozesse ist insofern bedeutsam, dass dieses neu gewonnene Wissen bei der Ausarbeitung von Schutzstrategien, der Gestaltung von Flussrenaturierungen und dem Gewässermonitoring angewendet werden kann (Benda et al., 2003).

In den letzten Jahrzehnten erschienen immer wieder Forschungsarbeiten, die sich mit der Schwemmholzproblematik befassten. Mit diesem Thema als Ganzes setzten sich beispielsweise Rudolf-Miklau et al. (2011) und Hübl et al. (2008) auseinander, die einen Leitfaden für den Umgang mit Schwemmholz erarbeiteten, oder auch Lange & Bezzola (2006), welche Probleme und Lösungsansätze des Schwemmholzes beschrieben.

Der Eintrag des Schwemmholzes wurde in mehreren Arbeiten behandelt. Benda et al. (2003) untersuchten zum Beispiel zahlreiche Eintragsprozesse in nordamerikanischen Flüssen oder Rickli & Bucher (2006) erforschten den Einfluss der gerinnenahen Gebiete auf den Schwemmholzanfall. Ausserdem wurden in der Literatur bereits verschiedene Modelle und Vorgehensweisen beschrieben, mit denen sich das Schwemmholzpotential abschätzen lässt. Ruiz-Villanueva et al. (2014) erarbeitete ein GIS-Modell für Zentralspanien und Meyer & Rimböck (2014) für Bayern. Mazzorana et al. (2009) beschrieb eine Vorgehensweise zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für den Schwemmholzeintrag und -transport für Wildbacheinzugsgebiete im Südtirol. Ein GIS-basiertes Modell zum Eintrag von Schwemmholz in der Schweiz wurde von Deplazes (2016) entwickelt. Dieses ist allerdings begrenzt auf den Kanton Bern.

Gleichungen zu einer ungefähren Abschätzung der effektiven und der potentiellen Schwemmholzmengen im Verhältnis zu Charakteristika des Einzugsgebietes oder des Hochwasserereignisses wurden von Rickenmann (1997) aufgestellt.

Die Geschehnisse und Auswirkungen des Hochwassers 2005 sind in zahlreichen Studien genau dokumentiert. Dies gilt auch für die Schwemmholzmengen, welche in zahlreichen Gebieten der Schweiz anfielen. Zum Beispiel beschrieben Waldner et al. (2009) die generelle Schwemmholzproblematik, während Steeb et al. (2017) den Fokus mehr auf den Eintrag des Holzes legte.

Einen genaueren Überblick über den Stand der Forschung wird im Kapitel „Grundlagen“ gegeben.

1.1 Forschungsziele

Diese Masterarbeit ist Teil des Forschungsprojekts „WoodFlow“, welches im Auftrag vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) und in Zusammenarbeit mit dem Schweizer Baumringlabor „Dendrolab.ch“ der Universität Genf, der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich sowie der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL) das Schwemmholz-Management an Fliessgewässern untersucht. Diese Masterarbeit ist dabei im Arbeitspaket „Schwemmholzpotential und -eintrag“ angesiedelt.

Anlässlich der Arbeit wird ein GIS-basiertes Modell entwickelt, mit welchem das potentielle Schwemmholzvolumen, die Teilpotentiale und Flächen der verschiedenen Eintragsprozesse und der Grün- bzw. Totholzanteil ermittelt werden kann. So können Schwemmholzpotentiale verschiedener Einzugsgebiete berechnet werden. Zusätzlich sollen allgemeine Abminderungsfaktoren erarbeitet werden, welche für die Reduktion des Schwemmholzpotentials auf das effektive Volumen ausschlaggebend sind.

Ziel ist ein im Vergleich zu bereits bestehenden Modellen weiter entwickeltes GIS-Modell, welches schweizweit einheitliche Daten verwendet und somit im ganzen Schweizer Alpen- und Voralpenraum anwendbar ist.

Basierend auf Daten von vergangenen Hochwasserereignissen sollen ferner Zusammenhänge der effektiven Schwemmh Holzmenge mit Charakteristika des Einzugsgebietes oder des Hochwassers überprüft werden. Aus diesen Relationen lassen sich mögliche Abhängigkeiten der Abminderungsfaktoren ableiten.

Daraus lassen sich folgende Forschungsfragen formulieren:

- Wie gut kann das potentielle Schwemmh Holzvolumen in einem bestimmten Einzugsgebiet modelliert werden?
- Welche Prozesse führen in welchem Ausmass zu Schwemmh Holzeintrag in die Gewässer und wie gross ist der Anteil der wichtigsten Eintragsprozesse am Gesamtvolumen?
- Welche Faktoren führen zu einer Abminderung des Potentials zum effektiv gemessenen Schwemmh Holzvolumen und wovon sind sie abhängig?

1.2 Vorgehensweise

Um das Schwemmh Holzpotential abzuschätzen, werden mit der GIS-Anwendung „ArcMap 10.3“ in fünf Testeinzugsgebieten das potentielle Holz im Gerinne und die potentiellen Prozessflächen von Murgängen, Rutschungen und Seitenerosion berechnet und mit dem Holzvorrat verschnitten. Dabei werden für die einzelnen Prozesse in zwei Iterationen unterschiedliche Vorgehensweisen getestet, um einen möglichst guten Ansatz ermitteln zu können. Diese Methoden werden im ModelBuilder von ArcGIS zu einem anwenderfreundlichen Modell zusammengesetzt, welches in einem automatischen Ablauf das potentielle Schwemmh Holzvolumen verschiedener Ereignisintensitäten in einem Einzugsgebiet berechnet. Mit Hilfe einer Analyse von Forschungsergebnissen zu den verschiedenen Eintragsprozessen werden durchschnittliche Abminderungsfaktoren ermittelt und auf die modellierten Schwemmh Holzpotentiale angewendet. Die resultierenden Werte werden mit den effektiven Volumen vom Hochwasser 2005 verglichen. Eine Analyse von Abminderungsfaktoren aus unterschiedlichen Studien und Arbeiten soll zusätzlich die ermittelten Faktoren in Relation zueinander setzen. Ausserdem werden gemessene Schwemmh Holz mengen von zahlreichen vergangenen Hochwasserereignissen mit Charakteristika von Einzugsgebiet und Hochwasserereignis miteinander verglichen, um Zusammenhänge aufzuzeigen, welche bei der Bestimmung der Abminderungsfaktoren berücksichtigt werden können.

Im schriftlichen Teil dieser Arbeit werden die Erarbeitung des GIS-Modells, der Abminderungsfaktoren und deren Abhängigkeiten genauer beschrieben und diskutiert.

Zuerst soll im Kapitel „Grundlagen“ eine theoretische Darstellung der Schwemmh Holzproblematik aufgezeigt werden. Dabei werden Begriffe definiert, ein Überblick über den Stand der Forschung zu den Eintragsprozessen und den Auswirkungen von Schwemmh Holz wird geschaffen und vergangene

Hochwasserereignisse mit Schwemmholtzanfall werden dokumentiert.

Im Kapitel „Daten und Methoden“ werden die verwendeten Daten und die genaue Vorgehensweise beschrieben und deren Wahl begründet.

Die Ergebnisse der GIS-Modellierung, der Ermittlung und Anwendung von Abminderungsfaktoren sowie des Vergleiches der effektiven Schwemmholtzmengen mit verschiedenen Charakteristika werden im Kapitel „Resultate“ illustriert und genauer erläutert.

Im Kapitel „Diskussion“ werden anschliessend die erhaltenen Ergebnisse genauer analysiert, miteinander verglichen und Erkenntnisse daraus gezogen. Dabei soll vor allem auf die Forschungsfragen eingegangen werden, indem das GIS-Modell hinsichtlich der Eignung und Genauigkeit untersucht wird und die Bestimmung und Anwendung von Abminderungsfaktoren kritisch besprochen wird. Ausserdem wird auch auf die Unterschiede in den Schwemmholtzmengen und Abminderungsfaktoren in Bezug auf das Einzugsgebiet und das Hochwasserereignis eingegangen.

Zum Schluss werden die Erkenntnisse dieser Arbeit im Kapitel „Fazit und Ausblick“ zusammengefasst und Vorschläge zur Weiterführung der Forschung in diesem Gebiet gemacht.

Diese Arbeit befasst sich hauptsächlich mit dem Eintrag von Schwemmholtz in Fliessgewässer. Die Auswirkungen und der Transport werden nur am Rande und lediglich theoretisch besprochen, um die Relevanz der Problematik aufzuzeigen. Nicht eingegangen wird auf die Vegetation und auf mögliche Variationen im Eintrag infolge unterschiedlicher Widerstandsfähigkeiten der Pflanzen. Diese Thematik wird anlässlich des Forschungsprojektes „WoodFlow“ an der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL) genauer untersucht. Auch Schutzmassnahmen gegen das Schwemmholtzrisiko werden nicht behandelt.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die theoretischen Grundlagen zur Schwemmholz-Thematik. Dabei wird hauptsächlich auf den Eintrag und die Auswirkungen auf Mensch und Natur von Schwemmholz eingegangen. Weiter werden vergangene Ereignisse mit Schwemmholzanfall dokumentiert.

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“ 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 am höchsten bei sporadischen Hochwasserereignissen (Kramer & Wohl, 2017). Wieviel Schwemmholz dabei jedoch anfällt, ist von vielerlei Faktoren abhängig; vor allem vom Zustand des Waldes und dessen Bewirtschaftung, den Bodeneigenschaften, der Geologie, dem Wind- und Schneedruck, der Exposition und Hangneigung sowie der Tiefen- und Seitenerosion. 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 (Steeb et al., 2017). Dabei sind gewisse Prozesse während eines Unwetters aktiv, andere fallen jedoch nicht mit dem Zeitpunkt des

Schwemmholttransportes überein. Zur ersteren Gruppe gehören im Wesentlichen die Prozesse Seitenerosion (und die daraus entstehenden Uferrutschungen), Hangrutschungen und murgangartige Prozesse (Rickli & Bucher, 2006).

Zu den anderen Prozessen, welche nicht notwendigerweise während dem Unwetter geschehen, werden in der Literatur zahlreiche Geschehnisse in der Natur gezählt. 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 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 (Rickli & Bucher, 2006). Zusätzlich kann schwimmendes Eis zu verstärkter Seitenerosion führen (Benda et al., 2003). Auch durch Waldbrände fallen neue Vorräte an Totholz an, welche zu potentiellem Schwemmholt werden (Agee & Huff, 1987). Schliesslich kann auch der Mensch durch forstliche Massnahmen, schlecht platzierte Holzlager oder verbautes Holz für zusätzliches potentielles Schwemmholt verantwortlich sein (Rickli & Bucher, 2006). Die Prozesse der zweiten Gruppe haben aber gemäss Steeb et al. (2017) während eines einzelnen Hochwasserereignisses weniger Bedeutung bezüglich Schwemmholtzukommen. Da diese Holzmengen normalerweise bereits vor dem Hochwasser im oder nahe dem Gerinne liegen, werden sie in dieser Arbeit als Gerinneholz zusammengefasst.

In Abbildung 1 sind die Eintrags- und Ablagerungsprozesse von Schwemmholt 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.

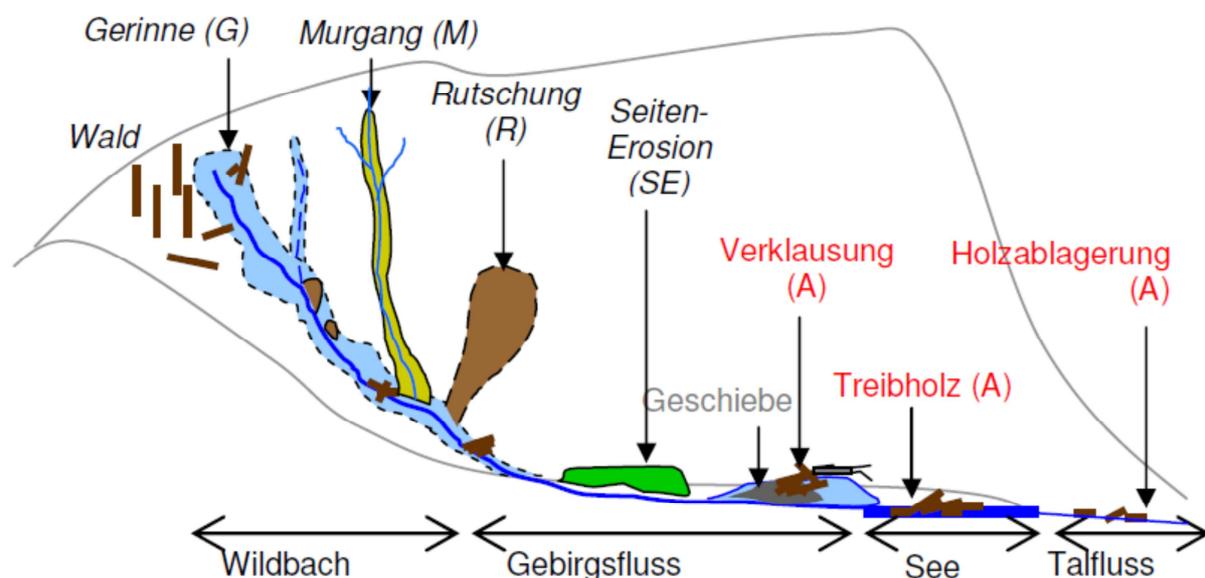


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Eintrags- und Ablagerungsprozesse von Schwemmholt (Waldner et al., 2009)

2.2.1.1 Gerinneholz

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

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 Uferabbrüchen 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), passiert diese hauptsächlich anlässlich von Hochwasserereignissen (Rickli & Bucher, 2006). Neben dem Abflussvolumen ist die Holzeintragsrate durch Seitenerosion auch abhängig von der Beschaffenheit und somit der Erodierbarkeit des Ufers, der Abflussenergie sowie dem Holzbestand (Benda et al., 2003). Ausserdem ist der Eintrag



Abbildung 2: Seitenerosion an der Kleinen Emme beim Hochwasser 2005 (Waldner et al., 2009)

von Holz infolge Seitenerosion eher ausgeprägter je grösser das Einzugsgebiet (Martin & Benda, 2001) und je breiter das Gerinne ist, wodurch ein höhere Abfluss erwartet werden kann (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.

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 im Murganggerinne

liegendes Holz weiter talwärts transportiert werden (Steeb et al., 2017). Umgekehrt ist es aber auch möglich, dass Schwemmholz Ursache für Murgänge ist, wenn beispielsweise eine Schwemmholzverklauung bricht (Rickenmann, 1997).

2.2.1.4 Rutschung

Grosse Niederschlagsmengen können durch Sättigung die Masse des Bodens erhöhen und die rückhaltenden Kräfte verringern, was den Hang destabilisiert und Rutschungen als Folge haben kann (Raetzo & Rickli, 2007). In dieser Arbeit gibt es keine weitere Unterscheidung, weshalb beispielsweise flachgründige und tiefgründige Rutschungen sowie Hangmuren alle dem Prozess „Rutschung“ zugeordnet werden.

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



Abbildung 3: Rutschung "Cholrüti" in die Grosse Melchaa beim Hochwasser 2005 (Waldner et al., 2009)

2.2.2 Schwemmholzpotential

Beim Schwemmholzvolumen wird zwischen dem Schwemmholzpotential und dem effektiven Schwemmholzvolumen bzw. der Schwemmholzmenge differenziert. Ersteres beschreibt das maximale Volumen an Holz, welches in das Gewässer eingebracht werden kann (Ruiz-Villanueva et al., 2014). In der GIS-Modellierung entspricht dies der Verschneidung aller Prozessflächen mit dem Holzbestand. Das effektive Schwemmholzvolumen charakterisiert hingegen das Holz, welches bei einem bestimmten Hochwasserereignis tatsächlich vom Gewässer mitgetragen wird. Diese Menge ist kleiner oder maximal gleich gross wie das Schwemmholzpotential, da nicht das gesamte Potential mobilisiert werden muss (Duwaplan GmbH, 1999).

2.3 Auswirkungen von Schwemmholz

Schwemmholz wird vor allem in bevölkerten Bergregionen als ernsthafte Risikoquelle angesehen (Steeb et al., 2017). Zahlreiche Studien zeigen aber auch die positiven Effekte von Holz in Fließgewässern auf.

2.3.1 Positive Auswirkungen

Schwemmholz hat zahlreiche positive Auswirkungen für die Ökologie der Fließgewässer. Für viele Tiere dient es als Lebensraum, indem es zum Beispiel als Versteck, Ruheplatz oder Nahrungsquelle fungiert. Schwemmholz hat aber auch einen Einfluss auf die Flussmorphologie, indem es zum Beispiel als Fließwiderstand wirkt. Dadurch können neue Habitate für die Tier- und Pflanzenwelt entstehen (Hübl et al., 2008; Rickli & Bucher, 2006; Rudolf-Miklau et al., 2011). Weiter verändert Schwemmholz auch die Hydraulik von Fließgewässern, indem es die Transportkapazität reduziert und den Abfluss verlangsamt, was zu einer Verringerung von Hochwasserspitzen führen kann (Hübl et al., 2008; Rickli & Bucher, 2006). Zusätzlich kann im Gerinne liegendes Holz auch eine Schutzfunktion übernehmen. Bei schwachem oder mittlerem Abfluss kann es als natürliche „Verbauung“ das Ufer vor der Strömung schützen und somit die Erosion verringern (Lange & Bezzola, 2006; Rickli & Bucher, 2006).

2.3.2 Negative Auswirkungen

Besonders in besiedelten Gebieten führt Schwemmholz auch zu Problemen. Bei Brücken oder anderen Verengungen kann es zu Verkläusungen kommen. Dabei staut sich das herantreibende Holz zu einer Blockade auf und verstopft den Durchfluss. Rückstau und bei zu



geringem Stauraum auch Überschwemmungen und Übersarun-

Abbildung 4: Schwemmholzverkläusung in Thun beim Hochwasser 2005 (Waldner et al., 2009)

gen können die Folge davon sein. Damit Verkläusungen entstehen, braucht es aber einen genügend grossen Abfluss, damit auch grobe Holzstücke mobilisiert werden. Brechen solche Verkläusungen, sind Schwallwellen oder Murgänge mögliche Folgen. Bei hohem Abfluss kann Schwemmholz durch den Aufprall ausserdem die Seitenerosion an der Uferböschung fördern (Rickli & Bucher, 2006). Des Weiteren ist auch der „Anprall“ von Holzstücken gegen die Infrastruktur Ursache von Schäden. Im schlimmsten Fall kann Schwemmholz auch zu einer Bedrohung für den Menschen werden (Lange & Bezzola, 2006; Rudolf-Miklau et al., 2011)

2.3.2.1 Lösungsansätze für negative Auswirkungen von Schwemmholz

Zur Lösung dieser Probleme gibt es laut Rickli & Bucher (2006) vier Optionen: (i) Schwemmholzurückhalt (z.B. durch bauliche Massnahmen wie Schwemmholzrechen), (ii) Entschärfung von potentiellen Verkläusungsstellen (z.B. grössere Querschnitt bei Brücken), (iii) Massnahmen zum schadlosen Transport (z.B. Verkleinern von Totholz) und (iv) Reduktion des Schwemmholzaufkommens (z.B. Unterhalt der ufernahen Waldgebiete). Dem letzten Punkt stellt sich aber entgegen, dass in der

Schweiz steile Einhänge zu Wildbächen aus ökonomischen Gründen immer häufiger nur noch extensiv oder gar nicht mehr bewirtschaftet werden (Rickli & Bucher, 2006).

In anderen Ländern gibt es sogar oftmals gar keine Richtlinien zur Forstbewirtschaftung, was den Umgang mit Schwemmh Holz enorm erschwert (Ruiz-Villanueva et al., 2016). Ausserdem hat die Analyse von Waldner et al. (2009) gezeigt, dass beim Hochwasser 2005 vorgängige forstliche Eingriffe den Schwemmholzeintrag höchstens vermindert, nicht aber vollkommen unterbunden hätten, weil durch Murgänge und Rutschungen auch Holz von ausserhalb der Uferbereiche das Gewässer erreicht.

2.3.3 Unterschied Europa – Nordamerika

Ein grosser Teil der Literatur über Schwemmh Holz stammt aus Europa und Nordamerika. Allerdings gibt es wesentliche Unterschiede in den Bedingungen auf den beiden Kontinenten. Während es in Nordamerika noch viele naturbelassene Flüsse und Wälder gibt, wurden in Europa viele Wälder über lange Zeit bewirtschaftet. Dadurch wird regelmässig der Vorrat an Totholz reduziert. Ausserdem ereignen sich in Kulturlandschaften wie Zentraleuropa weniger grossflächigen Phänomene wie Waldbrände und kleinere Ereignisse wie Rutschungen, Erosion und Überschwemmungen werden mit verschiedenen Massnahmen stärker unterbunden. Zusätzlich wurde in der Vergangenheit auch bei vielen Flüssen die Geometrie des Gerinnes künstlich verändert, wodurch engere Flussbecken entstanden. Dies alles hat eine Verringerung der Schwemmh Holzmenge zur Folge (Hering et al., 2000). Dem entgegen wirkt zumindest in gewisser Masse der Trend der Wiederaufforstung entlang von europäischen Flüssen, was die potentielle Schwemmh Holzmenge ansteigen lässt (Kramer & Wohl, 2017).

2.4 Historische Ereignisse

Lange Zeit war die Problematik des Schwemmh Holzes zwar bekannt, wurde aber nur als Begleiterscheinung des Geschiebetransports und –rückhalts betrachtet. Erst seit Schwemmh Holz in den letzten Jahrzehnten vermehrt zu höheren Schadenssummen führte, gewann dessen Problematik an Bedeutung (Lange & Bezzola, 2006). Einige dieser Hochwasserereignisse mit grossen Schwemmh Holz mengen sind hier aufgelistet, wobei es sich bei der Volumenangabe um Festmeter (=Volumen ohne Zwischenraum) handelt. War in der Literatur nur das Lockervolumen (=Volumen des losen Ablagerungshaufens inklusiv Luftporenraum) angegeben, wurde das feste Volumen mittels Umrechnungsfaktoren ermittelt. Dieser Faktor wurde gemäss Lange & Bezzola (2006) als Wert zwischen 0.2 und 0.5 definiert.

- 1978: Während dem Hochwasser im August 1978 im Tessin transportierte die Melezza rund 12'500 m³ Holz in den Stausee „Lago di Palagnedra“, welches dort zu einer gefährlichen Behinderung des Abflusses führte (Bruschin et al., 1982). Dies ist die grösste Holzmenge, welche bei den dokumentierten Ereignissen in der Schweiz in Einzugsgebieten dieser Grösse (140 km²) angefallen ist (gemäss Schwemmh Holzdatenbank von Steeb (2017)).

- 1987: Im Unwettersommer 1987 sorgten mehrere Hochwasser für enorme Schäden in den Schweizer Alpen. Dabei kam es in verschiedenen Regionen zu grossen Schwemmh Holzverlagerungen im Gesamtausmass von ungefähr 25'000 m³ (Bänziger, 1989; Walther et al., 1996).
- 1993: Beim Hochwasser im September 1993 im Wallis wurde etwa 11'000 m³ Schwemmh Holz verfrachtet, welches an mehreren Wehranlagen Schäden erzeugte (Walther et al., 1996).
- 1997: Bedingt durch das Hochwasser 1997 wurden in und um Sachseln (OW) um die 1'300 m³ Schwemmh Holz abgelagert (Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), 1998).
- 2002: In mehreren Regionen der Schweiz (Napfgebiet, Appenzell, Surselva) kam es im Sommer und Herbst 2002 auf Grund von Unwettern zu Verlagerungen von Schwemmh Holz, welches an verschiedenen Orten Verklausungen und Überschwemmungen verursachte (Rickli & Bucher, 2006).
- 2005: Beim Hochwasser 2005 gab es in zahlreichen Flüssen in der ganzen Schweiz Schwemmh Holzverfrachtungen. Die gesamten Ablagerungen beliefen sich dabei auf etwa 70'000 m³ (Waldner et al., 2009). Die Schwemmh Holzproblematik bei diesem Ereignis wird im Kapitel „Hochwasser 2005“ weiter unten genauer beschrieben.
- 2011: Im Oktober 2011 kam es infolge langanhaltender Niederschläge und Schneeschmelze vor allem in den Kantonen Bern, Wallis und Glarus zu Hochwassersituationen. Dabei wurde ungefähr 8'500 m³ an Schwemmh Holz abgelagert (Andres et al., 2012; StorMe, 2006).
- 2014: Am 24. Juli 2014 erzeugten heftige Gewitter einen Hochwasserabfluss in der Emme im oberen Emmental. Die totalen Schwemmh Holzmenge beliefen sich dabei auf ca. 2'800 m³ (Böckli et al., 2015b).

2.4.1 Hochwasser 2005

Zwischen dem 18. und 23. August 2005 gingen intensive und langanhaltende Niederschläge über dem Alpennordhang vom Berner Oberland über die Innerschweiz und Teile des Bündnerlandes bis nach Österreich und Bayern nieder. Diese liessen den Wasserpegel in den Gebirgs- und Talflüssen massiv ansteigen und hatten Erosion, Rutschungen und Murgänge zur Folge. Die Schadenssumme belief sich auf rund 3 Milliarden Franken, was seit der systematischen Erfassung der Unwetterschäden im Jahr 1972 Rekord ist (Bezzola & Hegg, 2007).

Während dem Hochwasser 2005 wurden in zahlreichen Gebirgs- und Talflüssen beachtliche Schwemmh Holzvolumen transportiert und abgelagert. Das Holz war mehrheitlich frisch und wurde überwiegend durch Murgänge, Rutschungen und Seitenerosion in Gewässer eingetragen.

Ereignete sich in einem Wildbachgerinne ein Murgang, riss dieser grosse Holzmassen mit. So steuerten auch kleine Gerinne beachtliche Schwemmh Holzfrachten bei. Zudem transportierten Murgänge teilweise Holz aus grösserer Entfernung in das Gewässer. In einigen Gebieten hatte dieser Prozess deshalb grossen Anteil am Eintrag des gesamten Schwemmh Holzes.

Rutschungen trugen teilweise hohe Holzvolumen in kurzer Zeit ein, wie beispielsweise die Rutschung

„Cholrüti“, welche über 1'100 m³ Holz in die Grosse Melchaa beförderte. Durch die grosse Menge und den schwallartigen Eintrag sind diese Prozesse besonders risikoreich für Verklausungen. Solche Verklausungen an Brücken und Wehren zogen während dem Hochwasser 2005 an mehreren Orten Gerinneausbrüche und Überschwemmungen mit sich. Gesamthaft wurden in der ganzen Schweiz ein Lockervolumen von rund 200'000 m³ abgelagertem Schwemmholz dokumentiert, was einer Masse von ca. 70'000 Tonnen Holz entspricht (Waldner et al., 2009).

3 Methoden

In diesem Kapitel werden die in dieser Arbeit verwendeten Methoden beschrieben und begründet.

3.1 Modellierung

Die Schwemmholzpotentiale werden für schwache, mittlere und extreme Hochwasserereignisse berechnet. Aufgrund der ungenügenden Jährlichkeit dieser Ereignisse, werden sie als HQ30, HQ100 bzw. HQ300 bezeichnet.

Die Modellierung der potentiellen Eintragsflächen von Schwemmholz wird iterativ durchgeführt mit zunehmendem Detaillierungsgrad der Berechnungsmethoden. In zwei Iterationen werden verschiedene Berechnungsmethoden getestet, um die vier Haupteintragsprozesse zu modellieren. Die Resultate werden verglichen, um so den besten Ansatz für jeden Prozess auswählen zu können.

3.1.1 Einzugsgebiete

Für die Kalibrierung und Anwendung des Modells wurden je fünf Einzugsgebiete von Gebirgsflüssen auf der Alpennordseite der Schweiz gewählt, in welchen bei vergangenen Hochwasserereignissen Schwemmholz angefallen ist (Abbildung 5). Die Einzugsgebiete werden mit Hilfe der Einzugsgebietsgliederung (BAFU: Einzugsgebietsgliederung Schweiz EZGG-CH) bestimmt und durch Information vom Geoportal des Bundes (geo.admin.ch © swisstopo) ergänzt. Die Charakteristika dieser Einzugsgebiete sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

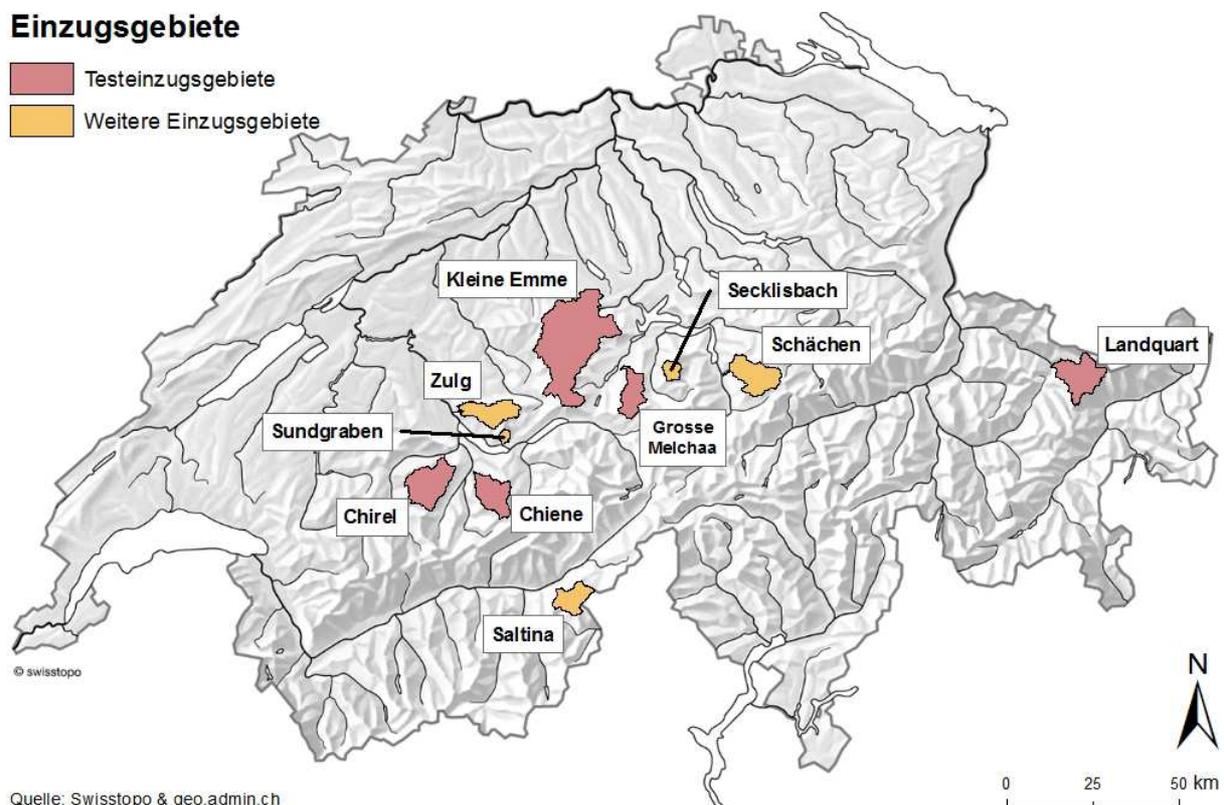


Abbildung 5: Übersicht der behandelten Einzugsgebiete

Tabelle 1: Charakteristika der behandelten Einzugsgebiete

	Grosse Melchaa	Chiene	Landquart	Chirel	Kleine Emme	Sundgraben	Zulg	Secklisbach	Schächen	Saltina
Gesamtfläche [km²]	73	90	119	129	437	10	88	25	108	77
Bewaldete Fläche [%]^a	22.1	17.9	5.0	23.4	37.6	53.0	40.0	18.0	16.7	27.0
Höchster Punkt [m.ü.M.]	2'688	3'645	3'285	2'647	2'345	2'061	2'060	2'808	3'286	3'400
Tiefster Punkt [m.ü.M.]	469	711	1'184	667	495	558	546	517	451	667
Untersuchtes Hochwasserereignis	2005	2005	2005	2005	2005	2012	2012	2005	2005	1993
Spitzenabfluss [m³/s]^b	130	90	391	100	650	250	220	80	165	75
Wiederkehrperiode des Spitzenabflusses [a]^c	> 200	50 - 100	50 - 100	50 - 100	50 - 100	30	100	100	> 200	> 50
Holzmenge fest [m³]^d	5'350	3'150	4'140	11'350	5'250	45	1'000	510	200	705

^a Gemäss Schwemmholzdatenbank von Steeb (2017)

^b Gemäss Eberhard et al. (2007), Hunzinger et al. (2008), Künzi et al. (2012), Dobmann & Liener (2012), Emch+Berger AG et al. (2006) und Glenz & Walther AG et al. (1996)

^c Gemäss Eberhard et al. (2007), Hunzinger et al. (2008), Künzi et al. (2012), Dobmann & Liener (2012), Emch+Berger AG et al. (2006) und Glenz & Walther AG et al. (1996)

^d Gemäss Steeb et al. (2017), Waldner et al. (2009) und Schwemmholzdatenbank von Steeb (2017)

3.1.1.1 Testeinzugsgebiete

Die fünf Einzugsgebiete zur Kalibrierung des Modells werden als Testeinzugsgebiete zusammengefasst. In all diesen Einzugsgebiete mobilisierte das Hochwasser 2005 speziell grosse Mengen an Schwemmholz, welche durch Waldner et al. (2009) und Steeb et al. (2017) sehr gut dokumentiert wurden. Bei den in den folgenden Abschnitten angegebenen Volumen handelt es sich um das feste Holzvolumen des Schwemmholzeintrages. Die Wiederkehrperioden der Abflussmenge waren 2005 in allen Testeinzugsgebieten um die 100 Jahre oder sogar höher

Grosse Melchaa

Die Grosse Melchaa ist ein Fluss im Kanton Obwalden, welcher auf 469 m.ü.M. in den Sarnersee mündet. Das Einzugsgebiet erstreckt sich auf Höhen von über 2'500 m.ü.M. und hat eine Fläche von ca. 73 km². Der gesamte Schwemmholzeintrag beim Hochwasser 2005 belief sich auf ein Volumen von 5'350 m³. Beinahe die Hälfte davon gelangte durch die beiden grossen Rutschungen „Cholrüti“

und „Stöckwald“ in das Gewässer. Aber auch Murgänge und Seitenerosion waren Auslöser für erheblichen Schwemmholzeintrag. Der Grossteil des Holzes wurde schnell mobilisiert und talabwärts transportiert und fast das ganze Volumen bei einer Eisenbahnbrücke kurz vor der Mündung in den Sarnersee abgelagert.

Chiene

Die Chiene ist ein Nebenfluss der Kander in den Berner Alpen. Ihr Einzugsgebiet misst rund 90 km² und reicht von ca. 700 bis auf über 3'500 m.ü.M. 2005 fiel im Einzugsgebiet der Chiene ein Gesamtvolumen von 3'150 m³ Schwemmholz an. Wichtigste Eintragsprozesse waren dabei Murgänge und Rutschungen. Grosse Ablagerungen gab es im Dorf Kien kurz vor der Mündung in die Kander. Viel Schwemmholz wurde aber auch in die Kander weitergeleitet.

Landquart

Die Landquart ist ein alpines Fliessgewässer im nördlichen Bündnerland. Für das Testeinzugsgebiet der Landquart wird nicht der ganze Fluss berücksichtigt, sondern nur jener Teil des Flusses oberhalb Klosters (GR), da es 2005 vor allem in diesem Gebiet der Landquart zu Verklausungen und Ablagerungen von Schwemmholz kam, welche gut dokumentiert sind. Weiter flussabwärts gab es zwar auch ein hohes Schwemmholzaufkommen, welches allerdings zu vergleichsweise geringen Schäden führte (Waldner et al., 2009). Dieses Teileinzugsgebiet der Landquart steigt von Klosters auf 1'184 m.ü.M. bis auf mehr als 3'200 m.ü.M. an und umfasst eine Fläche von rund 119 km². Vor allem Seitenerosion war die Ursache für die 4'140 m³ Schwemmholz beim Hochwasser 2005. Abgelagert wurde dieses grösstenteils an einer Brücke in Klosters.

Chirel

Die Chirel ist ein Nebenfluss der Simme in den Berner Alpen. Das Einzugsgebiet reicht vom Simmental auf rund 650 m.ü.M. bis auf über 2'600 m.ü.M. und ist etwa 129 km² gross. 2005 wurde ein Volumen von 11'350 m³ Schwemmholz in das Flusssystem der Chirel eingebracht. Die riesige Menge gelangte vor allem durch Murgänge und Seitenerosion in das Wasser. Abgelagert wurde das Holz an zahlreichen Stellen im ganzen Tal.

Kleine Emme

Die Kleine Emme ist ein voralpines Gewässer im Kanton Luzern, welches bei Luzern in die Reuss mündet. Auch für das Testgebiet der Kleinen Emme wird nur ein Teileinzugsgebiet des Flusses gewählt. In diesem Fall wird der Einzugsbereich oberhalb vom Wasserkraftwerk Ettisbühl bei Malters (LU) einberechnet. Weiter flussabwärts gab es beim Hochwasser 2005 kaum mehr Schwemmholzeinträge, weshalb es Sinn macht, das Einzugsgebiet der Kleinen Emme zu begrenzen (Waldner et al., 2009). Ausserdem befindet sich beim Wasserkraftwerk Ettisbühl seit 2011 auch ein Schwemmholzurückhalt, welcher bei einem Hochwasser einen grossen Teil des Schwemmholzes aufhalten soll (Tamagni et al., 2010). Das Teileinzugsgebiet der Kleinen Emme erstreckt sich vom Wasserkraftwerk

Ettisbühl auf 495 m.ü.M bis zum Briener Rothorn auf 2'345 m.ü.M. und hat eine Fläche von 437 km². Hauptsächlich Seitenerosion und einige kleinere Rutschungen waren 2005 verantwortlich für das Schwemmholzvolumen von 5'250 m³ in der Kleinen Emme. Das meiste Holz gelangte in die Reuss und wurde teilweise bis weit in das Mittelland transportiert.

3.1.1.2 Weitere Einzugsgebiete

Das kalibrierte GIS-Modell soll auf weitere Einzugsgebiete angewendet werden, in welchen bei vergangenen Hochwasserereignissen Schwemmholz mobilisiert wurde. Bei den Angaben zu den effektiven Volumenen handelt es sich um das Festvolumen, deren Werte aus der Schwemmholzdatenbank von Steeb (2017) stammen.

Sundgraben

Der Sundgraben ist ein Bach im Berner Oberland, welcher auf 558 m.ü.M. in den Thunersee mündet. Das Einzugsgebiet erstreckt sich auf eine Fläche von 10 km² und bis auf Höhen von über 2'000 m.ü.M. Im Januar 2012 wurden durch einen Murgang rund 45 m³ Schwemmholz mobilisiert (Andres et al., 2013).

Zulg

Die Zulg ist ein Nebenfluss der Aare im Kanton Bern. Das Einzugsgebiet misst 88 km² und reicht von etwa 500 – 2'000 m.ü.M. Beim Unwetter im Juli 2012 fielen rund 1'000 m³ Schwemmholz an.

Secklisbach

Der Secklisbach ist ein Zufluss der Engelberger Aa im Kanton Nidwalden. Das Einzugsgebiet hat eine Fläche von 25 km² und reicht von ca. 500 bis auf fast 3'000 m.ü.M. Beim Hochwasser 2005 gab es Schwemmholzablagerungen von 510 m³.

Schächen

Der Schächen liegt im Kanton Uri und fliesst bei Altdorf in die Reuss. Das Einzugsgebiet misst 108 km² und erstreckt sich von rund 450 bis auf über 3'000 m.ü.M. 2005 wurde eine Schwemmholzmenge von rund 2'000 m³ mobilisiert.

Saltina

Die Saltina ist ein Fluss im Kanton Wallis, welcher bei Brig auf 667 m.ü.M. in die Rhone mündet. Ihr Einzugsgebiet misst 77 km² und reicht bis auf 3'400 m.ü.M. Beim Unwetter 1993 wurden rund 705 m³ Holz mitgeschwemmt.

3.1.2 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.

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

Mächler (2009) geht in seiner Arbeit von einer Mindestgrösse des Einzugsgebietes von 1 km² aus, damit Schwemmholz transportiert werden kann. Vergangene Hochwasser haben jedoch gezeigt, dass auch Bäche mit kleinerem Einzugsgebiet (z.B. Erlenbach: 0.7 km² (Jochner et al., 2015)) beachtliche Mengen an Schwemmholz befördern können. Deshalb wird für dieses Modell eine deutlich kleinere Mindestgrösse des Einzugsgebietes für den Schwemmholztransport von 0.1 km² angenommen. Gewässerabschnitte mit einem Einzugsbereich kleiner als 0.1 km² werden von dem Gewässernetz also abgezogen. Dies wird mit Hilfe des ArcGIS-Tool „Wassereinzugsgebiet“ basierend auf dem Digitalen Höhenmodell (DTM 2m Raster (swissALTI3D) © 2016 swisstopo (5704 000 000)) getätigt. Zusammen ergibt dies ein Gewässernetz, in das durch diverse Prozesse Holz befördert wird und welches genug Abfluss hat, um dieses Holz weitertransportieren zu können.

3.1.3 Holzvorrat

Der Holzvorrat beruht auf den Daten des Landesforstinventars (LFI) zum Gesamtholzvolumen (Abegg et al., 2014). Darin wird das Schaftholzvolumen aller lebenden und toten Bäumen und Sträucher ab 12 cm Durchmesser (Brusthöhe) nach Forstkreisen angegeben. Die Einzugsgebiete der Grossen Melchaa, der Landquart und der Chiene befinden sich nur in je einem Forstkreis, weshalb der jeweilige Gesamtholzvolumen-Wert übernommen wird. Da sich aber die Einzugsgebiete der Chirel und der Kleinen Emme über 2 bzw. 6 Forstkreise erstrecken, wird für jede Prozessfläche der Gesamtholzvolumen-Wert jenes Forstkreises angenommen, in welcher die entsprechende Fläche liegt (gemäss Tabelle 2).

Tabelle 2: Forstkreise und jeweiliger mittlere Holzvorrat der Testeinzugsgebiete

Einzugsgebiet (Forstkreis)	Mittlerer Holzvorrat [m³/ha]
Grosse Melchaa (Forstkreis OW02)	432.4
Chiene (Forstkreis BE02)	459.7
Landquart (Forstkreis GR01)	344.4
Chirel (Forstkreis BE03)	446.6
Chirel (Forstkreis BE02)	459.7
Kleine Emme (Forstkreis LU03)	524.4
Kleine Emme (Forstkreis LU01)	400.4
Kleine Emme (Forstkreis LU02)	513.6
Kleine Emme (Forstkreis OW02)	432.4
Kleine Emme (Forstkreis OW01)	327.5
Kleine Emme (Forstkreis NW01)	438.7

3.1.4 1. Iteration

3.1.4.1 Gerinneholz

Laut Steeb et al. (2016) macht Totholz im Gerinne einen nicht zu vernachlässigbaren Anteil am gesamten Schwemmholumen aus. Mehrere untersuchte Schweizer Wildbäche nach dem Hochwasser 2005 ergaben gemäss Waldner et al. (2009) einen durchschnittlichen Schwemmholumvorrat im Gerinne von $80 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$. Dieser Wert wird übernommen, allerdings nur für die bewaldete Gerinnelänge. Einerseits kann dies dadurch legitimiert werden, dass Totholz grösstenteils von bewaldeten Flächen stammt, andererseits wird der Wert des durchschnittlichen Schwemmholumvorrates von $80 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$ auch nicht verfälscht, da die dafür untersuchten Wildbäche laut Rickli (2009) durchgängig bewaldet sind und somit gar keine unbewaldeten Abschnitte betrachtet wurden. Um in das Gewässer fallende Bäume zu berücksichtigen, wird ein Puffer von 25 m um das Gewässernetz gelegt. Diese Distanz wurde von (Rimböck & Strobl, 2001) ebenfalls verwendet und als mittlere Baumlänge angenommen. Auch die Analyse des Vegetationshöhenmodells der Schweiz gemäss Ginzler & Hobi (2015) zeigt, dass der mittlere Vegetationshöhenwert ungefähr 25 m beträgt.

3.1.4.2 Seitenerosion

Als mögliche Seitenerosionsflächen werden in der 1. Iteration die modellierten Flutzonen von Aquaprotect (Aquaprotect © 2008 Swiss Re & BAFU) angenommen. Diese stellen mögliche überflutete Gebiete entlang von Flüssen und grösseren Bächen für verschiedene Jährlichkeiten (u. a. HQ50, HQ100 und HQ250) dar. Die Aquaprotect-Zonen mit Jährlichkeit 50 und 250 Jahre werden dabei im Modell zwecks Übereinstimmung den Ereigniswahrscheinlichkeiten HQ30 bzw. HQ300 zugeordnet. Bei kleineren Bächen, für welche im Rahmen von Aquaprotect keine Flutzonen modelliert wurden, werden Puffer von 2 m, 4 m und 8 m (für HQ30, HQ100 resp. HQ300) als Seitenerosionsweite angenommen. Als Schwemmholum relevant werden nur jene Flächen angenommen, welche bewaldet sind. Abbildung 6 zeigt ein Beispiel der visualisierten Seitenerosionsfläche der 1. Iteration.

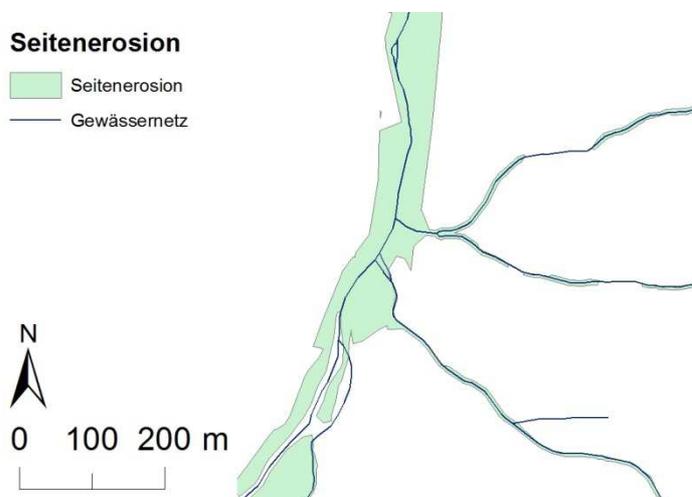


Abbildung 6: Visualisierung der Schwemmholum relevanten Seitenerosionsfläche der 1. Iteration

3.1.4.3 Rutschungen

Die Modellierung der Rutschungs-Prozessflächen basieren auf den Hangmure/Rutschungs-Trajektorien von SilvaProtect (SilvaProtect-CH © 2013 BAFU). Die grosse Nummer an Trajektorien (mehrere 100'000) wird reduziert, indem nur jene für die weitere Modellierung berücksichtigt werden, welche einerseits Waldfläche und andererseits aber auch das Master-GWN schneiden. Weiter wird aber auch ein maximaler Abstand von 100 m des Startpunktes zum Gewässernetz als Bedingung für eine relevante Trajektorie festgelegt. So werden also nur jene Rutschungen für den Schwemmholzeintrag als relevant betrachtet, welche nicht weiter als 100 m vom Fliessgewässer ausgelöst werden. Eine solche Eingrenzung senkrecht zur Uferlinie beruht auf der Schwemmholzstudie Sihl (Flussbau AG, 2009), in welcher die Rutschflächen ebenfalls auf eine maximale Ausdehnung reduziert werden. Eine solche maximale Distanz zum Einflussbereichs der Hochwassers wurde auch von Deplazes (2016) auf 100 m gesetzt. Bestätigt wird diese maximale Distanz zum Gerinne durch die Analyse der Hangmuren in Raetzo & Rickli (2007), welche aufzeigt, dass die Mehrheit der Auslaufstrecken kürzer als 100 m sind oder auch durch Benda & Bigelow (2014), die bei Holzeintrag durch Rutschungen eine maximale Distanz von 105 m zum Gewässer beobachteten. Die übriggebliebenen Trajektorien werden wie bei den Murgängen mit 5 m (HQ30), 10 m (HQ100) und 15 m (HQ300) gepuffert um die Einflussbreite der Rutschungsprozesse anzunehmen. Die Abschätzung dieser Breiten basieren auf den Hangmure-Trajektorien von SilvaProtect, welche einheitlich mit 10 m gepuffert wurden (Losey, 2013). Bestätigt wird die Wahl der Pufferbreite durch die durchschnittliche Breite von Rutschungen aus der Rutschungsdatenbank (McArdell & Rickli, 2017).

3.1.4.4 Murgänge

Die Modellierung der Murgang-Prozessflächen beruht auf den für SilvaProtect berechneten Murgang-Trajektorien (SilvaProtect-CH © 2013 BAFU), welche basierend auf dem Relief und der Lithologie ermittelt wurden (Losey, 2013). Diese zeigen mögliche Fliesswege von Murgängen auf. Die Anzahl dieser Trajektorien in einem

Einzugsgebiet ist mit mehreren 10'000 nicht ganz so hoch wie bei den Rutschungen. Wiederum werden aber nur die Trajektorien berücksichtigt, welche eine Waldfläche sowie auch das Master-GWN 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 aufzeigen soll. Für das Projekt SilvaProtect wurden die Murgang-Trajektorien wie die Hangmuren mit 10 m gepuffert (Losey, 2013). Deshalb



Abbildung 7: Visualisierung der Schwemmholz relevanten Murgang- und Rutschungsflächen

wird die Pufferbreite wie bei den Rutschungen für ein 30-jährliches Ereignis auf 5 m, für ein 100-jährliches auf 10 m und für ein 300-jährliches auf 15 m geschätzt. Abbildung 7 zeigt ein Beispiel zur Visualisierung der bewaldeten potentiellen Murgang- und Rutschungsflächen.

3.1.5 2. Iteration

3.1.5.1 Gerinnebreite

Als Grundlage für die Bestimmung der Gerinnebreite diente die mittlere Sohlenbreite des Datensatzes Ökomorphologie Stufe F (BAFU 2008: Datenbank Ökomorphologie Stufe F). Diese war jedoch nur für etwa einen Drittel des gesamten Schweizer Gewässernetzes erfasst worden. Die Sohlenbreite der restlichen Gewässerabschnitte wird anhand der bereits vorhandenen Werte ermittelt. Dabei werden die bekannten Sohlenbreiten in mehrere Klassen nach unterschiedlichen Flussordnungszahlen (FLOZ 1-9) und 13 Höhenbereichen unterteilt. Die oberste Höhenbereichsklasse wird bei 2500 m.ü.M. angesetzt, da die Waldgrenze in der Schweiz maximal auf dieser Höhe liegt (Hagedorn et al., 2006) und höher gelegene Gewässer somit keinen Einfluss auf das Schwemmholtzvorkommen haben. Der nach der Gerinnelänge gewichtete Mittelwert der verschiedenen Klassen wird als Sohlenbreite für die restlichen Gewässerabschnitte mit der entsprechenden FLOZ und Höhenklasse übernommen (siehe Tabelle 3). Da Fliessgewässer mit hoher FLOZ ab einer gewissen Höhe fehlen, werden für diese Klassen keine Werte ermittelt.

Tabelle 3: Gerinnebreite gemäss Höhenklasse und FLOZ

		Höhenklassen												
		> 300	300 - 500	500 - 700	700 - 900	900 - 1100	1100 - 1300	1300 - 1500	1500 - 1700	1700 - 1900	1900 - 2100	2100 - 2300	2300 - 2500	> 2500
FLOZ	1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.5	2.5	2.5	3.5	4.0	4.5	10.5	12.0
	2	3.0	2.0	2.0	2.0	2.5	3.5	4.0	4.5	4.0	7.0	8.5	12.0	14.0
	3	5.0	3.0	3.5	4.0	5.0	6.5	7.0	7.0	8.0	9.5	12.0	11.0	10.5
	4	6.5	5.0	5.5	8.5	11.0	14.5	13.5	13.5	16.0	16.0	18.0	15.5	-
	5	12.5	12.5	16.0	17.0	17.5	21.5	24.0	20.0	17.0	17.5	25.0	-	-
	6	17.5	16.5	26.0	31.5	28.5	22.0	25.0	25.0	-	-	-	-	-
	7	43.0	36.5	40.0	17.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8	-	75.0	96.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	110.0	76.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.1.5.2 Gerinneholz

In der 2. Iteration werden zwei Ansätze getestet, um den Vorrat an Gerinneholz zu bestimmen. Beide Methoden berechnen den Vorrat pro Gerinnefläche, welche durch die Multiplikation der Länge des Gewässerabschnitts mit der mittleren Sohlenbreite bestimmt wird. Angegeben wird der Gerinneholzvorrat dabei in m³/ha.

Im ersten Vorgehen werden die Medianwerte des spezifischen Schwemmholtzvorrates in Flussbetten

(siehe Tabelle 4) gemäss Ruiz-Villanueva et al. (2016) übernommen. Sie fassen Daten zum Gerinneholzvorrat aus verschiedenen Studien zusammen und differenzieren zwischen drei Gerinnebreite-Kategorien:

Tabelle 4: Schwemmholz-Vorrat unterteilt nach Gerinnebreite (gemäss Ruiz-Villanueva et al. (2016))

Gerinnebreite	Schwemmholz-Vorrat (Median)
< 5 m	230 m ³ /ha
5-10 m	155 m ³ /ha
> 10 m	60 m ³ /ha

Die Multiplikation dieser Werte mit der jeweiligen Gerinnefläche ergibt das potentielle Gerinneholzvolumen. Allerdings wird dies nur für jene Gewässernetzabschnitte berechnet, welche weniger als 25 Meter von Waldgebiet entfernt sind. Diese Länge kann als mittlere Baumhöhe angenommen werden, was zur Folge hat, dass der Baum beim Umfallen im Einflussbereich des Gewässers zu liegen kommt (Rimböck & Strobl, 2001).

Auch der zweite Ansatz basiert auf der Breite des Gerinnes, indem für die Berechnung des Holzvolumens innerhalb des Gerinnes die Gleichung (1) von Gurnell (2013) verwendet wird:

$$\mathbf{Wood\ Volume = 231\ (width)^{-0.271}} \quad (1)$$

Auch bei dieser Methode wird das Gerinneholzvolumen nur für die Gewässernetzabschnitte mit einem maximalen Abstand von 25 Metern zum Wald berechnet.

3.1.5.3 Seitenerosion

In der 2. Iteration werden die potentiellen Seitenerosionsflächen mit einer Pufferbreite abhängig von der Gerinnebreite modelliert. Gemäss Bachmann Walker (2012) besteht ein Zusammenhang zwischen Gerinne- und Erosionsbreite. Basierend auf den Studien von Hunzinger & Durrer (2009) und Bachmann Walker (2012) werden folgende Verhältnisse (Tabelle 5) zwischen maximaler Rückgriffweite der Seitenerosion und Gerinnebreite für die unterschiedlichen Jährlichkeiten festgelegt:

Tabelle 5: Verhältnis maximaler Rückgriffweite - Gerinnebreite nach Jährlichkeit

Jährlichkeit	Verhältnis Rückgriffweite – Gerinnebreite
30	1.5 : 1
100	3 : 1
300	4 : 1

Da Seitenerosion auf beiden Seiten eines Gewässers möglich ist, wird das Gerinne beidseitig mit der Rückgriffweite gepuffert. Als für Eintrag von Schwemmholz relevant werden nur die bewaldeten Flächen angenommen.

Ein visualisiertes Beispiel des Gerinnes und der bewaldeten potentiellen Seitenerosionsfläche der 2. Iteration ist in Abbildung 8 gegeben.

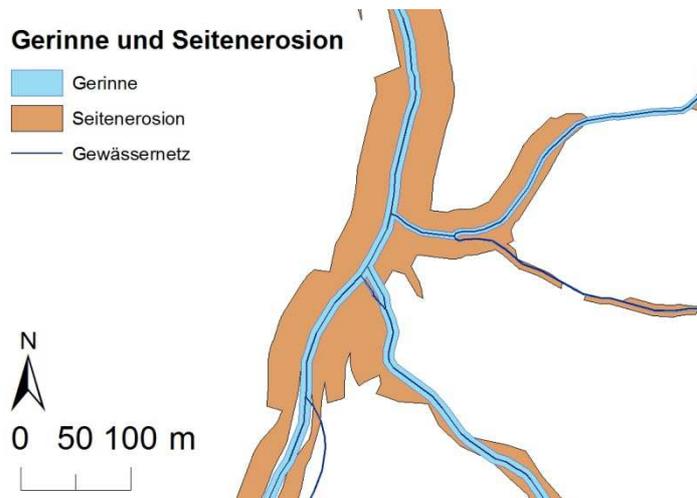


Abbildung 8: Visualisierung der Schwemmholz relevanten Gerinne- und Seitenerosionsfläche der 2. Iteration

3.1.5.4 Rutschungen

Die Rutschungs-Prozessflächen werden ebenfalls in der 2. Iteration gleich wie in der 1. Iteration modelliert.

3.1.5.5 Murgänge

Die Murgangs-Prozessflächen werden in der 2. Iteration gleich wie in der 1. Iteration modelliert.

3.1.6 Zusammenführung der Prozessflächen

Die einzeln ausgeschiedenen Prozessflächen überschneiden sich teilweise. Deshalb muss eine Prioritätenreihenfolge bestimmt werden, damit solche Überschneidungsflächen nicht mehrfach gezählt werden. Diese wird wie folgt definiert: Gerinne > Murgang > Seitenerosion > Rutschung. Somit werden also zum Beispiel Überschneidungsflächen von Murgängen und Seitenerosion der Prozessfläche Murgang zugeteilt. Da der Vorrat an Gerinneholz in der 1. Iteration auf Grund der Gerinnelänge und nicht der Fläche bestimmt wird, spielt in diesem Fall das Gerinne bei der Zusammenführung der Prozessflächen keine Rolle.

Abbildung 9 bis Abbildung 11 zeigen visualisierte Beispiele der Ermittlung der Schwemmholz relevanten Eintragsflächen. Dabei handelt es sich um die Modellierungen der 2. Iteration in einem Ausschnitt des Einzugsgebietes der Grossen Melchaa. Abbildung 9 stellt die gesamten Eintragsflächen der verschiedenen Prozesse dar. Im Verschnitt mit der Waldfläche (Abbildung 10) ergibt dies die potentiellen Schwemmholzeintragsflächen (Abbildung 11).

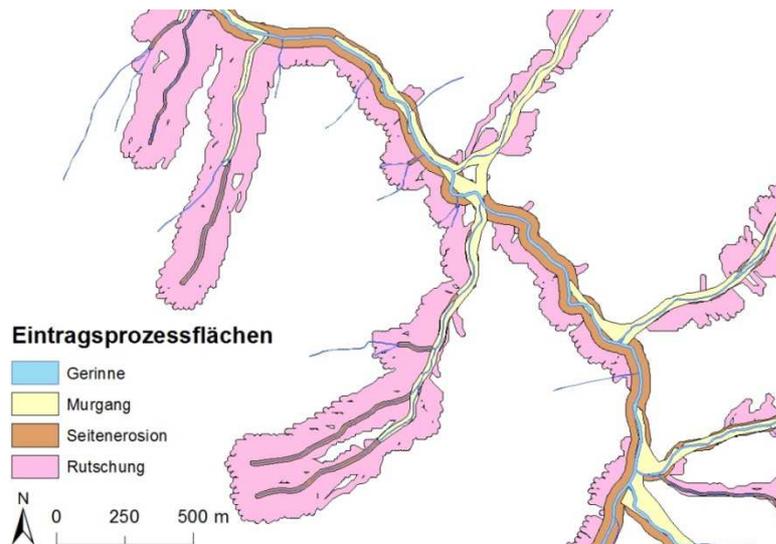


Abbildung 9: Visualisierung der gesamten modellierten Schwemmholzeintragsprozessflächen



Abbildung 10: Visualisierung der Waldfläche und des Gerinnenetzes

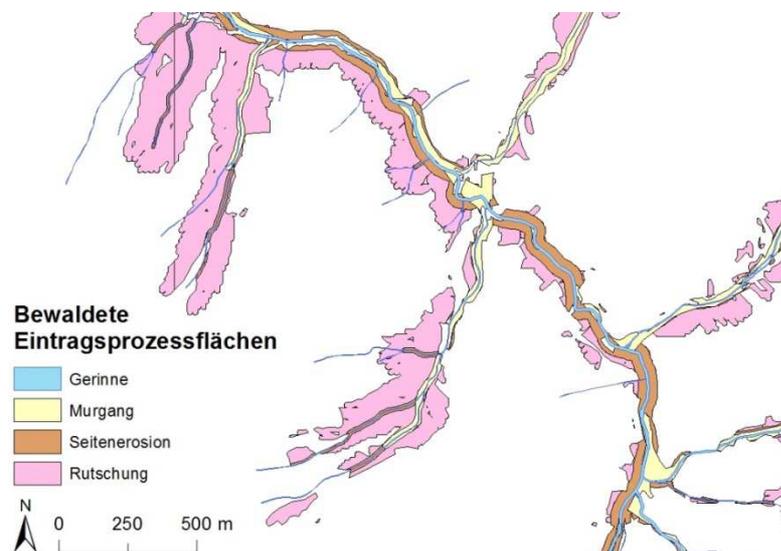


Abbildung 11: Visualisierung der bewaldeten modellierten Schwemmholzeintragsprozessflächen

3.2 Abminderungsfaktoren

Bei einem Unwetter ist es unwahrscheinlich, dass das gesamte potentielle Schwemmholumen in das Gewässer eingebracht 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 (auch: Reduktionsfaktor) beschrieben, welcher den Anteil der effektiv eingetragenen Schwemmholumenge am Potential angibt. Dabei kann der Abminderungsfaktor von verschiedenen Gegebenheiten abhängig sein, wie beispielsweise von der Art des Eintragsprozesses, Niederschlagsereignis, Vegetation oder Geomorphologie (Hunziker, 2017; Ruiz-Villanueva et al., 2014). Unterschiedliche Abminderungsfaktoren aus verschiedenen Berichten und Arbeiten werden miteinander verglichen und auf die in dieser Arbeit berechneten Schwemmholumpotentiale der fünf Testeinzugsgebiete angewendet.

3.2.1 Abminderungsfaktoren aus der Literatur

Mächler (2009) ermittelt in seiner Arbeit empirisch den Faktor Erwartungsreduktion, indem er das modellierte Schwemmholumpotential durch Rutschungen mit den effektiven Mengen in ein Verhältnis setzt. Dabei bestimmt er Abminderungsfaktoren von 0.01 % für die Kleine Emme und 0.5 % für die Grosse Melchaa.

Hunziker (2017) verwendet in der Untersuchung zum Schwemmholumaufkommen im Einzugsgebiet der Zulg verschiedene Abminderungsfaktoren abhängig vom Mobilisierungsprozess sowie dem Niederschlagsereignis. Für Seitenerosion variiert der Faktor zwischen 2 und 10 % bei Gewitter und zwischen 3 und 12 % bei Dauerregen, für Hangmuren zwischen 0 und 0.05 % bei Gewitter und zwischen 0.015 und 0.15 % bei Dauerregen. Für die Anwendung der Abminderungsfaktoren aus der Literatur auf die Resultate der GIS-Analyse in den fünf Testeinzugsgebieten wird sowohl für Rutschungen wie auch Murgänge der Wert von Hangmuren gemäss Hunziker (2017) übernommen. Totholz respektive Gerinneholz wird in jener Studie nicht berücksichtigt.

In der Masterarbeit von Deplazes (2016) über das Schwemmholumvolumen in den Zuflüssen des Thunersees werden für die verschiedenen Prozesse unterschiedliche Abminderungsfaktoren gewählt. Der Faktor für die Mobilisierung des Gerinneholzes wird als „Transport/Umlagerung“ bezeichnet und ist abhängig von der Gerinnebreite. Ist das Gewässer schmaler als zwei Meter, wird angenommen, dass gar kein Holz mitgerissen wird, ist es grösser, nimmt die Reduktion mit zunehmender Gerinnebreite ab bis zu einem Abminderungsfaktor von 20 %. Ebenfalls abnehmend ist die Reduktion bei der Seitenerosion bei zunehmender Gewässerbreite. Zusätzlich hat aber auch der Untergrund des Gerinnes einen Einfluss. Dabei wird zwischen Gerinne im Lockermaterial, Blockgerinne und Gerinne im Fels unterschieden. Für Letzteres wird die Seitenerosion gleich Null gesetzt, während bei den anderen zwei Untergrundbedingungen die Abminderungsfaktoren sich zwischen 0.375 und 52.5 % (bei einem Holzvorrat von 400 m³/ha) bewegen. Die Reduktionsfaktoren für Hangmuren betragen je nach Jährlichkeit (30, 100, 300) 1.5, 3.3 oder 5.7 %. Ausserdem werden auch Abminderungsfaktoren für den

Schwemmhölzeintrag durch andere Prozesse wie Lawinen oder Steinschlag vorgeschlagen. Für die Anwendung der Faktoren auf die modellierten Schwemmhölzpotentiale wird für die Seitenerosion ein Mittel der verschiedenen Untergrundbedingungen übernommen. Für die Reduktion des Schwemmhölzpotentials durch Murgänge wird der Faktor für Hangmuren gemäss Deplazes (2016) benützt. Bei der Anwendung der Abminderungsfaktoren auf das Potential durch Gerinneholz und Seitenerosion wird unterschieden zwischen den verschiedenen Gerinnebreiten.

In der Schwemmhölzstudie Sihl der Flussbau AG (2009) werden Abminderungsfaktoren zwischen 5 und 15 % angenommen, bedingt durch die Jährlichkeit des Niederschlagsereignis.

Durch den Vergleich des berechneten Gesamtpotentials am Erlenbach (SZ) und den effektiven Schwemmhölzvolumen während der Hochwasserereignissen 1984 und 1995, ermittelte Gerber (2015) einen Abminderungsfaktor von 29 bzw. 13 %.

Von Glutz (2011) verwendet bei der Berechnung des Schwemmhölzpotentials für den Steiglebach (LU) und den Steinibach (LU) unterschiedliche Abminderungsfaktoren für die verschiedenen Eintragsprozesse. Für die Anwendung der Abminderungsfaktoren auf die modellierten potentiellen Schwemmhölzvolumen der Testeinzugsgebiete wird für die Seitenerosion, Rutschungen und Murgänge der Abminderungsfaktor für Erosion/Rutschungen übernommen, welcher 40 % beträgt. Für das Gerinneholz wird der Abminderungsfaktor für Totholz genutzt, der bei 2.5 % liegt.

Schalko et al. (2016) nehmen für ihre Schwemmhölzrisikoabschätzung am Renggbach (LU) einen Abminderungsfaktor von 40 % für den gesamten potentiellen Schwemmhölzeintrag an.

Auch Rimböck & Strobl (2001) verwenden die Prozessklassen Erosion/Rutschung und Totholz, welche wiederum gleich wie bei Von Glutz (2011) übernommen werden. Allerdings beträgt der Abminderungsfaktor in dieser Studie für Erosion/Rutschung 80 % und für Totholz 1.5 %.

In der Schwemmhölzuntersuchung am Riemenstaldnerbach (SZ & UR) von der Duwaplan GmbH (1999) wird zwischen 100 % (alles Holz wird mobilisiert), 50 % (die Hälfte der Holzmenge wird mobilisiert), 10 % (geringe Holzmenge wird mobilisiert) und 0 % (kein Holz wird mobilisiert) unterschieden.

Für die GIS-Analyse zur Bestimmung des potentiell verfügbaren Schwemmhölzes von Ruiz-Villanueva et al. (2014) wurde der „volume correction factor“ definiert, welcher gleichbedeutend mit einer Eintragungswahrscheinlichkeit ist. Dieser Faktor beträgt 10, 50 oder 100 %.

Wie oben bereits erwähnt, werden diese verschiedenen Abminderungsfaktoren aus der Literatur (zusammengefasst in Tabelle 6) auf die modellierten Schwemmhölzvolumen in den fünf Testeinzugsgebieten angewendet. Schlägt ein Bericht oder eine Arbeit mehr als einen Abminderungsfaktor vor, so wird zwischen Minimum (eher grosser Reduktion), Mittel (mittlere Reduktion) und Maximum (eher geringe Reduktion) unterschieden.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Abminderungsfaktoren aus der Literatur

	Minimum	Mittel	Maximum
Mächler (2009)	0.01%		0.50%
Hunziker (2017)	<u>Gewitter</u> Seitenerosion: 5 % Rutschung: 0.025 % Murgang: 0.025 %		<u>Dauerregen</u> Seitenerosion: 6 % Rutschung: 0.05 % Murgang: 0.05 %
Deplazes (2016)	Gerinneholz: 0 - 20 % Seitenerosion: 0 -52.5 % Rutschung: 1.5 % Murgang: 1.5 %	Gerinneholz: 0 - 20 % Seitenerosion: 0 -52.5 % Rutschung: 3.3 % Murgang: 3.3 %	Gerinneholz: 0 - 20 % Seitenerosion: 0 -52.5 % Rutschung: 5.7 % Murgang: 5.7 %
Flussbau AG (2009)	5%	10%	15%
Gerber (2015)	13%		29%
von Glutz (2011)		Gerinneholz: 2.5 % Seitenerosion: 40 % Rutschung: 40 % Murgang: 40 %	
Schalko et al. (2016)		40%	
Rimböck & Strobl (2001)		Gerinneholz: 1.5 % Seitenerosion: 80 % Rutschung: 80 % Murgang: 80 %	
Duwaplan GmbH (1999)	10%	50%	100%
Ruiz-Villanueva et al. (2014)	10%	50%	100%

3.2.2 Quantifizierung der Abminderungsfaktoren

Um die berechneten Teilpotentiale in den Zusammenhang mit dem effektiven Schwemmhohlvolumen zu setzen, werden für jeden Prozess eigene Abminderungsfaktoren quantifiziert. Diese werden einerseits aus Erfahrungswerten aus der Literatur, andererseits aber auch aus Analysen von vergangenen Naturereignissen ermittelt.

3.2.2.1 Gerinneholz

Für die Reduktion des Schwemmhohleintrages durch Gerinneholz werden von Steeb et al. (2017) die Werte des Korrekturfaktors c_m übernommen, welcher für den Anteil an mobilisiertem Totholz steht. Diese Werte wurden für die Wildbäche, den Oberlauf und den Unterlauf in den Einzugsgebieten der Kander, Kleinen Emme/Reuss, Landquart sowie der Grossen Melchaa bestimmt und variieren zwischen 5 und 50 %.

3.2.2.2 Seitenerosion

Die Quantifizierung der Abminderungsfaktoren für den Eintrag durch Seitenerosion basiert auf der Ereignisanalyse von Hunzinger & Durrer (2009) und der Masterarbeit von Bachmann Walker (2012). Bei beiden Studien wurden zahlreiche Erosionsstellen in unterschiedlichen Schweizer Flüssen von verschiedenen Hochwasserereignissen dokumentiert. Die Fläche dieser Erosionsstellen (Erosionsbreite \times Erosionslänge) (in Abbildung 12: braune Punkte) wird mit der modellierten bewaldeten Prozessfläche (in Abbildung 12: grüne Fläche) verglichen. Die Modellierung der Seitenerosionsflächen wurde dabei gemäss der im Kapitel 3.1.5.3 beschriebenen Methode berechnet, allerdings nur für jene Abschnitte in welchen Erosionsstellen dokumentiert sind (in Abbildung 12: Ausschnitt der Karte). Das Produkt des Anteils der dokumentierten

Seitenerosionsfläche an der modellierten potentiellen Fläche und des Anteils Waldfläche an der modellierten potentiellen Fläche ergibt den Reduktionswert des Schwemmholtzpotentials.

Die Jährlichkeit der Modellierung wird entsprechend der Angabe zur Wiederkehrperiode der dokumentierten Erosionsstellen für jeden Fluss neu bestimmt. Dabei werden diese eher vorsichtig gewählt, damit sich nicht zu kleine Abminderungsfaktoren ergeben. So wird zum Beispiel die Wiederkehrperiode 30-100 Jahre von Bachmann Walker (2012) gemäss HQ30 modelliert, 100-300 Jahre wird zu HQ100 und nur EHQ (Extremhochwasser) zu HQ300. Nach gleichem Muster werden die Wiederkehrperioden von Hunzinger & Durrer (2009) übernommen.

3.2.2.3 Rutschungen

Die Abminderungsfaktoren für den Eintrag durch Rutschungen werden mit zwei verschiedenen Ansätzen ermittelt. Der Ansatz „Rutschungsdatenbank“ ergibt Prozentzahlen, welche wie bei den anderen Prozessen direkt auf das errechnete Teilpotential angewendet werden können. Beim „von Ruette“-Ansatz resultieren hingegen Prozentsätze, welche im statistischen Modell von Von Ruette et al. (2011) als Grenzwert zwischen Rutschung und Nicht-Rutschung dienen.

Ansatz „Rutschungsdatenbank“

Bei diesem Ansatz werden die Rutschungsflächen aus der Rutschungsdatenbank (McArdell & Rickli, 2017) mit den modellierten Rutschungsflächen der gleichen Perimeter verglichen. Die Rutschungsda-

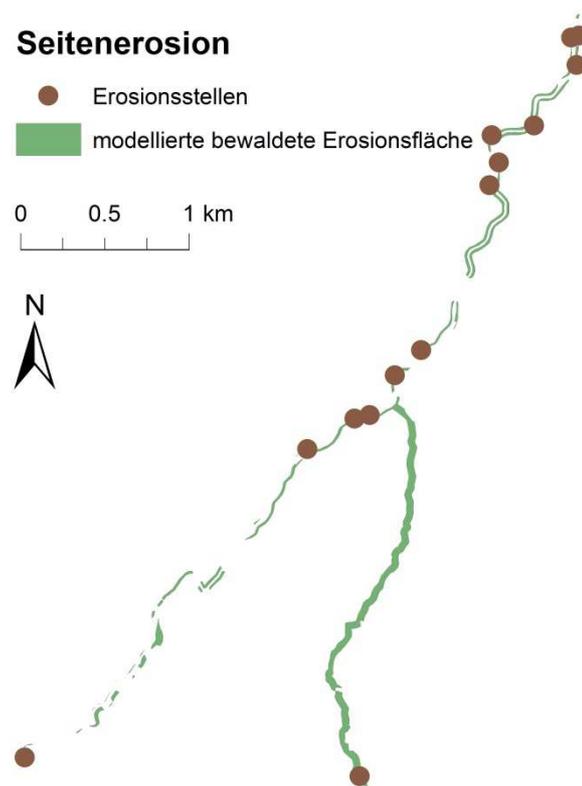


Abbildung 12: Vergleich der Erosionsstellen (gemäss Bachmann Walker (2012)) mit den modellierten bewaldeten Erosionsflächen am Beispiel der Chirel

tenbank dokumentiert flachgründige Rutschungen und Hangmuren von vergangenen Unwettern in der Schweiz. Für die Quantifizierung der Abminderungsfaktoren werden folgende sieben Forschungsperimeter berücksichtigt: Sachseln 1997, Appenzell 2002, Napf 2002, Entlebuch 2005, Prättigau 2005, Napf 2005, Eriz 2012. Die Jährlichkeiten für die Modellierung der Rutschungsfläche werden anhand der Ereignisanalysen von Rickli (2001), Rickli & Bucher (2003) und Rotach et al. (2007) bestimmt bzw. geschätzt für den Perimeter Eriz 2012. Als Resultat ergeben sich die Anteile der dokumentierten Rutschungsfläche an der modellierten Rutschungsfläche, welche zu den Abminderungsfaktoren zusammengesfasst werden.

Ansatz „von Ruette“

Dieser Ansatz beruht auf dem statistischen Modell von Von Ruette et al. (2011), mit welchem das räumliche Vorkommen von Hangrutschungen modelliert wird. Dabei wird jeder Rasterwert mit der inversen Distanz zum Gerinne gemäss dem Modell „DFdelivery“ von Böckli et al. (2015) gewichtet. Als Resultat des Modells entstehen Rasterkarten, bei welchen für jedes Pixel die Wahrscheinlichkeit einer möglichen Rutschung angegeben wird. Für die Quantifizierung der Abminderungsfaktoren wird dieses Modell auf die gleichen sieben Perimeter angewendet wie im „Rutschungsdatenbank“-Ansatz und die Resultate mit den jeweiligen effektiven Rutschungsflächen aus der Rutschungsdatenbank

verglichen.

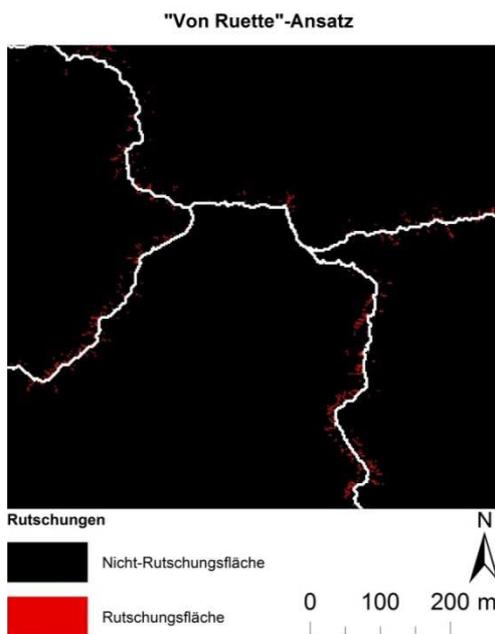


Abbildung 14: Resultierende Rutschungskarte im Perimeter Appenzell 2002

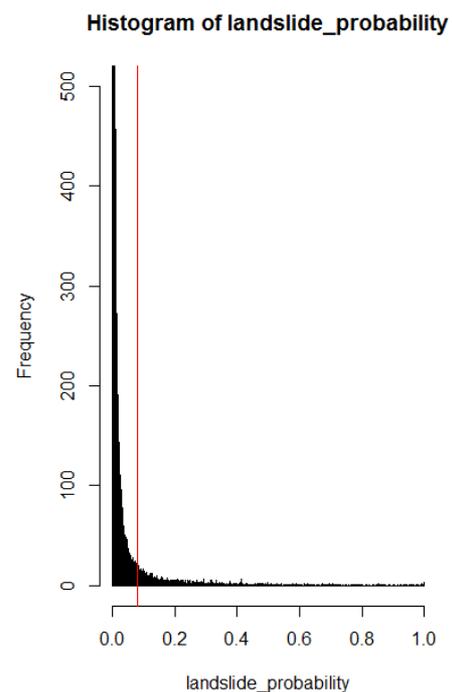


Abbildung 13: Häufigkeitsverteilung der Rutschungswahrscheinlichkeiten der Pixel im Perimeter Appenzell 2002

Die Anzahl der Pixel mit der höchsten Rutschungswahrscheinlichkeit, welche zusammen die gleiche Fläche wie die effektiven Rutschungen haben, werden als mögliche „Rutschungsflächen“ betrachtet (in Abbildung 13: Fläche rechts der roten Linie). Die restlichen Pixel werden als „Nicht-Rutschungsflächen“ aufgefasst (in Abbildung 13: Fläche links der roten Linie). Jener Pixel in der Klasse „Nicht-Rutschungsfläche“ mit der höchsten Wahrscheinlichkeit ist für den Grenzwert zwischen „Rutschungsfläche“ und der „Nicht-Rutschungsfläche“ verantwortlich

(in Abbildung 13: rote Linie). Das Verhältnis vom Wahrscheinlichkeitswert dieses Pixels zum höchsten Wert ergibt

den Abminderungsfaktor. Im Gegensatz zu den anderen Prozessen, reduziert bei diesem Ansatz der Abminderungsfaktor also nicht die finale Fläche, sondern die Prozentzahl wird auf die höchste Rutschungswahrscheinlichkeit angewendet. Die Pixel mit einer höheren Wahrscheinlichkeit als der Abminderungsfaktor werden der „Rutschungsfläche“, jene unter diesem Faktor der „Nicht-Rutschungsfläche“ zugeordnet. Somit gilt also, je kleiner der Prozentwert, desto grösser die Rutschungsfläche. Mit diesem Ansatz kann neben der Fläche der „Rutschungsfläche“-Pixel auch deren räumliche Verteilung ermittelt werden (siehe Abbildung 14).

3.2.2.4 Murgänge

Grundsätzlich kann angenommen werden, dass das meiste Holz in einem Gerinne bei einem Murgang mittransportiert wird (Mazzorana et al., 2009). Allerdings ist es sehr unwahrscheinlich, dass in allen modellierten Murgangrinnen auch wirklich Ereignisse ausgelöst werden. Die Abminderungsfaktoren für den Schwemmholzeintrag durch Murgänge basieren deshalb auf dem prozentualen Anteil der aktiven Wildbäche am gesamten Gebirgsflusseinzugsgebiet zufolge Rickenmann et al. (2008). Dieser Wert gibt den Anteil an Wildbächen an, in welchen beim Hochwasser 2005 Murgänge oder Geschiebetransport stattfanden. Die Werte bewegen sich zwischen 11 und 19 %, was Rickenmann et al. (2008) darauf schliessen lässt, dass der Anteil an aktiven Wildbächen bei ca. 10 % oder etwas darüber liegt.

3.3 GIS-Modell

Mit Hilfe des ModelBuilders von ArcGIS wird ein ArcGIS-Tool generiert, welches das Modellieren des potentiellen Schwemmholzvolumens automatisiert. Folgende Inputvariablen werden dabei benötigt: Einzugsgebietsfläche, Waldfläche, master-GWN, Karte der Forstkreise (LFI), Murgang-Trajektorien (SilvaProtect), Hangmure-Trajektorien (SilvaProtect), Digitales Höhenmodell.

Als Output werden die Gerinnefläche und die potentiellen Prozessflächen des Schwemmholzeintrages durch Murgänge, Rutschungen und Seitenerosion modelliert sowie das Gesamtpotential wie auch die Teilpotentiale der verschiedenen Eintragsprozesse berechnet (in m^3). Zusätzlich resultieren als Output auch die potentiellen Eintragsflächen der verschiedenen Prozesse (in m^2), das potentielle Schwemmholzvolumen von Grün- bzw. Totholz (in m^3) sowie die Anzahl potentielle eingetragener Baumstämme und deren Aufteilung in Grün- und Totholz. Die Anzahl eingetragener Baumstämme wird in dieser Arbeit allerdings nicht weiter behandelt. Alle Resultate werden für ein schwaches (HQ30), ein mittleres (HQ100) und ein extremes Ereignis (HQ300) erzeugt. Die Input- und Output-Variablen sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Der Aufbau des Modells ist im Anhang 1 schematisch illustriert.

Tabelle 7: Beschreibung der Input- und Output-Variablen des GIS-Modells

Input-Variablen	
Einzugsgebiet	Polygon-Shapefile des Einzugsgebietes
Digitales Höhenmodell	Digitales Höhenmodell (Raster Datensatz)
master Gewässernetz	Schwemmholtz relevantes Gewässernetz (Polyline-Shapefile)
Waldfläche Schweiz	Polygon-Shapefile der Waldfläche
Forstkreise LFI	Polygon-Shapefile der Forstkreise
Hangmure-Trajektorien	Hangmure-Trajektorien gemäss SilvaProtect (Polyline-Shapefile)
Murgang-Trajektorien	Murgang-Trajektorien gemäss SilvaProtect (Polyline-Shapefile)
Output-Variablen	
Schwemmholtzpotential_HQ30 (und HQ100, HQ300)	Tabelle: Gesamtpotential + Potentiale der Prozesse; potentielle Eintragsflächen der Prozesse; Tot- und Grünholzvolumen; Anzahl Stämme (Gesamt, Tot, Lebendig)
Gerinne	Fläche des Gerinnes
Murgang_HQ30 (und HQ100, HQ300)	Potentielle Eintragsflächen durch Murgang für HQ30, 100 und 300 (zusammengeführt)
Murgang_HQ30_gesamte_Flaeche_bewaldet (und HQ100, HQ300)	Potentielle Eintragsflächen durch Murgang für HQ30, 100 und 300 (gesamte Fläche)
Rutschung_HQ30 (und HQ100, HQ300)	Potentielle Eintragsflächen durch Rutschung für HQ30, 100 und 300 (zusammengeführt)
Rutschung_HQ30_gesamte_Flaeche_bewaldet (und HQ100, HQ300)	Potentielle Eintragsflächen durch Rutschung für HQ30, 100 und 300 (gesamte Fläche)
Seitenerosion_HQ30	Potentielle Eintragsflächen durch Seitenerosion für HQ30, 100 und 300 (zusammengeführt)
Seitenerosion_HQ30_gesamte_Flaeche_bewaldet (und HQ100, HQ300)	Potentielle Eintragsflächen durch Seitenerosion für HQ30, 100 und 300 (gesamte Fläche)

Die automatische Berechnung des GIS-Modells basiert auf der manuell und iterativ ermittelten Berechnungsmethode, welche weiter oben beschrieben ist. Wenige Schritte sind im GIS-Modell jedoch leicht abgeändert im Vergleich zur manuellen Modellierung.

So beträgt der maximale Abstand des Anfangspunktes der Rutschung-Trajektorien im GIS-Modell 100m zur Gerinnefläche und nicht zum Gerinnenetz. Weiter werden im GIS-Modell nur die Murgang- und Hangmure-Trajektorien berücksichtigt, welche die Gerinnefläche schneiden. In der manuellen Modellierung musste die Trajektorie hingegen das Gerinnenetz schneiden.

Ausserdem mussten auch einige Schritte auf Grund der Automatisierung geändert werden. In der manuellen Modellierung wurde beim Entfernen von Einzugsgebieten, welche kleiner als 0.1 km² sind, von Hand geholfen. Dies muss in einem automatisierten Prozess weggelassen werden. Weiter können die zahlreichen Teilflächen des Gerinnes im GIS-Modell nicht zusammengeführt werden, da sonst die variierenden Gerinnebreiten fehlen, welche zur Berechnung des potentiellen Gerinneholzvolumens

notwendig sind. Dies führt dazu, dass winzige Flächen überlappen und so mehrfach gezählt werden. Ausserdem brachte das Zusammenführen der gepufferten Murgang- und Hangmure-Trajektorien enorm lange Rechenzeiten und teilweise sogar Abbrüche der Software mit sich. Dieses Problem wurde im GIS-Modell gelöst, indem die Polygone in Raster umgewandelt werden und danach wieder zurück in ein Shapefile.

Durch diese kleinen Änderungen der Berechnungsschritte im GIS-Modell im Vergleich zur manuellen Modellierung, resultieren beim GIS-Modell leicht höhere Ergebnisse für die fünf Testeinzugsgebiete. Grundsätzlich sind diese Unterschiede unbedeutend. Ausnahme ist die Kleine Emme, bei welcher das GIS-Modell einen deutlich grösseren Schwemmhölzeintrag durch Rutschungen modelliert. Eine Analyse der Rutschungsflächen ergab, dass dies hauptsächlich auf die von Hand gelöschten Gerinnenetzabschnitte bei der manuellen Modellierung zurückzuführen ist.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit, werden die Ergebnisse der manuellen Modellierung verwendet. Die berechneten Werte des GIS-Modells für die fünf Testeinzugsgebiete sind im Anhang 3 ebenfalls dokumentiert.

3.4 Validierung des GIS-Modells und der Abminderungsfaktoren

Das GIS-Modell wird auf die fünf weiteren Einzugsgebiete (Sundgraben, Zulg, Secklisbach, Schächen und Saltina) angewendet um deren Schwemmhölzpotential zu berechnen. Die resultierenden Volumen werden durch die quantifizierten Abminderungsfaktoren reduziert. Die erhaltenen Schwemmhölzmengen werden mit den bei vergangenen Ereignissen effektiv mobilisierten Schwemmhölzmengen verglichen. So sollen das GIS-Modell und die Abminderungsfaktoren validiert werden.

3.5 Zusammenhang der Schwemmhölzmenge mit anderen Variablen

Um einen Überblick über den Zusammenhang der effektiven Schwemmhölzmenge mit Charakteristika des Einzugsgebietes oder des Unwetters zu erhalten, werden Daten von zahlreichen vergangenen Hochwasserereignissen mit Schwemmhölzanfall aus der Schwemmhölzdatenbank (Steeb, 2017) analysiert. Insgesamt sind dies 196 Ereignisse, mehrheitlich aus der Schweiz, aber auch aus Italien, Frankreich, Deutschland und Japan. Beim effektiven Schwemmhölzvolumen handelt es sich um das Festvolumen. Als Charakteristika werden die Einzugsgebietsfläche, die Gerinnelänge, die bewaldete Gerinnelänge, die absolute Waldfläche, die mittleren Höhenlage des Einzugsgebietes, die Wasserfracht des Hochwassers sowie die mittlere Niederschlagsintensität über die Ereignisdauer berücksichtigt. Mit einer Rangkorrelationsanalyse nach Spearman mit der Software SPSS wird der lineare Zusammenhang zwischen der Schwemmhölzmenge und den Charakteristika einzeln berechnet. Diese Rangkorrelationsanalyse wird basierend auf der Rangordnung der beiden Variablen der Korrelationskoeffizient r berechnet. Ist dieser grösser als null, besteht ein positiver linearer Zusammenhang; ist er kleiner als null, so liegt ein negativer linearer Zusammenhang vor (Universität Zürich, 2016). Je grösser der Betrag des Korrelationskoeffizienten, desto stärker ist der Effekt: $r=0.1$ entspricht dabei einem schwachen, $r=0.3$ einem mittleren und $r=0.5$ einem starken Effekt (Cohen, 1992).

4 Resultate

In diesem Kapitel werden die erhaltenen Resultate dargestellt und beschrieben.

4.1 Modellierung

4.1.1 1. Iteration

4.1.1.1 Testeinzugsgebiete

Tabelle 8 bis Tabelle 12 zeigen die potentiellen Schwemmhölzeintragsflächen, welche der Schnittfläche der verschiedenen Prozessflächen und der Waldgebiete entsprechen, sowie das daraus berechnete Schwemmhölzpotential. Unterschieden wird nebst den unterschiedlichen Prozessen auch zwischen den Ereignisintensitäten (HQ30, HQ100, HQ300). Dabei handelt es sich um die zusammengeführten Flächen, bei welchen wie oben beschrieben die Überschneidungen bereits abgezogen wurden und somit keine Fläche mehrfach gezählt wird. Da die Berechnung des Gerinneholzes in der 1. Iteration auf der bewaldeten Gerinnelänge basiert, wird für diesen Eintrag keine Fläche angegeben.

Grosse Melchaa

Tabelle 8: Potentielle Schwemmhölzeintragsflächen und -volumen im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa (1. Iteration)

	HQ30		HQ100		HQ300	
	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)
Gerinneholz	-	4'074	-	4'074	-	4'074
Seitenerosion	0.38	16'610	0.48	20'891	0.65	28'107
Rutschung	2.18	94'068	2.52	108'824	2.58	111'490
Murgang	0.76	32'951	1.04	45'039	1.31	56'786
Total	3.32	147'703	4.04	178'828	4.54	200'457

Die Modellierung der Prozessflächen ergibt im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa eine potentielle Eintragsfläche von ca. 3.5 – 4.5 km², was ein Schwemmhölzpotential von 150'000 – 200'000 m³ ausmacht (siehe Tabelle 8). Dabei haben die Rutschungen mit rund zwei Drittel deutlich den grössten Anteil am gesamten Potential.

Chiene

Tabelle 9: Potentielle Schwemmhölzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Chiene (1. Iteration)

	HQ30		HQ100		HQ300	
	bewaldete Fläche (km ²)	Holz- Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz- Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz- Volumen (m ³)
Gerinneholz	-	3'347	-	3'347	-	3'347
Seitenerosion	0.14	6'279	0.20	9'323	0.30	13'802
Rutschung	1.60	73'751	1.94	88'973	2.00	92'028
Murgang	0.79	36'195	1.06	48'921	1.33	61'288
Total	2.53	119'572	3.20	150'564	3.63	170'465

Tabelle 9 zeigt, dass die modellierten potentiellen Eintragsflächen sowie das daraus berechnete Schwemmhölzpotential im Einzugsgebiet der Chiene mit rund 2.5 – 3.5 km² bzw. 120'000 – 170'000 m³ deutlich kleiner als bei der Grossen Melchaa ist, obwohl das Einzugsgebiet der Chiene grösser ist. Die Rutschungsflächen machen zwar auch hier klar den grössten Anteil an den potentiellen Eintragsflächen aus (ca. 60 %), sind aber, gleich wie die Seitenerosionsflächen, deutlich kleiner als bei der Grossen Melchaa.

Landquart

Tabelle 10: Potentielle Schwemmhölzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Landquart (1. Iteration)

	HQ30		HQ100		HQ300	
	bewaldete Fläche (km ²)	Holz- Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz- Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz- Volumen (m ³)
Gerinneholz	-	1'026	-	1'026	-	1'026
Seitenerosion	0.08	2'916	0.15	5'111	0.18	6'117
Rutschung	0.25	8'633	0.34	11'663	0.39	13'466
Murgang	0.50	17'207	0.56	19'271	0.62	21'211
Total	0.83	29'782	1.05	37'070	1.19	41'820

Obwohl das Teileinzugsgebiet der Landquart wesentlich grösser ist als die Einzugsgebiete der Grossen Melchaa und der Chiene, ergibt die Modellierung eine deutlich kleinere potentielle Eintragsfläche (ca. 0.8 – 1.2 km²) und somit auch ein geringeres potentielles Schwemmhölzpotential (ca. 30'000 – 40'000 m³) (siehe Tabelle 10). Vor allem die Rutschungsfläche ist im Vergleich mit den zwei anderen Ein-

zugsgebieten stark reduziert. Dies hat zur Folge, dass bei der Landquart der Prozess des Murganges mit 50 – 60 % klar am meisten zum gesamten Schwemmh Holzpotential beiträgt.

Chirel

Tabelle 11: Potentielle Schwemmholzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Chirel (1. Iteration)

	HQ30		HQ100		HQ300	
	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)
Gerinneholz	-	5'651	-	5'651	-	5'651
Seitenerosion	0.22	10'035	0.30	13'456	0.41	18'117
Rutschung	1.76	78'552	2.14	95'636	2.26	100'939
Murgang	1.03	45'882	1.39	62'012	1.73	77'339
Total	3.01	140'120	3.83	176'755	4.40	202'046

Tabelle 11 zeigt die Gesamtsummen der potentiellen Eintragsflächen und des potentiellen Schwemmh Holzvolumens bei der Chirel. Diese bewegen sich mit ca. 3 – 4.5 km² bzw. ca. 140'000 – 200'000 m³ im Rahmen der Grossen Melchaa, obwohl die Chirel ein fast doppelt so grosses Gebiet entwässert. Die Aufteilung in die verschiedenen Eintragsprozesse zeigt ausserdem, dass zwar die Rutschungen wie bei der Grossen Melchaa und der Chiene mit ungefähr der Hälfte den grössten Anteil am Potential ausmachen, jedoch auch die Murgänge für ein beachtliches Volumen an Schwemmh Holz zuständig sind (30 – 40 %).

Kleine Emme

Tabelle 12: Potentielle Schwemmholzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Kleinen Emme (1. Iteration)

	HQ30		HQ100		HQ300	
	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)
Gerinneholz	-	50'382	-	50'382	-	50'382
Seitenerosion	3.27	163'366	5.60	279'960	9.21	461'208
Rutschung	19.45	981'097	24.89	1'255'975	26.62	1'342'311
Murgang	1.53	74'333	2.20	106'999	2.88	140'113
Total	24.25	1'269'178	32.69	1'693'316	38.71	1'994'014

Die Modellierung der potentiellen Eintragsflächen und des Schwemmholtzpotentials resultiert in deutlich grösseren Flächen bzw. Volumen als bei den übrigen vier Testeinzugsgebieten. Diese werden in Tabelle 12 zusammengefasst. Die modellierte Eintragsfläche von 24 – 39 km² und das Schwemmholtzpotential von ungefähr 1'300'000 – 2'000'000 m³ sind rund 10 bis 50-mal so gross wie bei den anderen Flüssen. Ausserdem ist der Anteil am Schwemmholtzbeitrag durch Rutschungen bei der Kleinen Emme mit über 65 % so gross wie bei keinem der anderen Testeinzugsgebiete.

4.1.2 2. Iteration

4.1.2.1 Gerinneholz

In der zweiten Iteration wurden zwei Ansätze für die Berechnung des Gerinneholzvolumens getestet, welche beide auf der Gerinnebreite beruhen. Die ermittelten Volumen für die fünf Testeinzugsgebiete sind in Tabelle 13 ersichtlich:

Tabelle 13: Berechnete Gerinneholzvolumen [m³] mit zwei unterschiedlichen Ansätzen für die fünf Testeinzugsgebiete

	Ansatz nach Ruiz-Villanueva et al. (2016)	Ansatz nach Gurnell (2013)	Unterschied der beiden Ansätze
Grosse Melchaa	3'772	4'203	- 10 %
Chiene	3'470	3'922	-12 %
Landquart	990	1'381	-28 %
Chirel	5'462	4'521	+21 %
Kleine Emme	60'140	61'568	-2 %

Tabelle 13 zeigt, dass der Ansatz von Ruiz-Villanueva et al. (2016) zu etwas geringeren Volumen als der Ansatz von Gurnell (2013) führt. Ausnahme ist die Chirel, bei welcher der erstgenannte Ansatz ein leicht grösseres Volumen ermittelt. Grundsätzlich gibt es bei den Resultaten der beiden Ansätze aber kaum Unterschiede. Zum Erhalt der Überschaubarkeit und zur Vermeidung von Missverständnissen werden deshalb in der weiteren Darstellung nur noch die Ergebnisse des Ansatzes von Ruiz-Villanueva et al. (2016) aufgelistet.

4.1.2.2 Testeinzugsgebiete

Die modellierten Schwemmholtzeintragsprozessflächen der 2. Iteration und die darauf basierenden potentiellen Schwemmholtzvolumen sind in Tabelle 14 bis Tabelle 18 aufgelistet. Wiederum handelt es sich dabei um die zusammengeführten Flächen, also ohne mehrfach gezählte Flächen.

Im Gegenteil zur 1. Iteration wird auch beim Gerinneholz eine Fläche angegeben. Dabei handelt es sich um die geschätzte Gerinnefläche, welche in der 2. Iteration als Basis für die Berechnung des Gerinneholz-Volumens dient. Bei den restlichen Prozessen handelt es sich wie auch in der 1. Iteration um die bewaldete Prozessfläche. Durch die zusätzliche Flächenangabe in der 2. Iteration ist die totale Flä-

che bei allen Testeinzugsgebieten und für alle Jährlichkeiten grösser als in der 1. Iteration, auch wenn das Holzvolumen abnahm.

In der 2. Iteration resultieren für die Murgänge und Rutschungen andere Eintragsflächen bzw. Holzvolumen als in der 1. Iteration, obwohl die Berechnungsmethode die gleiche ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Zusammenführung der Prozesse die Murgangsflächen (und die Seitenerosionsflächen bei den Rutschungen) abgezogen werden.

Grosse Melchaa

Tabelle 14: Potentielle Schwemmhölzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa (2. Iteration)

	HQ30		HQ100		HQ300	
	Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)
Gerinneholz	0.29	3'772	0.29	3'772	0.29	3'772
Seitenerosion	0.28	12'071	0.57	24'473	0.71	30'611
Rutschung	2.12	91'622	2.34	101'257	2.38	103'089
Murgang	0.67	29'019	0.94	40'656	1.21	52'184
Total	3.36	136'484	4.14	170'158	4.59	189'656

Die Berechnungen der 2. Iteration (siehe Tabelle 14) im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa ergibt Schwemmholzvolumen von ca. 135'000 – 190'000 m³. Dies sind leicht kleinere Werte als in der 1. Iteration. Die potentiellen Eintragsflächen variieren zwischen 3.3 – 4.6 km². Die relative Aufteilung in die verschiedenen Eintragsprozesse bleibt dabei ungefähr gleich.

Chiene

Tabelle 15: Potentielle Schwemmhölzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Chiene (2. Iteration)

	HQ30		HQ100		HQ300	
	Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)
Gerinneholz	0.29	3'470	0.29	3'470	0.29	3'470
Seitenerosion	0.25	11'701	0.53	24'205	0.66	30'148
Rutschung	1.50	68'802	1.66	76'468	1.68	77'092
Murgang	0.68	31'278	0.95	43'508	1.21	55'668
Total	2.72	115'251	3.43	147'651	3.84	166'378

Tabelle 15 zeigt, dass die Schwemmh Holzvolumen der Chiene mit ca. 115'000 – 165'000 m³ in der 2. Iteration nur minim kleiner als in der 1. Iteration sind. Die Eintragsflächen sind zwischen 2.7 – 3.85 km² gross. Auch das Verhältnis der verschiedenen Prozesse ist fast gleich, ausser dass in der 2. Iteration der Anteil an Schwemmholzeintrag durch Seitenerosion leicht grösser ist und dafür der durch Murgänge und Rutschungen ein wenig geringer.

Landquart

Tabelle 16: Potentielle Schwemmh olzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Landquart (2. Iteration)

	HQ30		HQ100		HQ300	
	Fläche (km ²)	Holz- Volumen (m ³)	Fläche (km ²)	Holz- Volumen (m ³)	Fläche (km ²)	Holz- Volumen (m ³)
Gerinneholz	0.11	990	0.11	990	0.11	990
Seitenerosion	0.09	3'216	0.20	6'958	0.26	9'042
Rutschung	0.24	8'180	0.30	10'466	0.34	11'847
Murgang	0.47	16'339	0.53	18'334	0.59	20'233
Total	0.91	28'725	1.14	36'748	1.30	42'112

Die berechneten Schwemmh Holzvolumen der 2. Iteration bewegen sich im Teileinzugsgebiet der Landquart zwischen 28'000 und 43'000 m³ (siehe Tabelle 16). Damit sind diese Werte praktisch identisch wie in der 1. Iteration. Die Prozessflächen variieren zwischen ca. 0.9 bis 1.3 km². Wie bei der Chiene sind die Volumen beim HQ30 und HQ100 leicht reduziert im Vergleich zur 1. Iteration. Beim HQ300 sind die Fläche und das Volumen allerdings minim grösser als in der 2. Iteration. Ebenfalls wie bei der Chiene ist der prozentuale Anteil auch bei der Landquart in den zwei Iterationen nahezu identisch, mit Ausnahme, dass der Anteil durch Seitenerosion in der 2. Iteration geringfügig auf Kosten des Beitrages durch Murgänge und Rutschungen zunimmt. Bemerkenswert ist, dass die Landquart das einzige Testeinzugsgebiet ist, in welchem nicht die Rutschungen als Hauptprozess berechnet werden.

Chirel

Tabelle 17: Potentielle Schwemmhölzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Chirel (2. Iteration)

	HQ30		HQ100		HQ300	
	Fläche (km ²)	Holz- Volumen (m ³)	Fläche (km ²)	Holz- Volumen (m ³)	Fläche (km ²)	Holz- Volumen (m ³)
Gerinneholz	0.29	5'462	0.29	5'462	0.29	5'462
Seitenerosion	0.29	12'873	0.56	24'881	0.69	31'030
Rutschung	1.67	74'548	1.93	86'146	2.01	89'959
Murgang	0.93	41'581	1.28	57'187	1.62	72'269
Total	3.18	134'464	4.06	173'676	4.61	198'720

Die Schwemmhölzvolume und die potentiellen Flächen der 2. Iteration im Einzugsgebiet der Chirel werden in Tabelle 17 zusammengefasst. Die Modellierung des Schwemmhölzvolume im Einzugsgebiet der Chirel in der 2. Iteration führt zu Werten von ca. 130'000 – 200'000 m³. Somit liegen auch bei diesem Fluss die Resultate der 2. Iteration beim HQ30 und HQ100 leicht unter und beim HQ300 leicht über jenen der 1. Iteration. Die Prozessflächen erstrecken sich über Flächen zwischen 3.1 und 4.7 km². Wie im Fall der Chiene und der Landquart bleibt das Verhältnis der verschiedenen Prozesse ungefähr gleich, allerdings mit einer leichten Zunahme des Schwemmhölzeintrages durch Seitenerosion und einer geringen Abnahmen an Eintrag durch Murgänge und Rutschungen.

Kleine Emme

Tabelle 18: Potentielle Schwemmhölzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Kleinen Emme (2. Iteration)

	HQ30		HQ100		HQ300	
	Fläche (km ²)	Holz- Volumen (m ³)	Fläche (km ²)	Holz- Volumen (m ³)	Fläche (km ²)	Holz- Volumen (m ³)
Gerinneholz	4.65	60'140	4.65	60'140	4.65	60'140
Seitenerosion	7.64	382'185	14.39	719'173	18.35	916'391
Rutschung	16.86	849'754	19.95	1'005'299	21.49	1'082'075
Murgang	1.21	58'390	1.80	87'362	2.43	118'200
Total	30.36	1'350'469	40.79	1'871'974	46.92	2'176'806

Im Gegensatz zu den anderen Testeinzugsgebieten sind die berechneten Eintragsflächen und Schwemmhölzvolume bei der Kleinen Emme in der 2. Iteration (siehe Tabelle 18) für alle modellierten Ereignisintensitäten deutlich grösser als die Resultate der 1. Iteration. Die Grössen der bewaldeten

Prozessflächen bewegen sich zwischen 30 und 47 km² und die der Schwemmh Holzvolumen zwischen 1'300'000 und 2'200'000 m³. Damit liegen sie rund 5 – 25 % höher als in der 1. Iteration. Stark zugenommen hat dabei der Schwemmholzeintrag durch Seitenerosion. Im Gegenzug wurde der Anteil durch Rutschungen erheblich reduziert.

4.1.3 Vergleich der beiden Iterationen

4.1.3.1 Gerinneholz

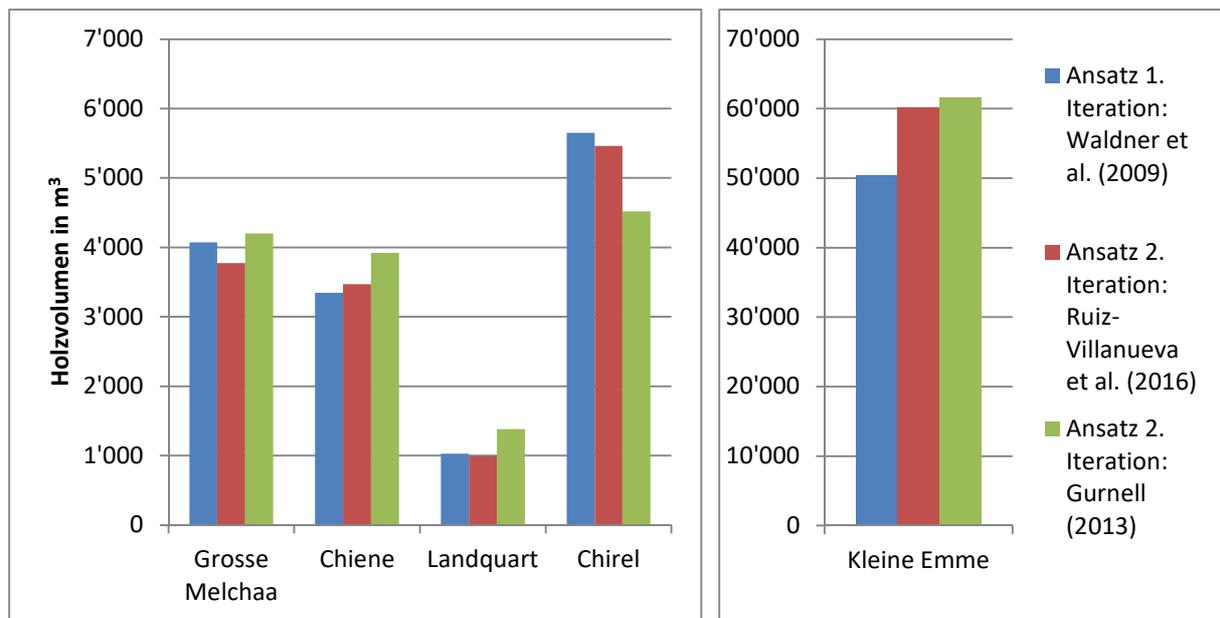


Abbildung 15: Resultierendes Gerinneholzpotential (HQ100) auf Grundlage der drei verschiedenen Berechnungsansätze für die Einzugsgebiete der Grossen Melchaa, Chiene, Landquart und Chirel (links) sowie der Kleinen Emme (rechts)

Abbildung 15 vergleicht die Ergebnisse der drei Ansätze zur Berechnung des potentiellen Gerinneholzvolumens. Dabei wird deutlich, dass alle Ansätze in jedem Testeinzugsgebiet zu etwa denselben Resultaten führen. So ist bei den fünf Gebieten der tiefste Wert maximal 30 % kleiner als der grösste. Ausser bei der Chirel ergibt der Ansatz von Gurnell (2013) immer das höchste Volumen, während bei den Ansätzen von Waldner et al. (2009) und Ruiz-Villanueva et al. (2016) leicht geringere Werte resultieren.

4.1.3.2 Seitenerosion

In der 1. Iteration dienten die Flutzonen von Aquaprotect als Basis für die Seitenerosionsfläche, in der 2. Iteration wurde die Rückgriffweite der Erosion auf Grundlage der Gerinnebreite geschätzt. Abbildung 16 stellt die Resultate dieser beiden Berechnungsmethoden einander gegenüber. Dabei handelt es sich um die ganzen potentiellen Volumens, für deren Bestimmung die Überschneidungsflächen der anderen Prozesse nicht abgezogen wurden. Deshalb sind die hier dokumentierten Werte leicht höher als in Tabelle 14 bis Tabelle 18.

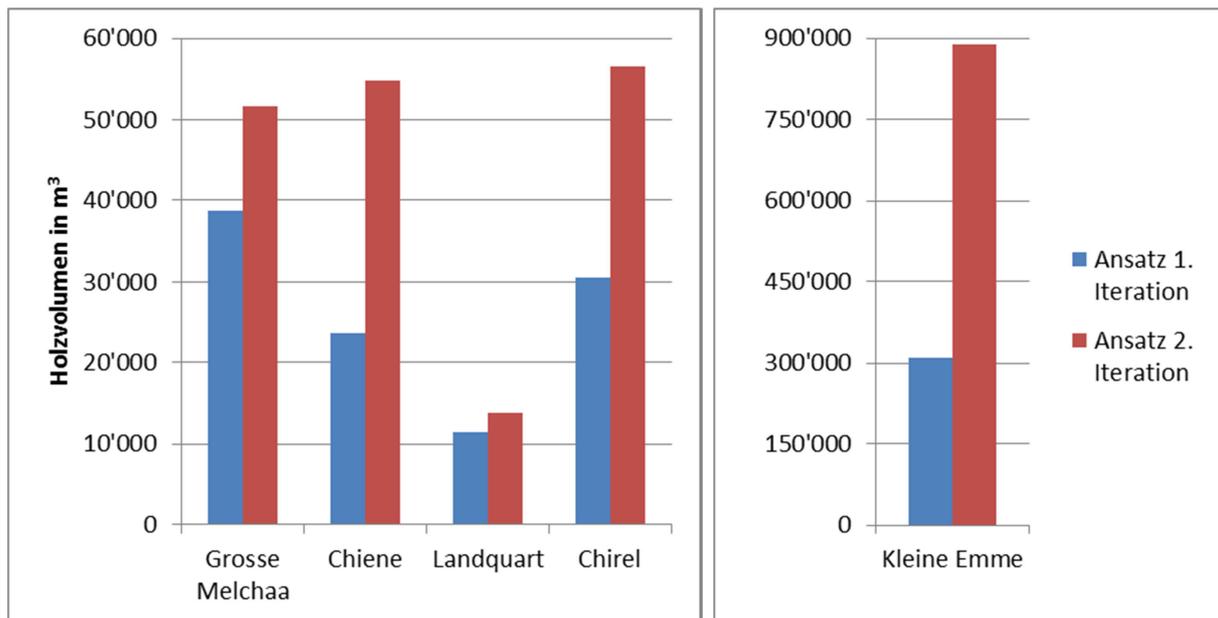


Abbildung 16: Resultierendes Schwemmh Holzpotential (HQ100) durch Seitenerosion auf Grundlage der beiden Berechnungsansätze für die Einzugsgebiete der Grossen Melchaa, Chiene, Landquart und Chirel (links) sowie der Kleinen Emme (rechts)

Die Ergebnisse der beiden Berechnungsansätze für das Schwemmh Holzvolumen durch Seitenerosion unterscheiden sich deutlicher als beim Gerinneholz. Der Ansatz der 2. Iteration führt bei allen fünf Testeinzugsgebieten zu den höheren Werten als der Ansatz der 1. Iteration; bei der Kleinen Emme und der Chiene zu mehr als doppelt so grossen. Obwohl die berechneten Schwemmh Holzpotentiale durch Seitenerosion bei der 2. Iteration klar grösser sind, resultieren beim Gesamtpotential kleinere Eintragsvolumen durch Seitenerosion. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Gegensatz zu der 1. Iteration in der 2. Iteration die Gerinnefläche abgezogen wird. Da sich grosse Teile der Gerinne- und der Seitenerosionsfläche überschneiden, wird die potentielle Eintragsfläche durch Seitenerosion stark reduziert.

4.1.3.3 Gesamtes Schwemmholzpotential

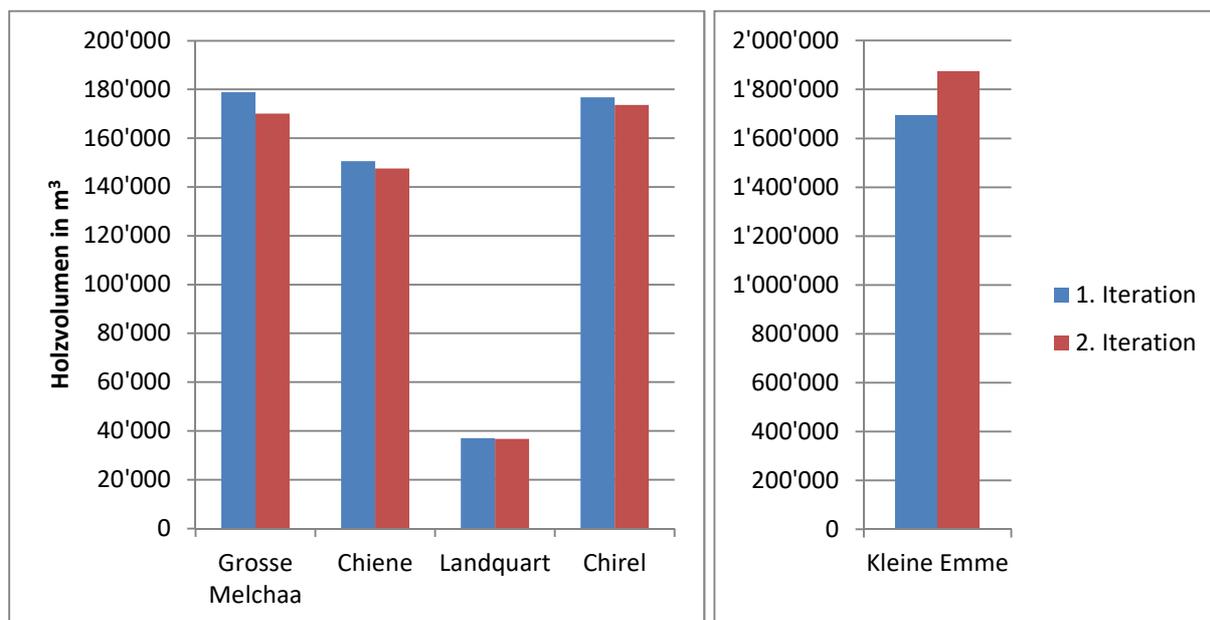


Abbildung 17: Modellierte Schwemmholzpotentiale (HQ100) für die Einzugsgebiete der Grossen Melchaa, Chiene, Landquart und Chirel (links) sowie der Kleinen Emme (rechts)

Abbildung 17 stellt die modellierten Gesamtpotentiale für das HQ100 der beiden Iterationen gegenüber. Auffällig sind die geringen Unterschiede zwischen den beiden Iterationen, welche bei keinem der Testeinzugsgebiete grösser als 10 % sind. Ausser bei der Kleinen Emme führte immer die 1. Iteration zu den höheren Werten, im Fall der Landquart sind die Resultate allerdings nahezu identisch.

4.1.4 Totholz

Ein zusätzlicher Output des GIS-Modells ist die Aufteilung des Schwemmholzpotentials in Grün- und Totholz. In den fünf Testeinzugsgebieten liegen diese zwischen 5 und 12 % (siehe Tabelle 19).

Tabelle 19: Totholzanteile gemäss GIS-Modell der Schwemmholzpotentiale in den Testeinzugsgebieten

	Totholzanteil
Grosse Melchaa	5 %
Chiene	11 %
Landquart	5 %
Chirel	10 %
Kleine Emme	12 %

4.2 Quantifizierung der Abminderungsfaktoren

4.2.1 Prozesse

4.2.1.1 Gerinneholz

Die Anteile an mobilisiertem Totholz in verschiedenen Einzugsgebieten gemäss Steeb et al. (2017) werden in Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20: Anteile an mobilisiertem Totholz für verschieden Einzugsgebiete (übernommen von Steeb et al. (2017))

	Kander	Kleine Emme / Reuss	Landquart	Grosse Melchaa
Wildbach	10 %	5 %	10 %	30 %
Oberlauf	10 %	10 %	10 %	30 %
Unterlauf	10 %	20 %	50 %	30 %

4.2.1.2 Seitenerosion

Der Vergleich der dokumentierten Seitenerosionsflächen durch Hunzinger & Durrer (2009) und Bachmann Walker (2012) mit der modellierten bewaldeten Eintragsfläche ergibt Reduktionswerte zwischen 0.06 und 26.45 %. Die resultierenden Prozentwerte aller berücksichtigten Flüsse sind in Tabelle 21 aufgelistet.

Tabelle 21: Anteil der dokumentierten Erosionsflächen (gemäss Bachmann Walker (2012) & Hunzinger & Durrer (2009)) an der modellierten bewaldeten Erosionsfläche (gemäss GIS-Modellierung)

	Anteil dokumentierte Erosionsfläche an modellierter bewaldeter Erosionsfläche
Bachmann Walker (2012)	
Schwarze Lütschine	1.01 %
Chirel	4.82 %
Chiene	10.45 %
Lonza	1.72 %
Kander	0.48 %
Weisse Lütschine	0.06 %
Simme	1.21 %
Glatt	0.14 %
Altibach	1.08 %
Chalberhönibach	2.42 %
Heubach	2.62 %
Hunzinger & Durrer (2009)	
Schwarze Lütschine	0.22 %
Lütschine	1.57 %
Emme	0.54 %
Chirel	26.45 %
Landquart	12.66 %
Kleine Emme	0.53 %
Engelberger Aa	1.13 %
Grosse Melchaa	5.03 %
Isitalerbach	6.78 %
Chärstelenbach	1.33 %

4.2.1.3 Rutschungen

Ansatz „Rutschungsdatenbank“

In Tabelle 22 sind die resultierenden Prozentwerte des Vergleichs der dokumentierten Rutschungsflächen aus der Rutschungsdatenbank von McArdell & Rickli (2017) und den modellierten Rutschungsflächen aufgezeigt. Diese bewegen sich von 0.75 bis 24.09 %.

Tabelle 22: Vergleich der dokumentierten Rutschungsfläche (gemäss Rutschungsdatenbank von McArdell & Rickli (2017) mit der modellierten Rutschungsfläche (gemäss GIS-Modellierung) in verschiedenen Perimetern

Perimeter	Dokumentierte Rutschungsfläche	Modellierte Rutschungsfläche	Anteil dokumentierter an modellierter Fläche
Appenzell 02	17'908	1'261'052	1.42%
Entlebuch 05	12'947	1'723'580	0.75%
Eriz 12	4'826	616'780	0.78%
Napf 02	9'373	573'898	1.63%
Napf 05	10'262	47'764	21.48%
Sachseln 97	47'014	4'768'294	0.99%
St. Antönien 05	17'594	73'020	24.09%

Ansatz „von Ruette“

Die Anwendung des statistischen Modells von Von Ruette et al. (2011) auf die verschiedenen Perimeter ergibt Prozentwerte zwischen 0.39 und 10.58 % (siehe Tabelle 23). Dies sind Grenzwerte zwischen der „Rutschungsfläche“ und der „Nicht-Rutschungsfläche“ im Verhältnis zur maximalen Rutschungswahrscheinlichkeit.

Tabelle 23: Grenzwert der Rutschungswahrscheinlichkeit zwischen „Rutschungsfläche“ und „Nicht-Rutschungsfläche“ im Verhältnis zur maximalen Rutschungswahrscheinlichkeit in verschiedenen Perimetern

Perimeter	Rutschung-Grenzwert
Appenzell 02	8.11 %
Entlebuch 05	2.87 %
Eriz 12	10.58 %
Napf 02	3.19 %
Napf 05	2.86 %
Sachseln 97	7.16 %
St. Antönien 05	0.39 %

4.2.1.4 Murgänge

Tabelle 24 zeigt für verschiedene Einzugsgebiete, welcher Anteil der Wildbäche beim Unwetter 2005 durch Murgänge betroffen war (gemäss Rickenmann et al. (2008)). Die Anteile variieren zwischen 11 und 19 %.

Tabelle 24: Anteil der Murgang-aktiven Wildbäche am gesamten Gebirgsfluss-Einzugsgebiet (übernommen von Rickenmann et al. (2008))

Gebirgsfluss	Anteil der aktiven Wildbäche
Schächen	11 %
Chirel	19 %
Lütschine	11 %
Engelberger Aa	12 %

4.2.1.5 Quantifizierung von einheitlichen Abminderungsfaktoren

Die ermittelten Reduktionen der verschiedenen Prozesse werden zu einheitlichen Abminderungsfaktoren für drei Ereignisintensitäten (schwach, mittel, extrem) zusammengefasst, welche in etwa den Jährlichkeiten 30, 100 und 300 Jahre entsprechen sollen (siehe Tabelle 25).

Tabelle 25: Zusammenfassung der quantifizierten Abminderungsfaktoren

Ereignisintensität	Gerinneholz	Seitenerosion	Murgänge	Rutschungsdatenbank	Von Ruette
Schwach	5 %	1 %	5 %	1 %	10 %
Mittel	10 %	5 %	10 %	10 %	5 %
Extrem	30 %	10 %	20 %	20 %	1 %

4.2.1.6 Vergleich der beiden Ansätze zur Quantifizierung Faktoren für Rutschungen

In diesem Abschnitt werden die resultierenden Schwemmhohlmengen der Ansätze „Rutschungsdatenbank“ und „von Ruette“ miteinander verglichen. Dazu werden die beiden Methoden auf die modellierten Rutschungspotentiale der fünf Testeinzugsgebiete (Ansatz „Rutschungsdatenbank“) oder auf die bewaldeten Pixel der Rasterkarten gemäss Von Ruette et al. (2011) angewendet. Da die relativen Unterschiede der beiden Ansätze zwischen den Testeinzugsgebieten ähnlich sind, werden hier nur die Resultate der Grossen Melchaa und der Landquart dargestellt.

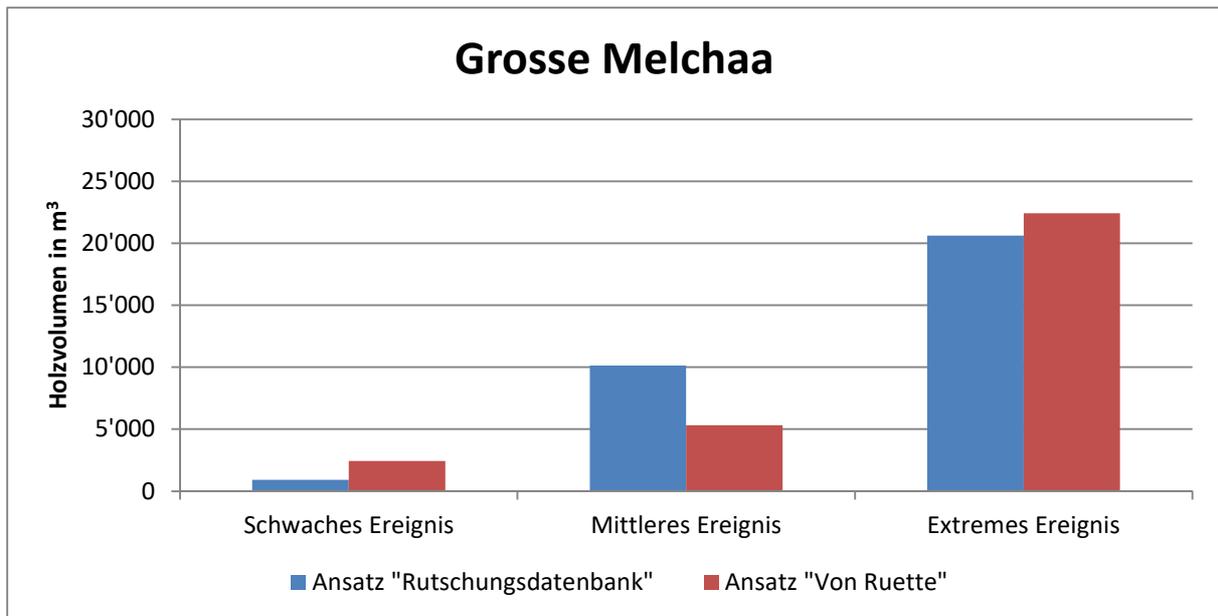


Abbildung 18: Vergleich der beiden Abminderungsfaktoren-Ansätze für Rutschungen im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa

Abbildung 18 zeigt, dass bei der Grossen Melchaa die beiden Ansätze beim extremen Ereignis zu relativ ähnlichen Resultaten führen. Dabei sind die Werte gemäss dem Ansatz „von Ruette“ etwas höher. Deutlich grösser ist der relative Unterschied beim schwachen Ereignis, bei welchem ebenfalls der „von Ruette“-Ansatz zu den höheren Ergebnissen führt. Umgekehrt ist es beim mittleren Ereignis, bei welchem der Ansatz „Rutschungsdatenbank“ klar die grösseren Volumen berechnet. Die Grosse Melchaa ist das einzige der fünf Testeinzugsgebiet, in welchem beim Hochwasser 2005 ein beachtlicher Teil des Schwemmhholzes durch Rutschungen eingetragen wurde (ca. 3'000 m³). Der Vergleich dieser Menge mit den reduzierten Rutschungspotentialen zeigt, dass bei diesem Beispiel der „von Ruette“-Ansatz (schwachem bzw. mittleres Ereignis) dem effektiven Beitrag durch Rutschungen am nächsten kommt.

Sehr ähnlich sehen die relativen Unterschiede der beiden Ansätze auch bei der Chiene und der Kleinen Emme aus. Da das Schwemmhholzpotential bei der Chiene leicht geringer und bei der Kleinen Emme deutlich grösser als bei der Grossen Melchaa ist, ergibt dies auch leicht geringere bzw. deutlich grössere absolute Werte als Resultat der Reduktion.

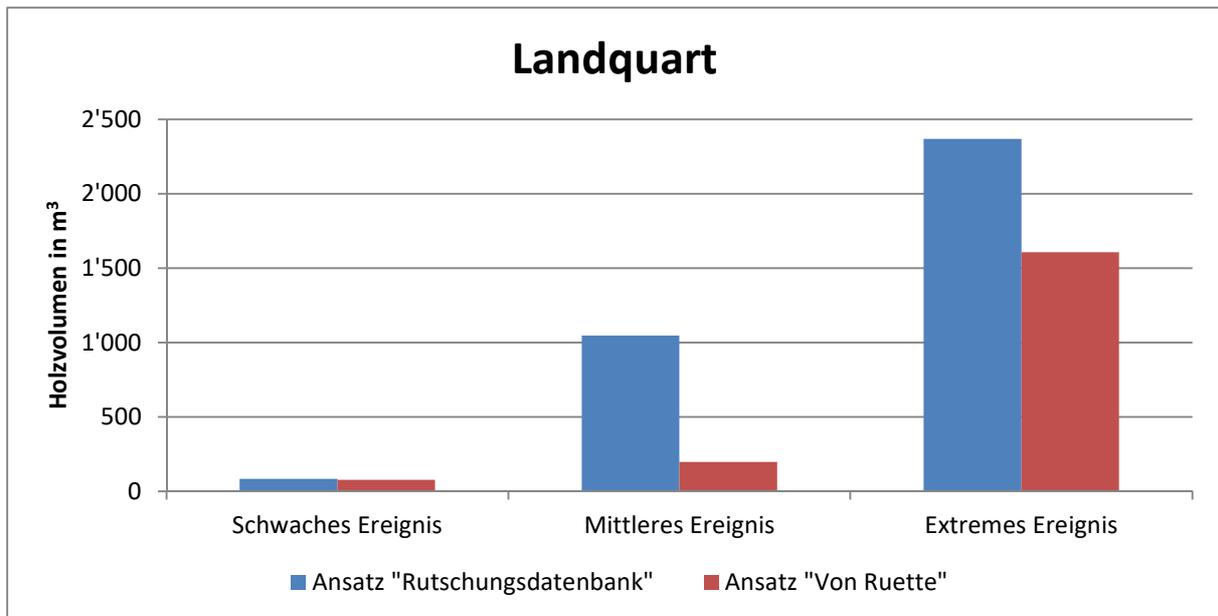


Abbildung 19: Vergleich der beiden Abminderungsfaktoren-Ansätze für Rutschungen im Einzugsgebiet der Landquart

Im Einzugsgebiet der Landquart sind die Unterschiede zwischen den reduzierten Schwemmholtzvolu-
men beim mittleren und extremen Ereignis deutlich grösser als bei der Grosse Melchaa (siehe Abbil-
dung 19). Beim schwachen Ereignis ergibt die Reduktion sehr kleine Werte ($< 100 \text{ m}^3$), welche aller-
dings bei beiden Ansätzen ähnlich gross sind. Bei allen drei Ereignis-Intensitäten führt der „Rut-
schungsdatenbank“-Ansatz zu den grösseren Holzvolumen.

Die relativen Unterschiede sind bei der Landquart ähnlich wie bei der Chirel. Absolut sind die Werte
allerdings bei der Chirel klar grösser als bei der Landquart, weil auch das Potential deutlich höher ist.

4.3 Vergleich mit den Daten vom Hochwasser 2005

4.3.1 Relative Anteile der verschiedenen Prozesse

Abbildung 20 bis Abbildung 24 vergleichen die prozentualen Anteile der verschiedenen Eintragspro-
zesse, wobei zwischen den modellierten potentiellen Volumen (HQ100) und den effektiven Volumen
vom Hochwasser 2005 gemäss Waldner et al. (2009) unterschieden wird. Wichtig ist der Hinweis,
dass es sich bei den modellierten Werten um das Schwemmholtzpotential handelt, welches also bei
einem Ereignis nur teilweise in das Gewässer eingetragen wird.

4.3.1.1 Grosse Melchaa

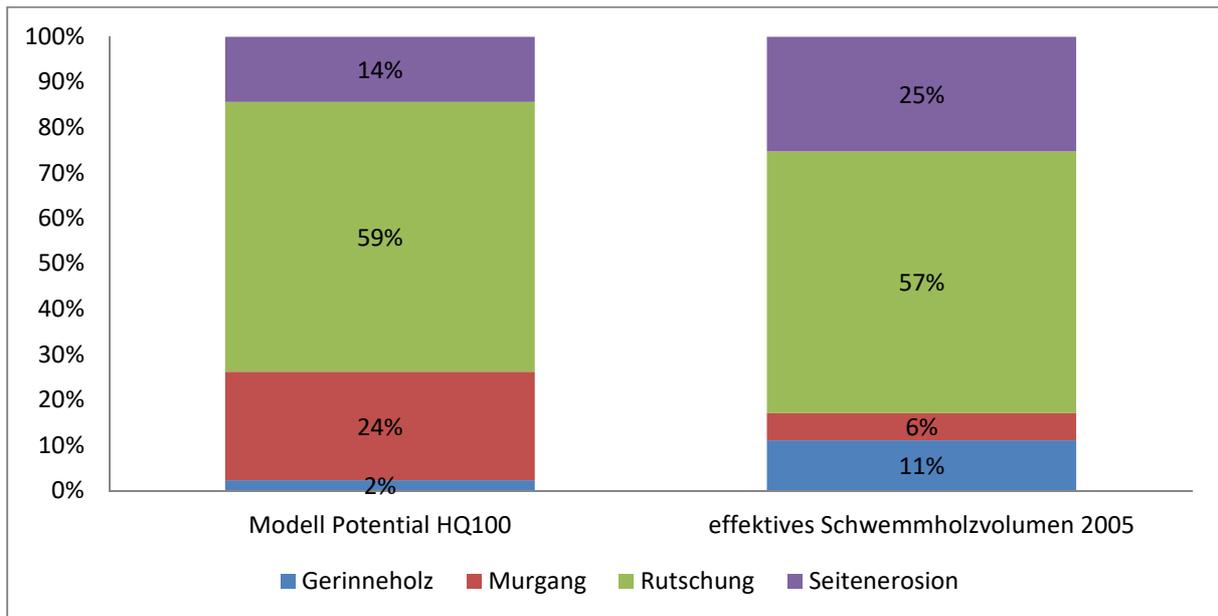


Abbildung 20: Vergleich der prozentualen Anteile der verschiedenen Eintragsprozesse im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa

Im Fall der Grossen Melchaa wurden die relativen Anteile der Prozesse im Vergleich mit dem Hochwasser 2005 ziemlich gut modelliert (Abbildung 20). Hauptprozess waren 2005 die Rutschungen, was auch die Berechnung ergibt. Allerdings gewichtete das Modell die Murgänge zu hoch und die Seitenerosion sowie das Gerinneholz zu tief.

4.3.1.2 Chiene

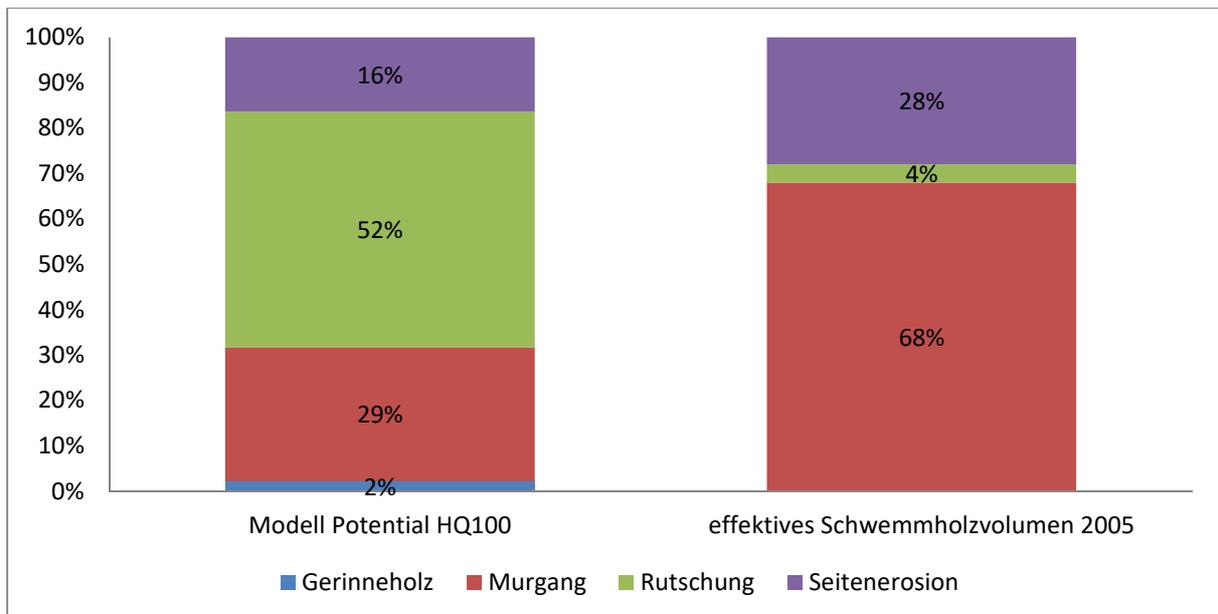


Abbildung 21: Vergleich der prozentualen Anteile der verschiedenen Eintragsprozesse im Einzugsgebiet der Chiene

Abbildung 21 illustriert die Prozessanteile im Einzugsgebiet der Chiene. Hierbei muss erwähnt werden, dass Angaben zum effektiven Gerinneholz beim Hochwasser 2005 fehlen und deshalb in dieser

Grafik als 0 % angegeben werden.

2005 waren vor allem Murgänge und in geringerem Ausmass auch die Seitenerosion verantwortlich für den Schwemmhölzeintrag im Einzugsgebiet der Chiene. Diese beiden Prozesse unterschätzt das Modell allerdings deutlich. Hingegen werden die Rutschungen als Hauptprozess modelliert, welche 2005 kaum eine Rolle im Schwemmhölzeintrag spielten.

4.3.1.3 Landquart

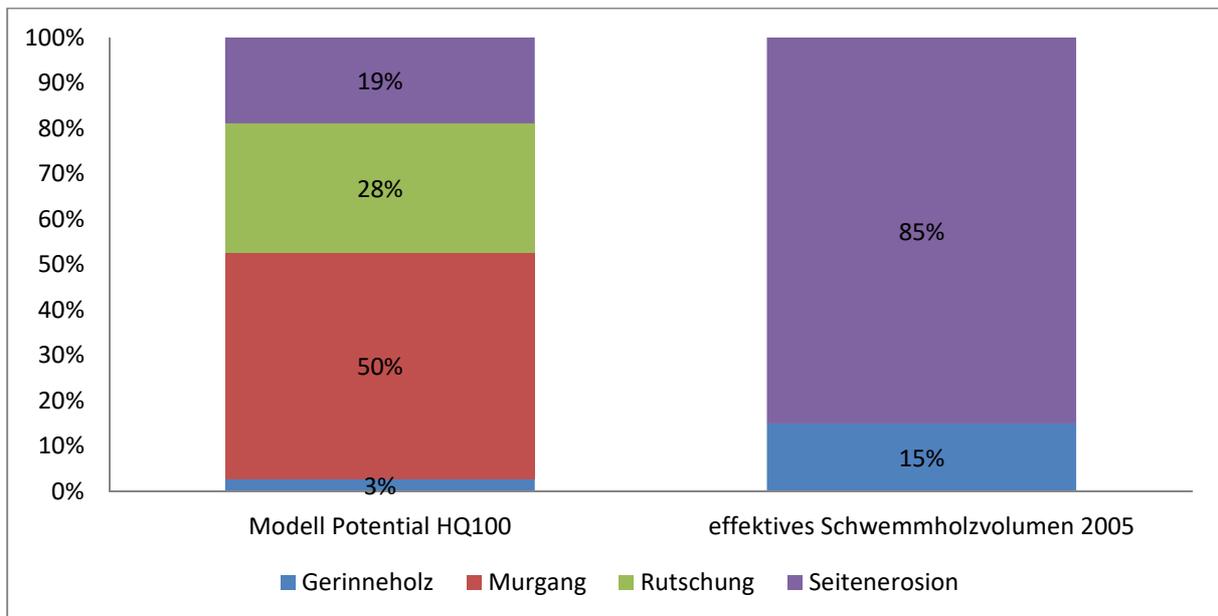


Abbildung 22: Vergleich der prozentualen Anteile der verschiedenen Eintragsprozesse im Einzugsgebiet der Landquart

Abbildung 22 zeigt auf, dass im Testeinzugsgebiet der Landquart die gemessenen Anteile am effektiven Schwemmhölzsvolumen beim Hochwasser 2005 komplett verschieden von den Anteilen am modellierten Schwemmhölzsvolumen sind. Beim Ereignis im Jahr 2005 gelangte gemäss Waldner et al. (2009) Schwemmhölz hauptsächlich durch Seitenerosion in die Landquart, wohingegen Rutschungen und Murgänge keine Rolle spielten. Das Modell ermittelt jedoch die Murgänge und Rutschungen als wichtigste potentielle Eintragsprozesse.

4.3.1.4 Chirel

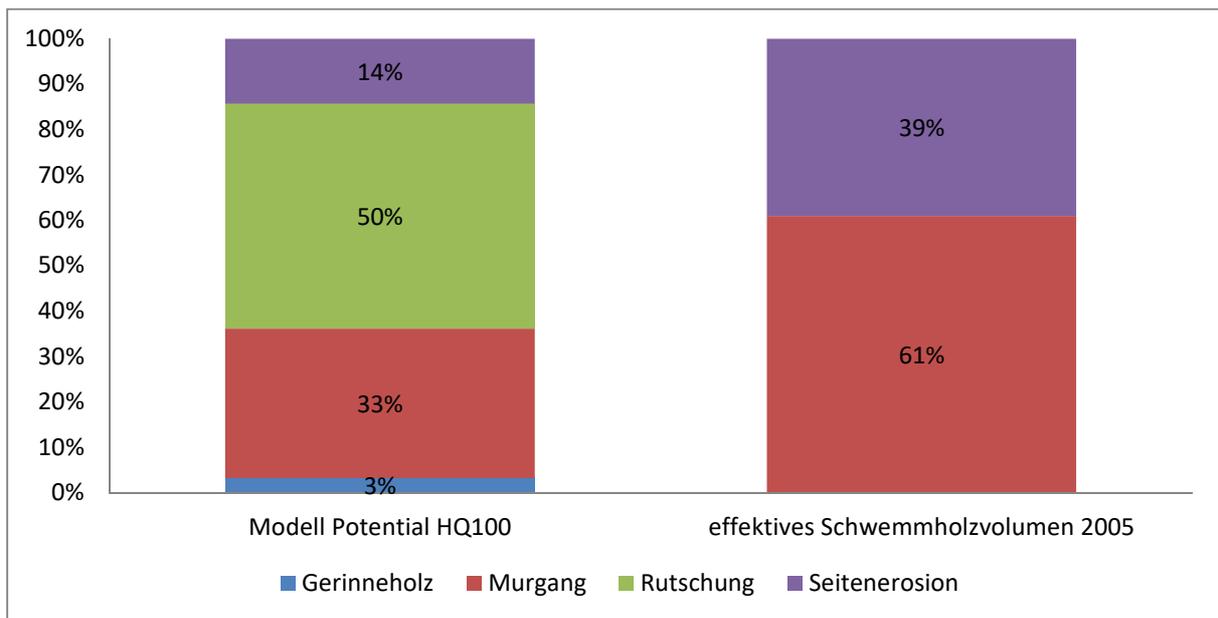


Abbildung 23: Vergleich der prozentualen Anteile der verschiedenen Eintragsprozesse im Einzugsgebiet der Chirel

Der Vergleich der prozentualen Anteile der verschiedenen Eintragsprozesse zwischen dem modellierten Potential und dem effektiven Volumen für die Chirel ist in Abbildung 23 dargestellt. Wie bei der Chiene fehlen auch hier - Angaben zu den Gerinneholzmengen beim Hochwasser 2005, weshalb sie auch in als 0 % angegeben werden. Das Eintragsvolumen durch Rutschungen ist hingegen dokumentiert, ist allerdings so gering (0.1 %), dass es aus Darstellungsgründen in der Grafik weggelassen wird.

Das Schwemmholz wurde 2005 zu etwa zwei Dritteln durch Murgänge und zu ca. einem Drittel durch Seitenerosion in die Chirel eingetragen. Gleich wie bei der Chiene überschätzt das Modell die Rutschungen auch bei der Chirel sehr deutlich, berechnet hingegen den Eintrag durch Murgänge und Seitenerosion klar zu tief.

4.3.1.5 Kleine Emme

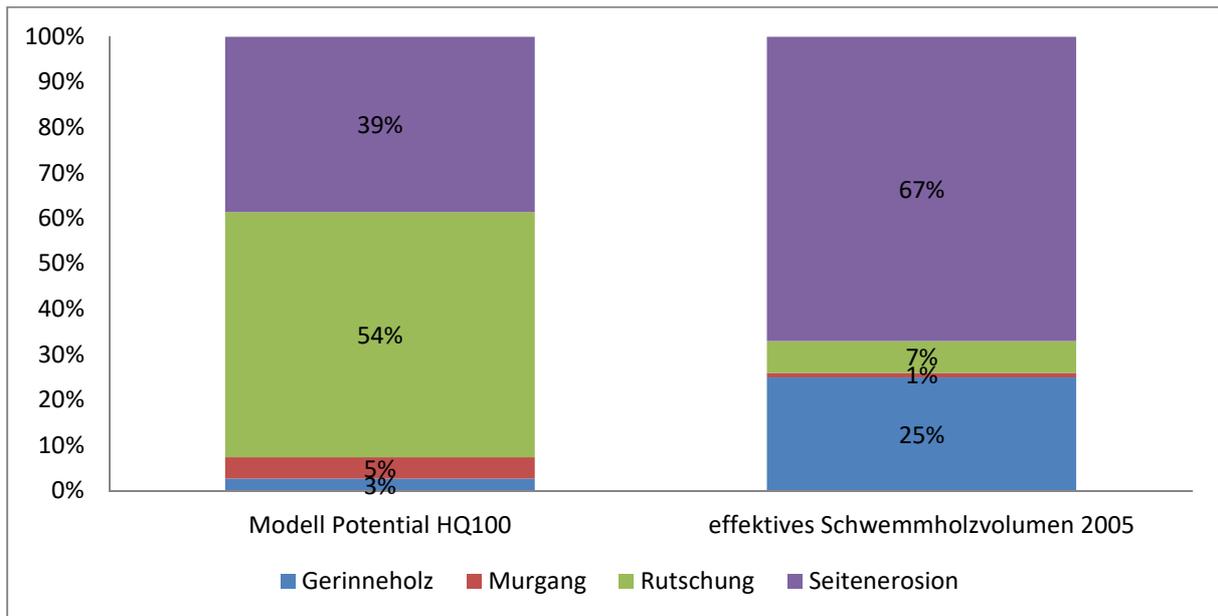


Abbildung 24: Vergleich der prozentualen Anteile der verschiedenen Eintragsprozesse im Einzugsgebiet der Kleinen Emme

Abbildung 24 vergleicht die relativen Anteile der Schwemmholumeintragsprozesse gemäss Modell mit dem effektiven Volumen von 2005 im Einzugsgebiet der Kleinen Emme. Beim Hochwasser 2005 gab es dort vor allem Schwemmholumeintrag durch Seitenerosion. In geringem Masse bedeutsam war auch die Mobilisierung von Gerinneholz. Vernachlässigbar ist hingegen der Eintrag durch Rutschungen und Murgänge. Das Modell hat diese Anteile jedoch wiederum deutlich anders eingeschätzt. Vor allem die Eintragsvolumen durch Rutschungen wurden zu hoch und jene durch Seitenerosion und durch Gerinneholz wurden zu tief berechnet.

4.3.2 Absolute Schwemmholumvolumen

In Abbildung 25 bis Abbildung 29 werden die modellierten Schwemmholummengen mit den effektiven Volumen des Hochwassers 2005 verglichen. Bei Ersterem handelt es sich um die modellierten Gesamtpotentiale, welche durch die oben ermittelten Abminderungsfaktoren reduziert wurden. Dabei wurde für die Reduktion des Rutschungspotentials der Ansatz „Rutschungsdatenbank“ verwendet.

Grosse Melchaa

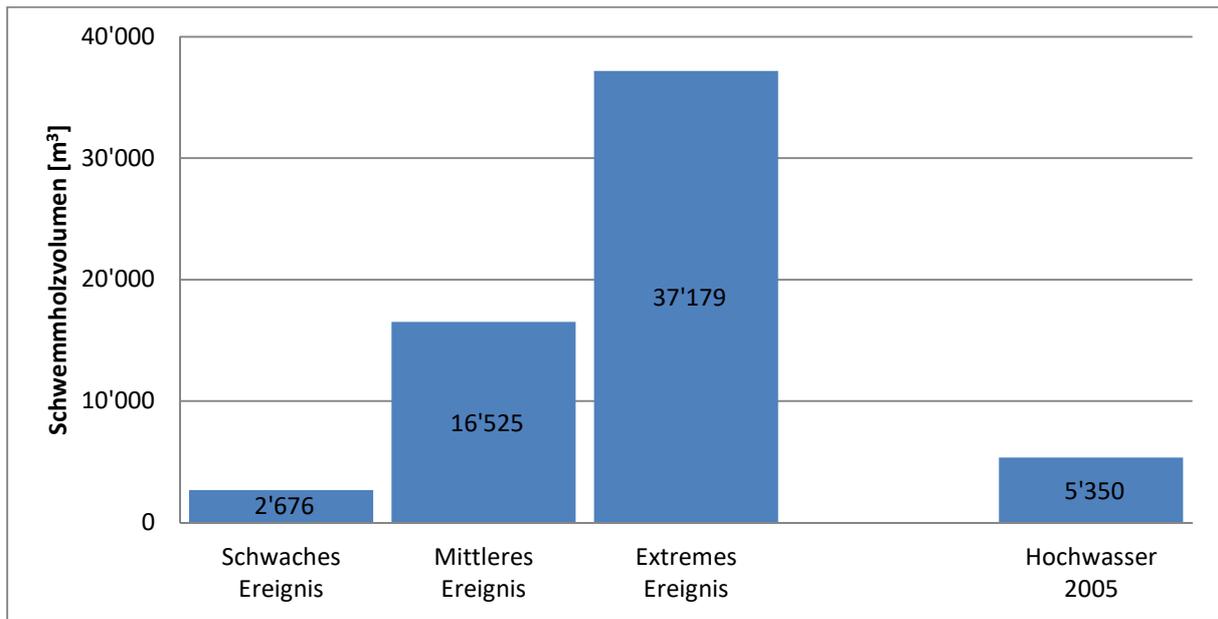


Abbildung 25: Modellierter Schwemmholzmenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2005 im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa

Die Abminderung der modellierten Schwemmholzpotentiale führt bei der Grossen Melchaa zu Werten zwischen ungefähr 2500 und 38'000 m³ (siehe Abbildung 25). Das effektive Volumen von 2005 entspricht also einem modellierten schwachen bis mittleren Ereignis.

Chiene

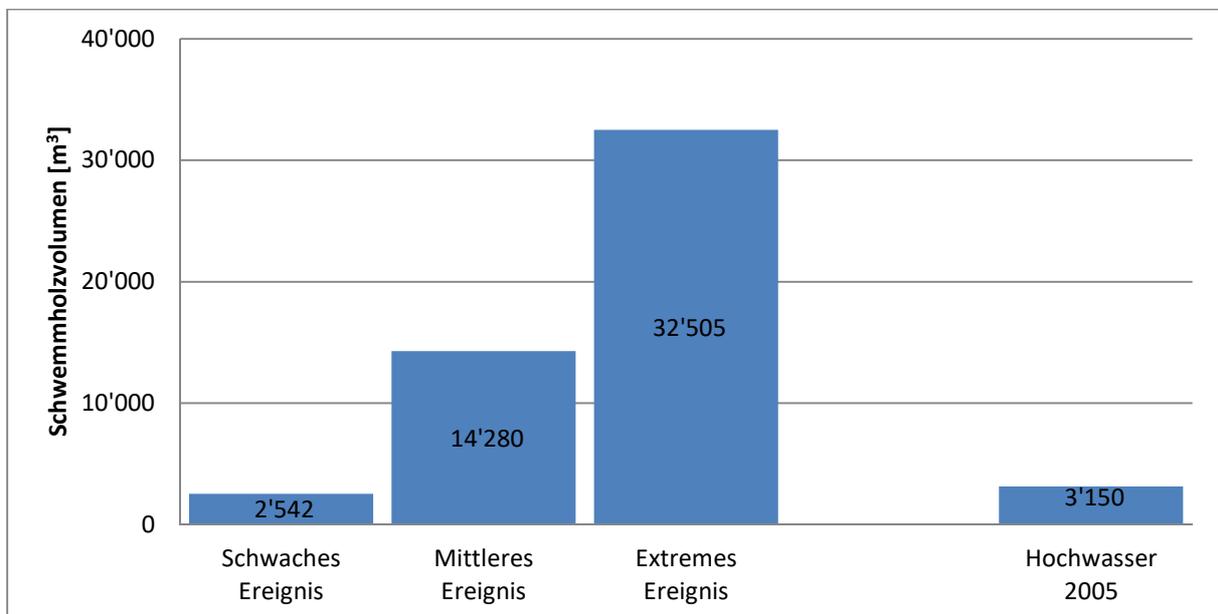


Abbildung 26: Modellierter Schwemmholzmenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2005 im Einzugsgebiet der Chiene

Abbildung 26 stellt die reduzierten Schwemmholzmengen bei der Chiene dar, welche von ca. 2500 bis etwa 32'500 m³ gehen. Die effektive Schwemmholzmenge des Hochwassers 2005 ist dabei nur leicht grösser als das Volumen des schwachen Ereignisses.

Landquart

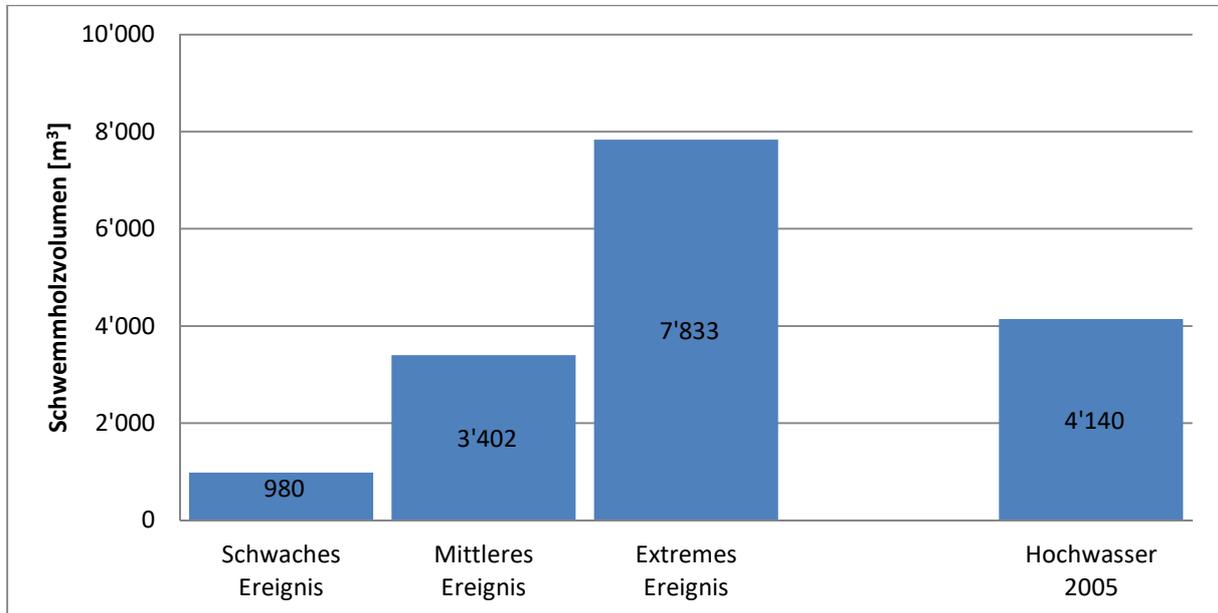


Abbildung 27: Modellierter Schwemmholzmengen im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2005 im Einzugsgebiet der Landquart

Im Einzugsgebiet der Landquart ergibt die Reduktion der Gesamtpotentiale Volumen zwischen etwa 1000 und 8000 m³ (siehe Abbildung 27). Die effektive Schwemmholzmenge bewegt sich somit im Bereich des modellierten mittleren Ereignisses.

Chirel

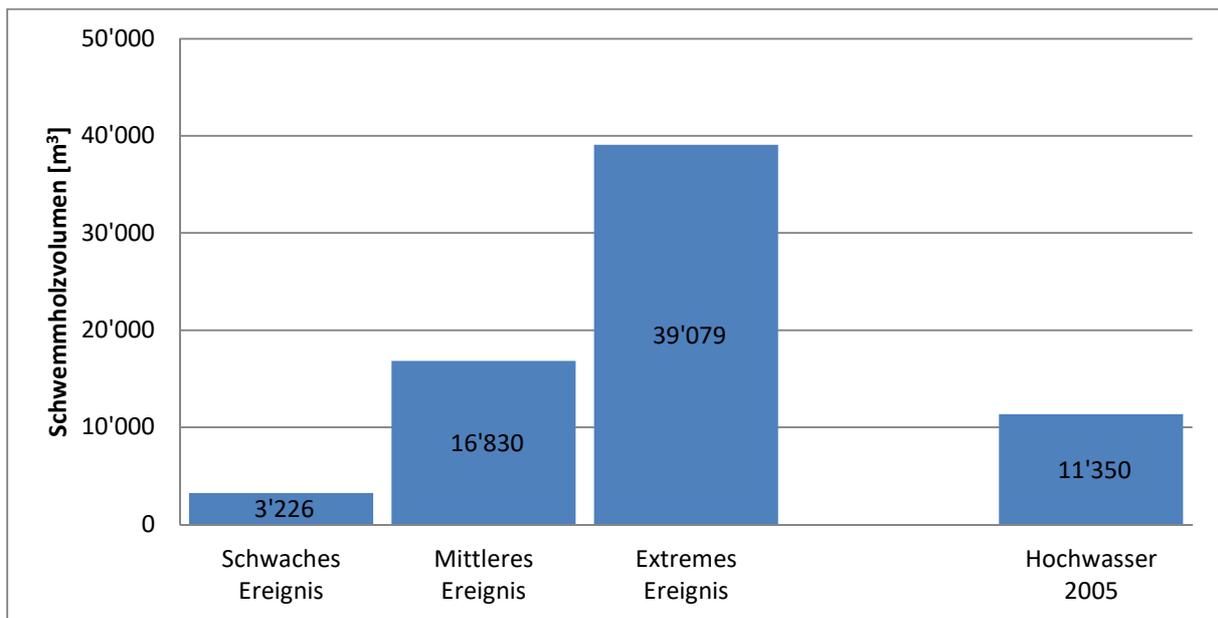


Abbildung 28: Modellierter Schwemmholzmenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2005 im Einzugsgebiet der Chirel

Bei der Chirel variieren die reduzierten Schwemmholzpotentiale von ca. 3000 bis 39'000 m³ (siehe Abbildung 28). Im Vergleich zum modellierten Ereignis liegt das effektive Schwemmholzvolumen des Hochwassers 2005 dementsprechend zwischen einem schwachen und mittleren Ereignis.

Kleine Emme

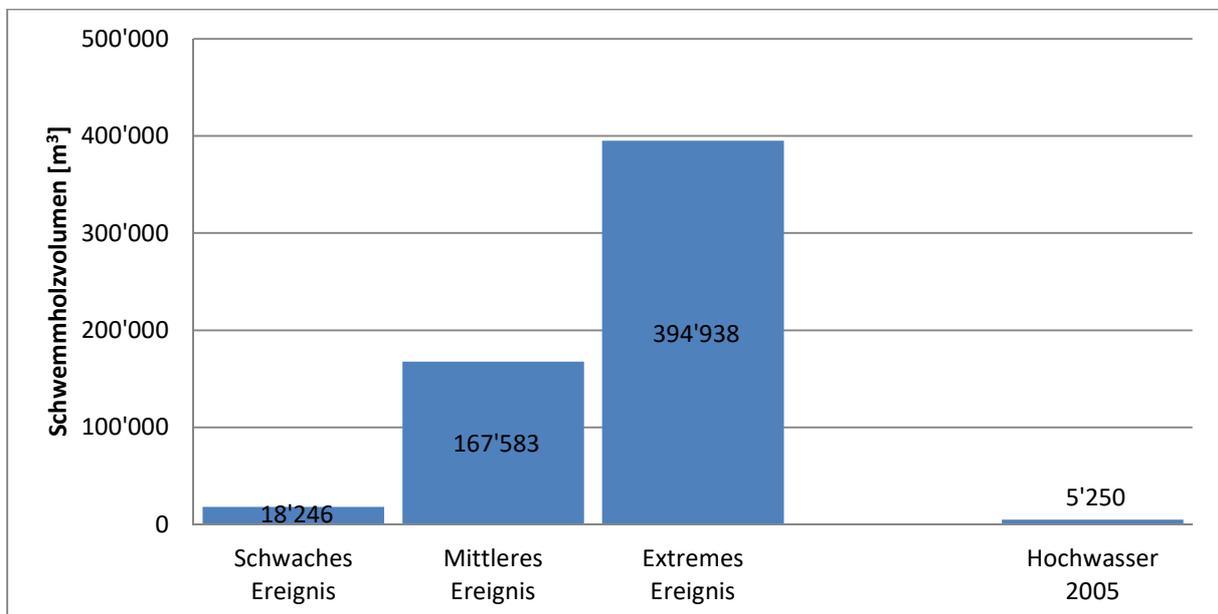


Abbildung 29: Modellierter Schwemmholzmenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2005 im Einzugsgebiet der Kleinen Emme

Abbildung 29 zeigt, dass die Reduktion der Gesamtpotential im Einzugsgebiet der Kleinen Emme zu Resultaten zwischen 18'000 und 400'000 m³ führt. Das effektive Schwemmh Holzvolumen beim Hochwasser 2005 von 5'250 m³ ist dabei deutlich unter dem modellierten schwachen Ereignis.

4.3.3 Totholzanteil

Ein weiterer Output des GIS-Modells ist der Anteil von Tot- und Grünholz am Gesamtpotential.

Tabelle 26: Totholzanteil der berechneten Schwemmh Holzpotentiale in den fünf Testeinzugsgebieten

Einzugsgebiet	Totholzanteil
Grosse Melchaa	5 %
Chiene	11 %
Landquart	5 %
Chirel	10 %
Kleine Emme	12 %

In Tabelle 26 sind die berechneten Anteile von Totholz am potentiellen Schwemmh Holzvolumen der fünf Testeinzugsgebiete aufgelistet, wobei die Werte zwischen 5 – 12 % variieren.

4.4 Weitere Einzugsgebiete

Dieses Kapitel zeigt die Resultate des GIS-Modells bei der Anwendung in den weiteren Einzugsgebieten Sundgraben, Zulg, Secklisbach, Schächen und Saltina.

4.4.1 Schwemmh Holzpotential

Berechnet wurden die potentiellen Schwemmh Holzvolumen der weiteren Einzugsgebiete für die drei verschiedenen Ereignisintensitäten.

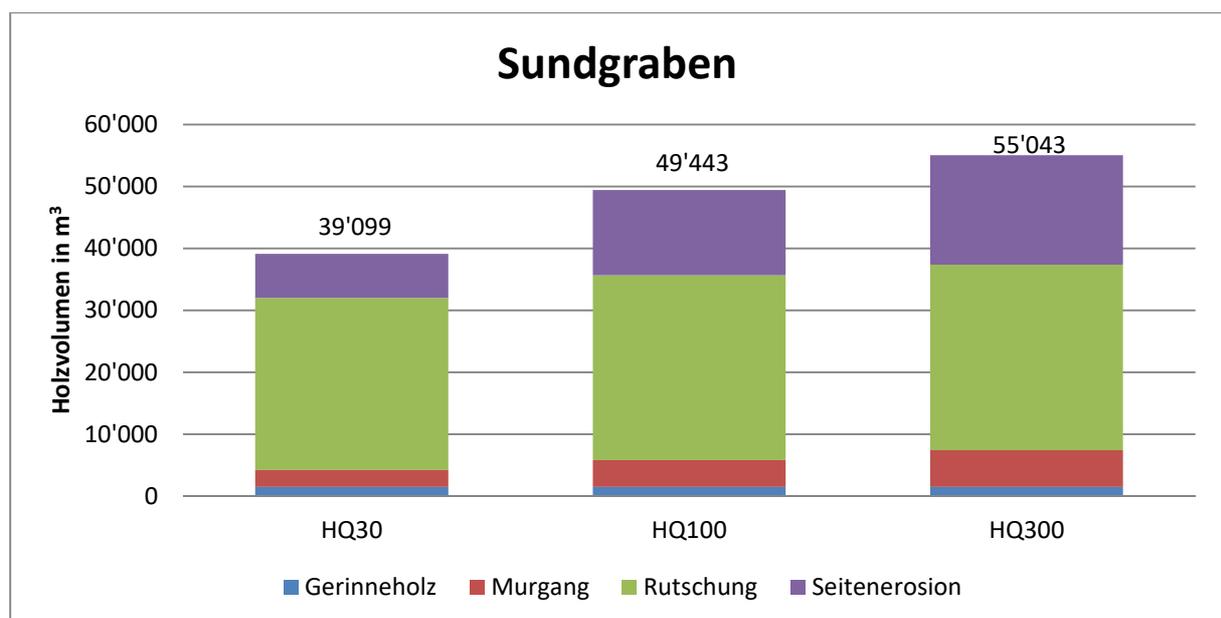


Abbildung 30: Berechnete Schwemmh Holzpotentiale im Einzugsgebiet des Sundgrabens

Das GIS-Modell berechnet für das Einzugsgebiet des Sundgrabens ein Schwemmholtpotential von etwa 40'000 – 55'000 m³ (siehe Abbildung 30). Haupteintragsprozesse sind gemäss Modellierung die Rutschungen an erster und die Seitenerosion an zweiter Stelle.

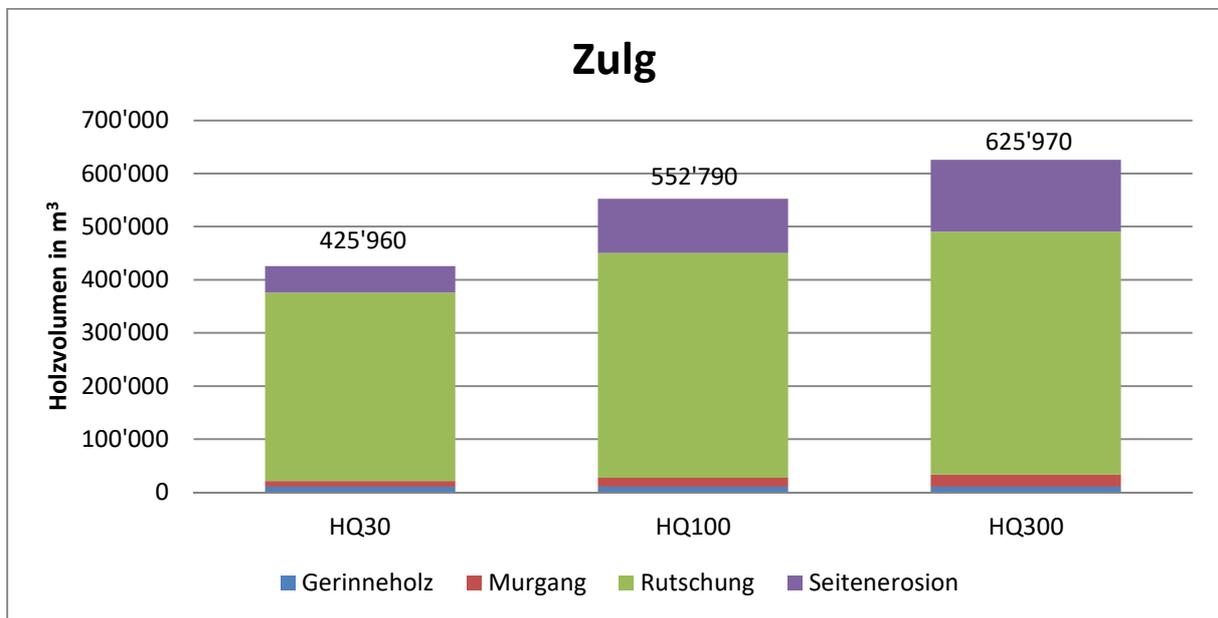


Abbildung 31: Berechnete Schwemmholtpotentiale im Einzugsgebiet der Zulg

In Abbildung 31 sind die Gesamtpotentiale der Zulg dargestellt. Diese variieren von ca. 425'000 – 625'000 m³. Die Rutschungen werden als deutlicher Haupteintrag modelliert.

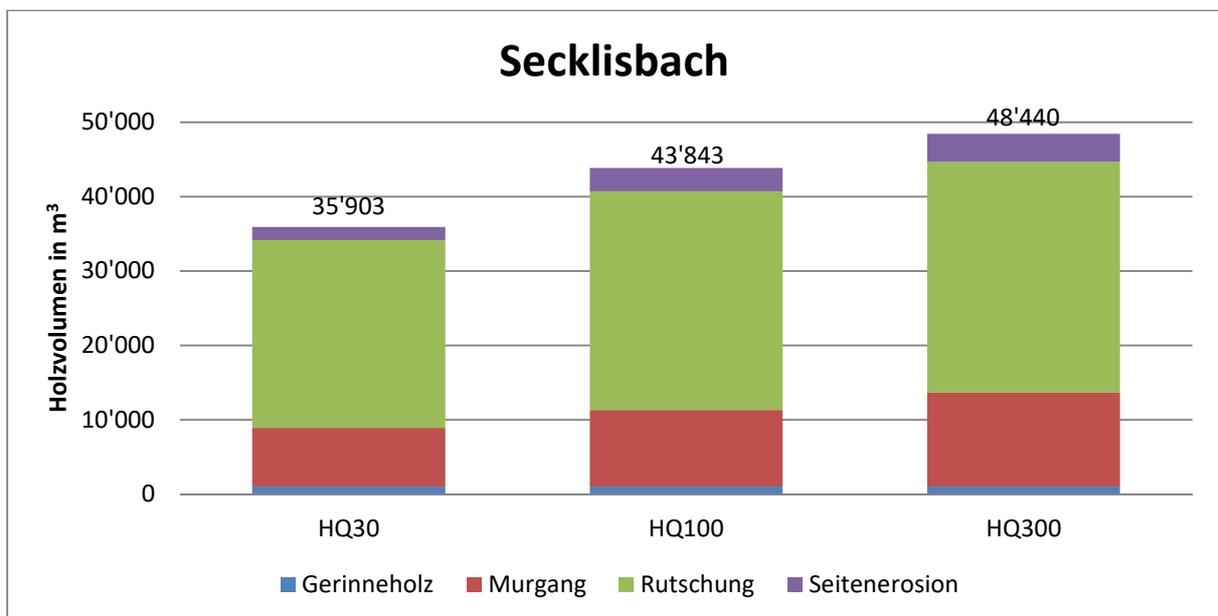


Abbildung 32: Berechnete Schwemmholtpotentiale im Einzugsgebiet des Secklisbachs

Im Einzugsgebiet des Secklisbachs werden potentielle Schwemmholtvolumen zwischen etwa 35'000 – 50'000 m³ berechnet (siehe Abbildung 32). Gemäss Modell machen die Rutschungen dabei den grössten Anteil aus, gefolgt von den Murgängen.

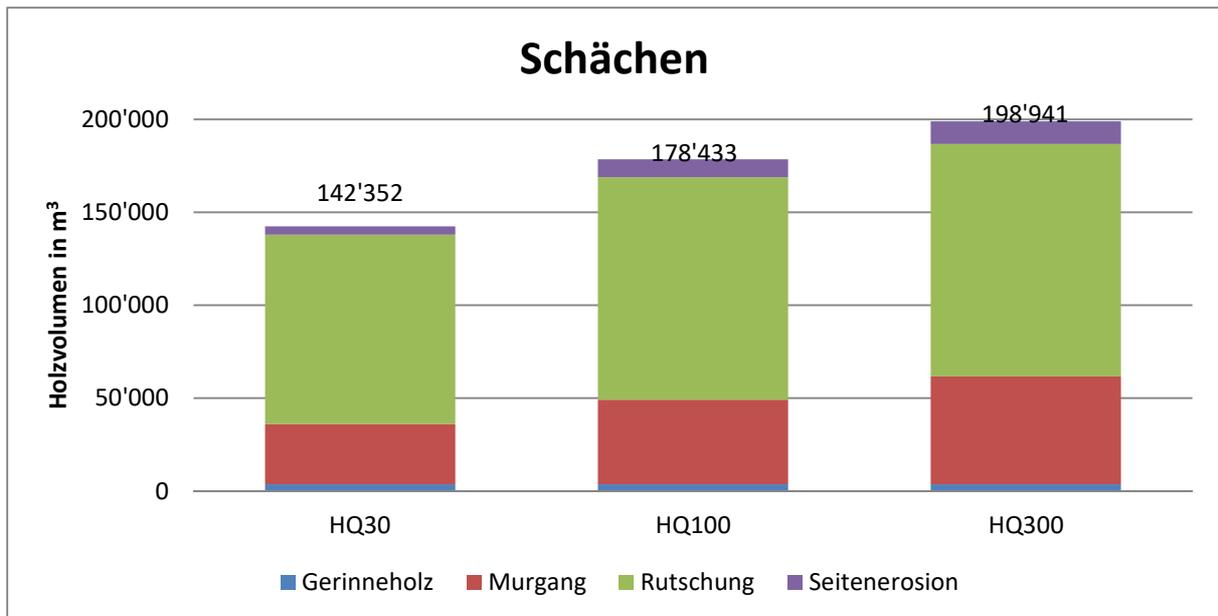


Abbildung 33: Berechnete Schwemmholtzpotentiale im Einzugsgebiet des Schächens

Abbildung 33 zeigt die berechneten Gesamtpotentiale im Einzugsgebiet des Schächens zwischen 140'000 – 200'000 m³. Wie beim Secklisbach werden dabei die Rutschungen als Eintragsprozess mit dem grössten Anteil und die Murgänge mit dem zweitgrössten Anteil modelliert.

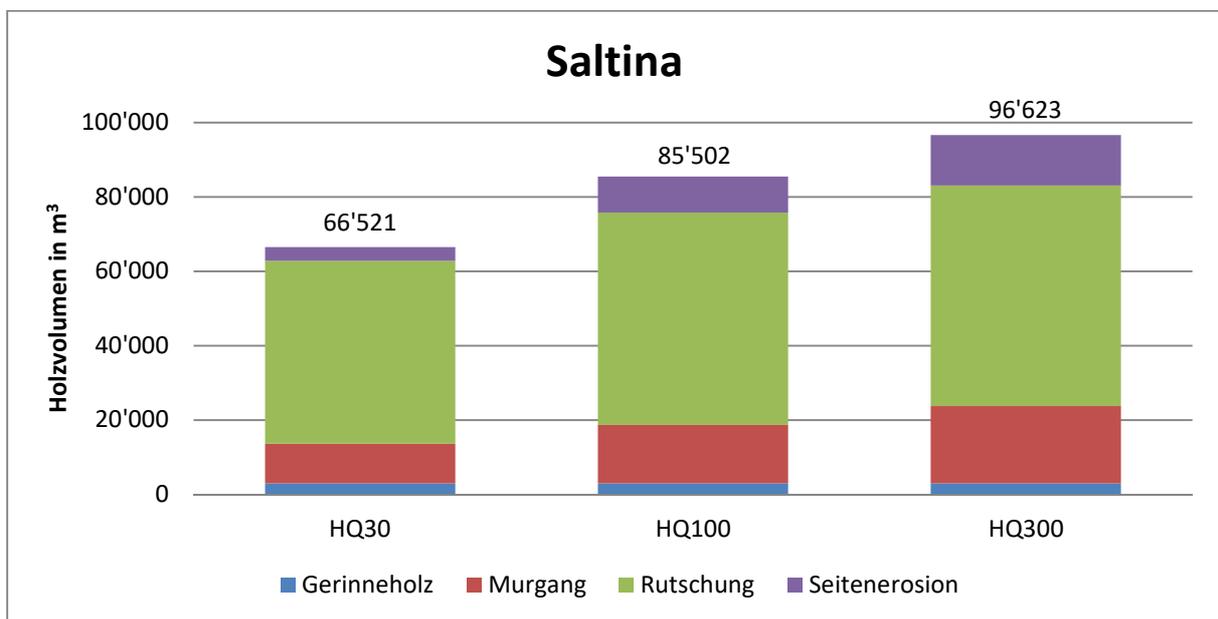


Abbildung 34: Berechnete Schwemmholtzpotentiale im Einzugsgebiet der Saltina

Die Modellierung der Schwemmholtzpotentiale im Einzugsgebiet der Saltina ergibt Volumen von rund 65'000 – 95'000 m³ (siehe Abbildung 34). Ebenfalls werden die Rutschungen als Haupteintragsprozess berechnet.

4.4.2 Effektive Schwemmholumen

Die berechneten Gesamtpotentiale wurden mit den quantifizierten Abminderungsfaktoren reduziert. Die Resultate werden in diesem Kapitel im Vergleich mit dem effektiv gemessenen Volumen dargestellt.

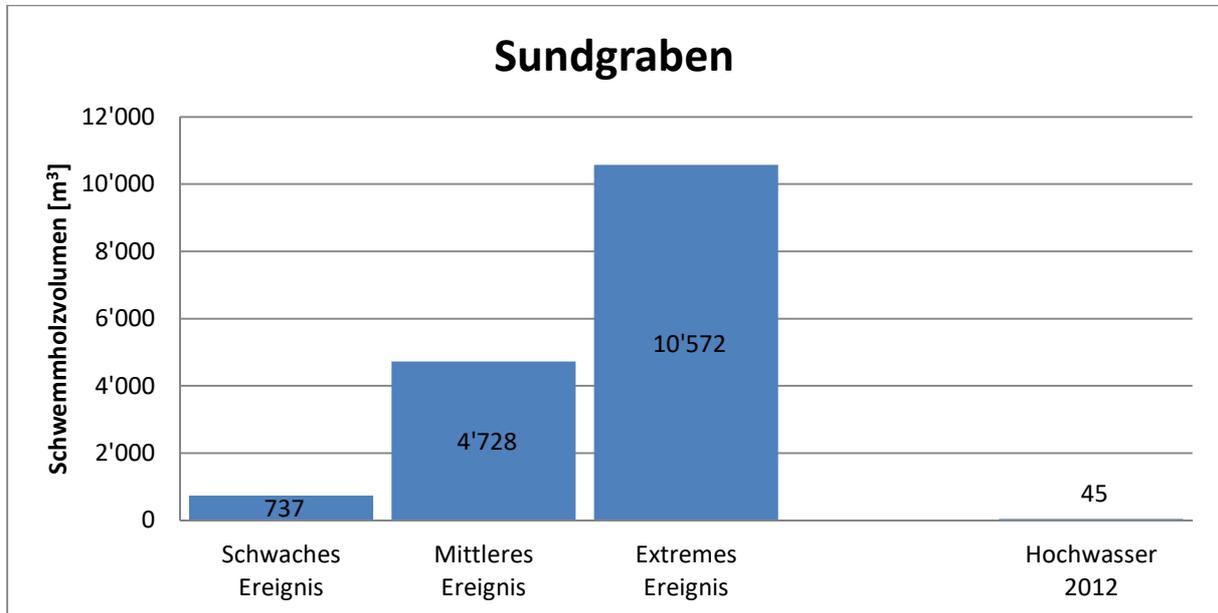


Abbildung 35: Modellerte Schwemmholummenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2005 im Einzugsgebiet des Sundgrabens

Im Januar 2012 transportierten Murgangs- und Rutschungsprozesse im Sundgraben rund 45m³ Schwemmholum mit. Abbildung 35 zeigt, dass im Vergleich mit den reduzierten Potentialen dieser Wert deutlich unter einem modellierten schwachen Ereignis liegt.

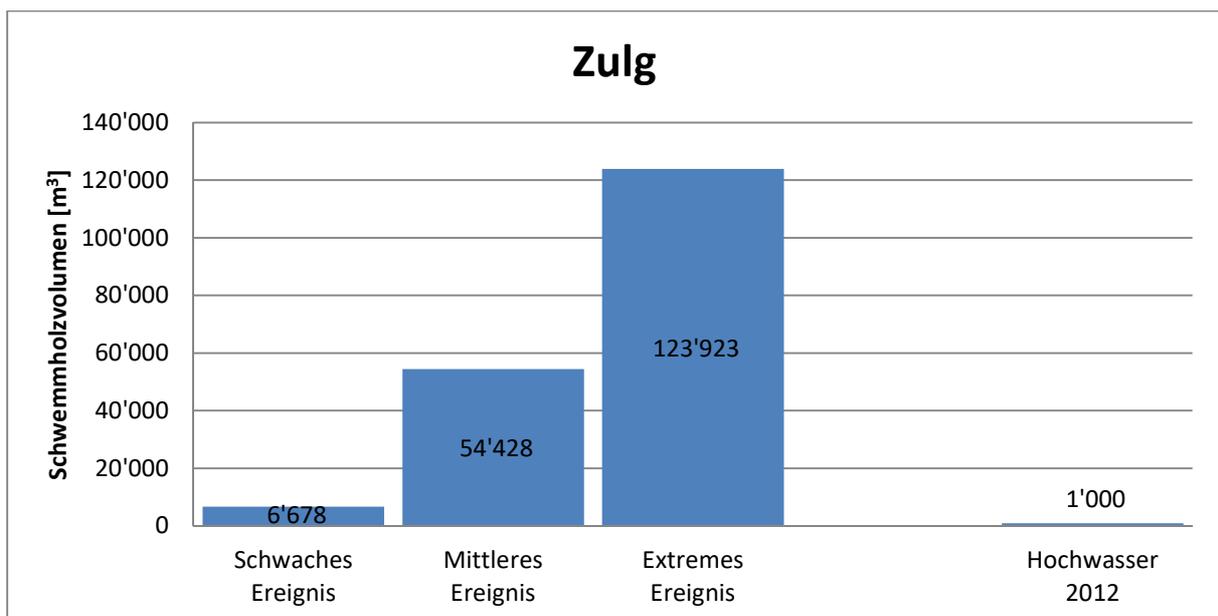


Abbildung 36: Modellerte Schwemmholummenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2012 im Einzugsgebiet der Zulg

Im Einzugsgebiet der Zulg fiel in den letzten Jahren mehrmals Schwemmholz an. Das grösste Volumen wurde im Juli 2012 mitgeschwemmt mit ca. 1'000 m³ Holz. Im Vergleich mit den reduzierten Schwemmholzpotentialen liegt dieser Wert aber deutlich unter einem schwachen Ereignis (siehe Abbildung 36).

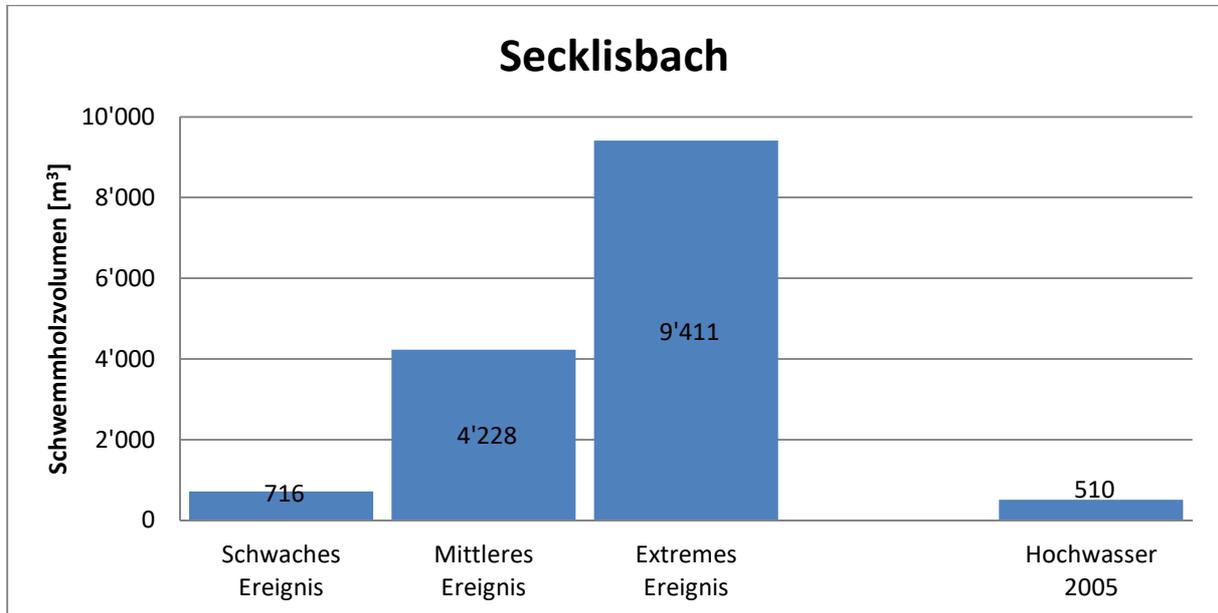


Abbildung 37: Modellierte Schwemmholzmenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2005 im Einzugsgebiet des Secklisbachs

Beim Hochwasser 2005 wurden etwa 510 m³ Schwemmholz im Secklisbach abgelagert. Gemäss Abbildung 37 entspricht dies ungefähr einem schwachen modellierten Ereignis.

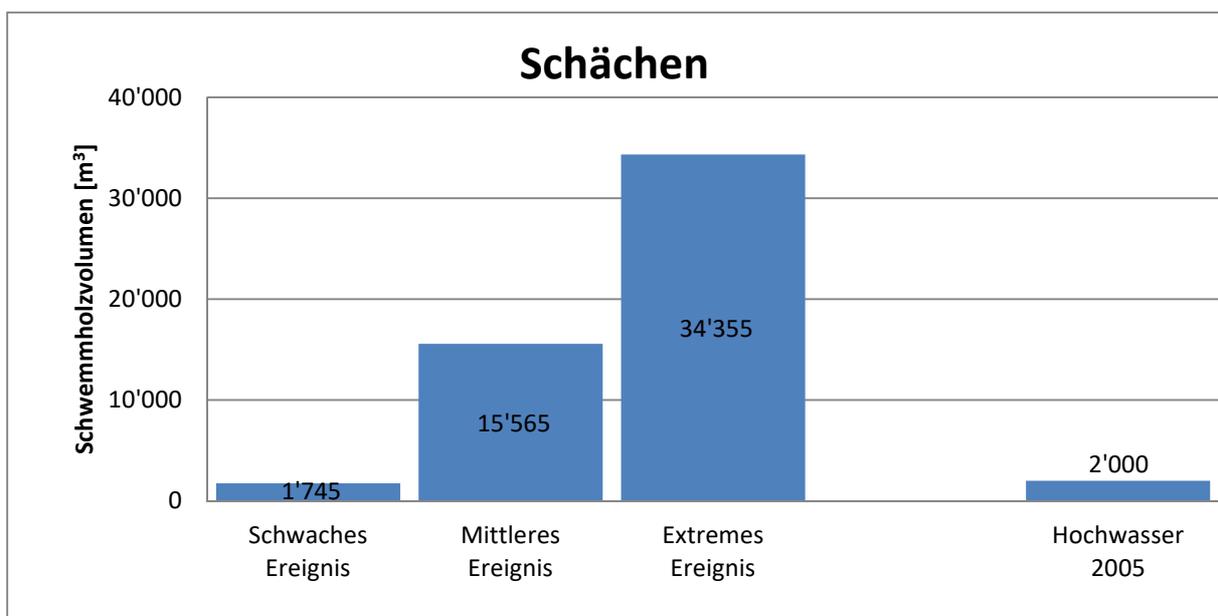


Abbildung 38: Modellierte Schwemmholzmenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 2005 im Einzugsgebiet des Schächens

Rund 2'000 m³ Schwemmholz fiel 2005 beim Schächen an. Der Vergleich dieses Wertes mit den modellierten Ereignissen in Abbildung 38 zeigt auf, dass dies ungefähr einem schwachen Ereignis entspricht.

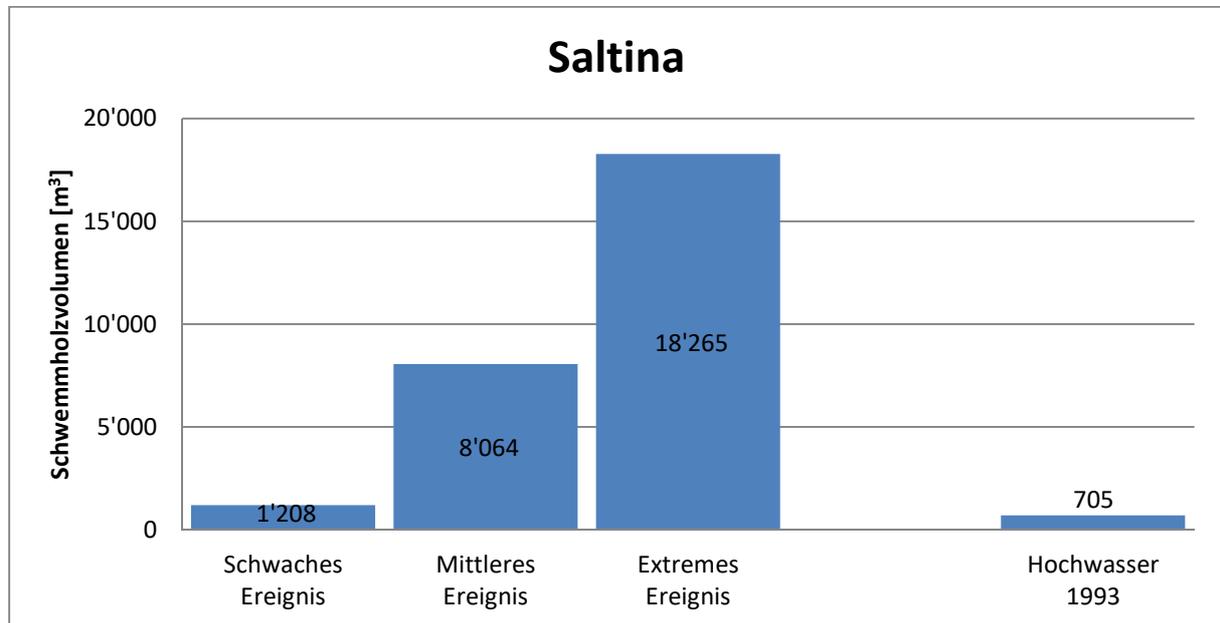


Abbildung 39: Modellierte Schwemmholzmenge im Vergleich zum effektiven Volumen des Hochwassers 1993 im Einzugsgebiet der Saltina

1993 wurden im Einzugsgebiet der Saltina ca. 705 m³ Schwemmholz abgelagert. Dieser Wert liegt unter dem modellierten schwachen Ereignis (siehe Abbildung 39).

4.5 Abminderungsfaktoren

4.5.1 Abminderungsfaktoren aus der Literatur

Abbildung 40 und Abbildung 41 zeigen die Resultate der Anwendung der Abminderungsfaktoren aus den diversen Berichten und Arbeiten an den potentiellen Schwemmholzvolumen der Einzugsgebiete der Grossen Melchaa und der Kleinen Emme, wobei es sich um die reduzierten Werte des modellierten HQ100-Potentials handelt. Wurden aus einem Literaturnachweis mehrere Abminderungsfaktoren verwendet, wird zwischen Minimum, Mittel und Maximum unterschieden. Dabei steht Maximum für einen maximalen Abminderungsfaktor, was gleichbedeutend mit einer kleinen Reduktion ist. Zum Vergleich sind auch das modellierte Schwemmholzpotential ohne Abminderung (gelb) und das effektiv Schwemmholzvolumen nach Steeb et al. (2017) (rot)dargestellt. Die Volumenangaben auf der y-Achse sind dabei aus Darstellungsgründen logarithmisch dargestellt.

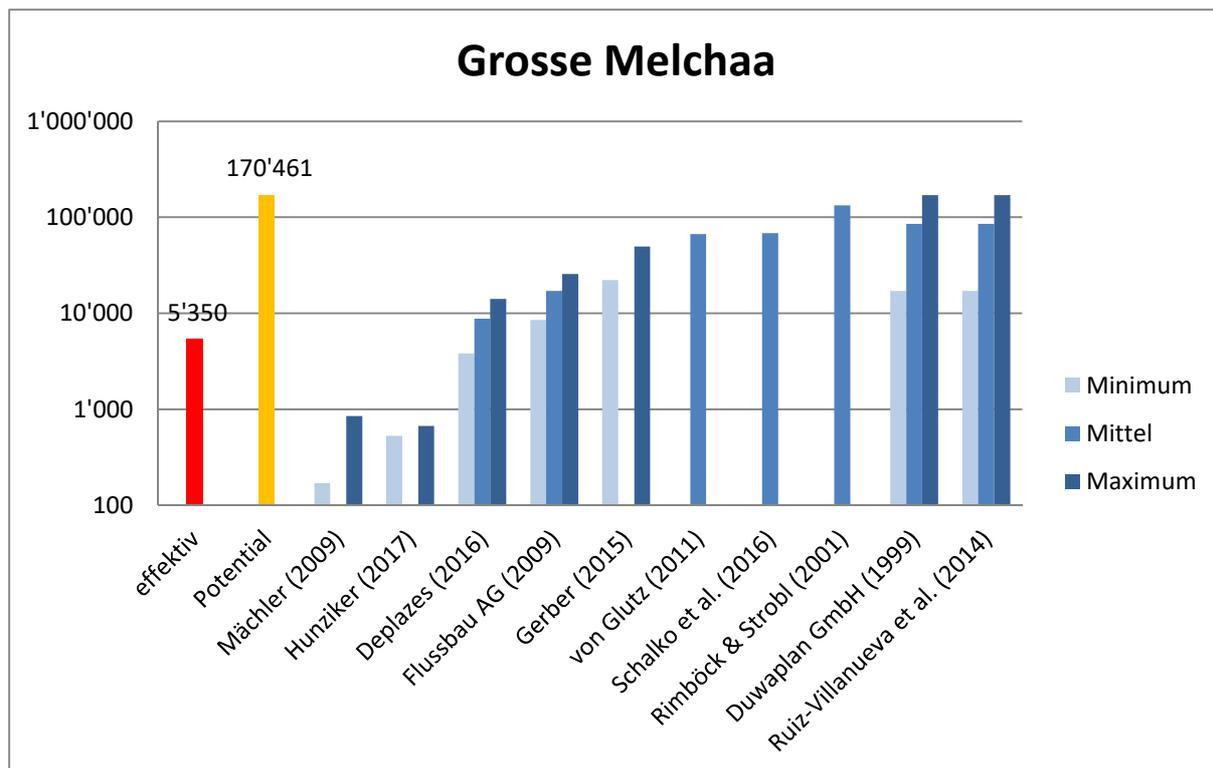


Abbildung 40: Abminderungsfaktoren aus der Literatur angewendet auf das modellierte Schwemmholzpotential im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa

Die reduzierten Werte variieren im Einzugsgebiet zwischen 170 und 170'461 m³ (siehe Abbildung 40). Die grössten Abminderungsfaktoren von Duwaplan GmbH (1999) und Ruiz-Villanueva et al. (2014) gehen davon aus, dass das gesamte Potential mobilisiert wird, weshalb die resultierenden Werte gleich dem Gesamtpotential sind. Auch beim mittleren und minimalen Abminderungsfaktor sind diese beiden Ansätze identisch. Die Abminderungsfaktoren von Mächler (2009) und Hunziker (2017) mindern das Schwemmholzpotential am stärksten. Die resultierenden Volumen werden bis auf unter 1'000 m³ verkleinert. Dies entspricht weniger als 6 % des effektiven Schwemmholzvolumens.

Am nächsten kommt die Reduktion dem effektiven Volumen mit den Abminderungsfaktoren von Deplazes (2016). Diese für jeden Prozess unterschiedlichen Faktoren ergeben in Bezug auf das modellierte Schwemmholzpotential Resultate von etwa 3'800 – 14'100 m³, was ca. 70 – 265 % der effektiven Menge von 2005 entspricht. Aber auch die Flussbau AG (2009), welche in der Schwemmholzstudie zur Sihl einheitliche Reduktionsfaktoren von 5, 10 und 15 % annimmt, kommt dem effektiven Schwemmholzvolumen zumindest beim minimalen Wert relativ nah.

Die Anwendung der Abminderungsfaktoren aus den restlichen Studien reduzieren das Potential klar zu wenig.

Die Verhältnisse der reduzierten Volumen zum effektiven Schwemmholzvolumen haben bei der Chienne, Landquart und der Chirel etwa das gleiche Ausmass wie bei der Grossen Melchaa. Zu den genauesten Ergebnissen im Vergleich mit dem effektiven Volumen führen auch bei diesen drei Einzugsgebieten die Abminderungsfaktoren von Deplazes (2016) und Flussbau AG (2009).

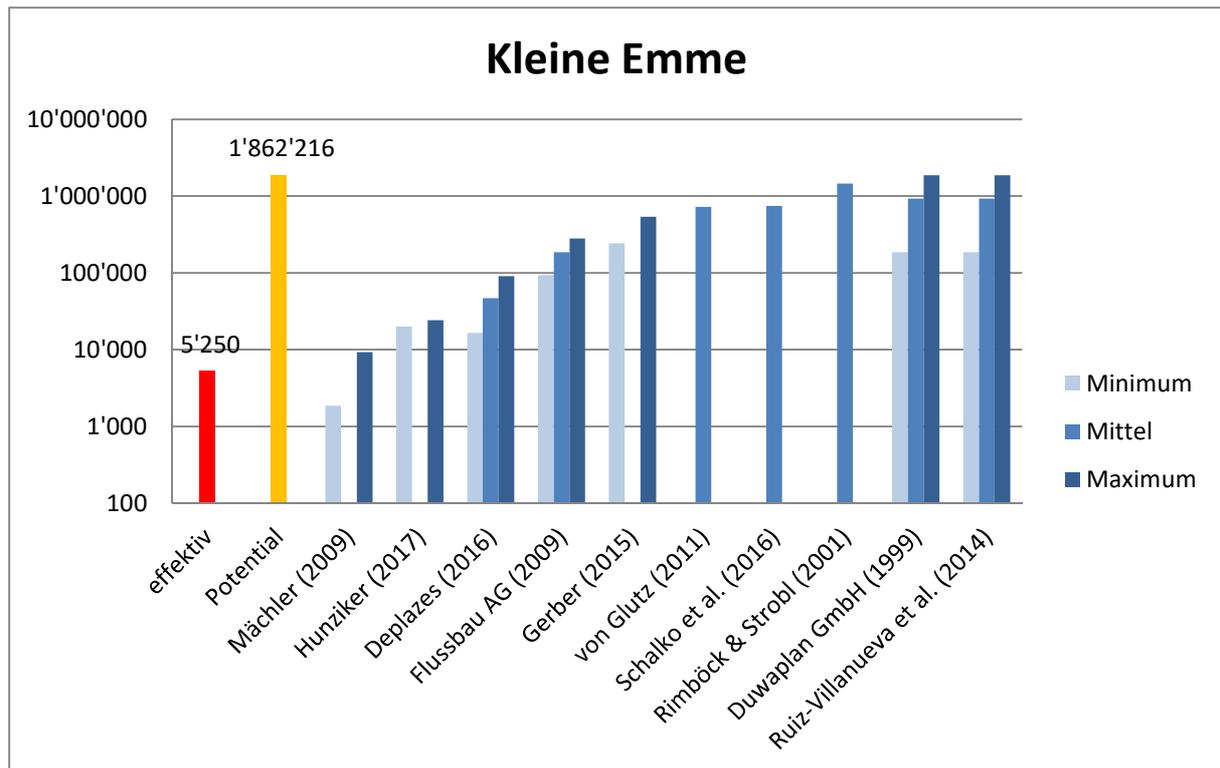


Abbildung 41: Abminderungsfaktoren aus der Literatur angewendet auf das modellierte Schwemmholzpotential im Einzugsgebiet der Kleinen Emme

Die verschiedenen Abminderungsfaktoren aus der Literatur angewendet auf das Schwemmholzpotential der Kleinen Emme führen zu Ergebnissen zwischen 1'862 und 1'862'216 m³ (siehe Abbildung 41). Wie bei den anderen vier Testeinzugsgebieten resultiert das tiefste Volumen bei Mächler (2009) (Abminderungsfaktor = 1 %) und das grösste bei Duwaplan GmbH (1999) und Ruiz-Villanueva et al. (2014) (Abminderungsfaktor = 100 %).

Da das Potential sehr gross ist, das effektive Volumen aber ungefähr das gleiche Ausmass wie bei den anderen Testeinzugsgebieten hat, muss das potentielle Volumen viel stärker reduziert werden, um sich dem effektiven anzunähern. Aus diesem Grund sind trotz Abminderung die meisten Volumen immer noch zu gross. Einzige Ausnahme sind der Abminderungsfaktor von Mächler (2009), welche der effektiven Menge am nächsten kommen.

4.6 Zusammenhang der Schwemmholzmenge mit anderen Variablen

Tabelle 27 stellt die Ergebnisse der Rangkorrelationsanalyse nach Spearman dar, welche mit der effektiven Schwemmholzmenge von vergangenen Hochwasserereignissen und unterschiedlichen Variablen durchgeführt wurde. Dabei wird der Korrelationskoeffizient (ρ) und die Anzahl einberechneter Stichproben (N) angegeben, sowie ob die ermittelte Korrelation signifikant auf dem 0.05 Niveau ist. Ist dies der Fall, dann kann angenommen werden, dass der gemessene Zusammenhang für die Grundgesamtheit gilt.

Tabelle 27: Ergebnisse der Rangkorrelationsanalyse zwischen der effektiven Schwemmh Holzmenge und unterschiedlichen Variablen

Variable	Rho	Signifikant (p ≤ 0.05)	N
Einzugsgebietsfläche	0.619	Ja	194
Gerinnelänge	0.446	Ja	165
Bewaldete Gerinnelänge	0.442	Ja	163
Absolute Waldfläche	0.537	Ja	166
Mittlere Höhenlage	0.181	Ja	144
Wasserfracht	0.659	Ja	44
Niederschlagsintensität	0.228	Nein	70

Eine starke Korrelation wird der Schwemmh Holzmenge zur Einzugsgebietsfläche, absolute Waldfläche und Wasserfracht nachgewiesen.

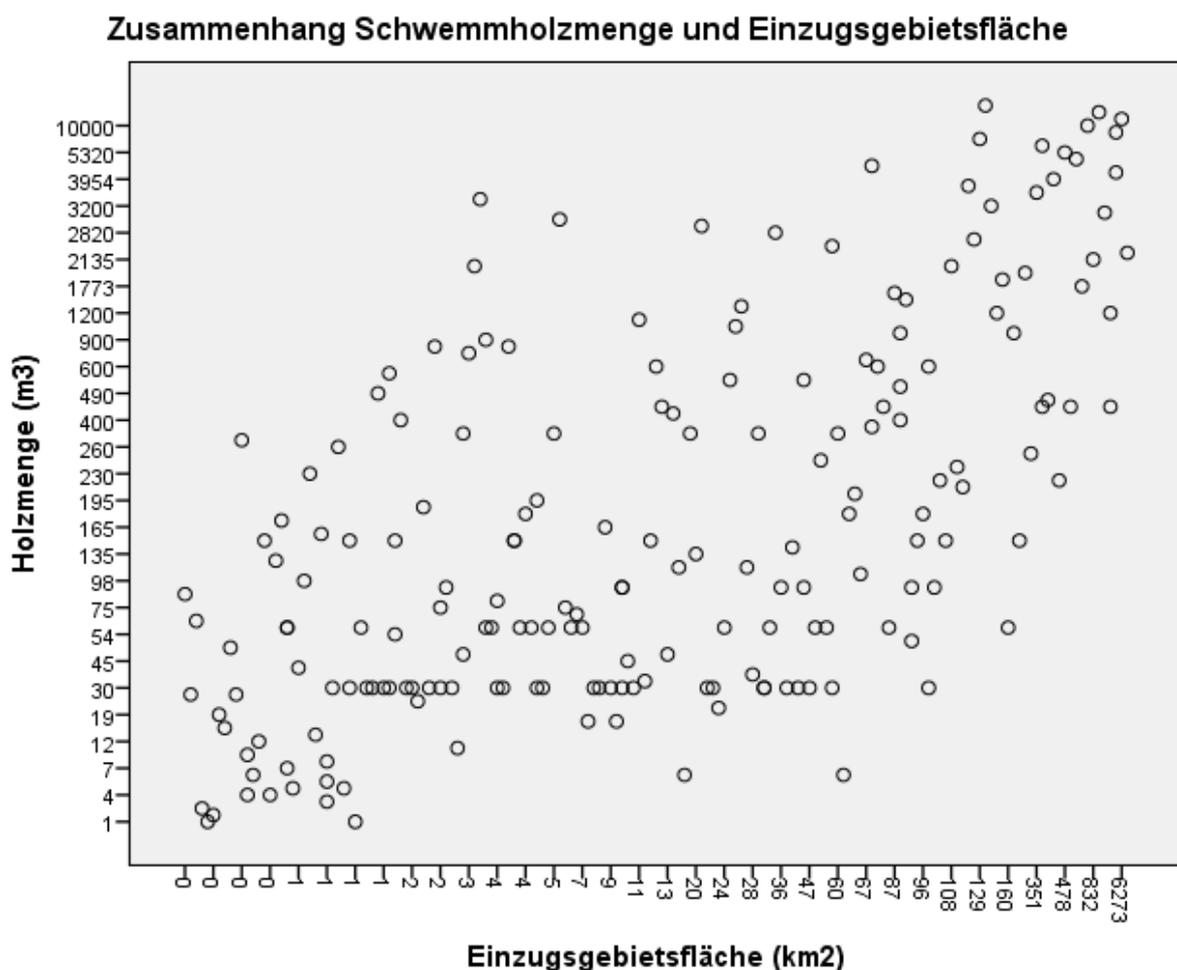


Abbildung 42: Zusammenhang zwischen der effektiven Schwemmh Holzmenge und der Einzugsgebietsfläche

Die positive Korrelation zwischen der Schwemmh Holzmenge und der Einzugsgebietsfläche ist auch im Streudiagramm in Abbildung 42 sichtbar. Die Ecken oben links und unten rechts sind praktisch leer, was bedeutet, dass bei den dokumentierten Hochwasserereignissen mit Schwemmh Holzanzahl in fast

keinem kleinen Einzugsgebiet ein sehr grosses Schwemmholzvolumen und in keinem grossen Gebiet nur ein sehr kleines Volumen gemessen wurde.

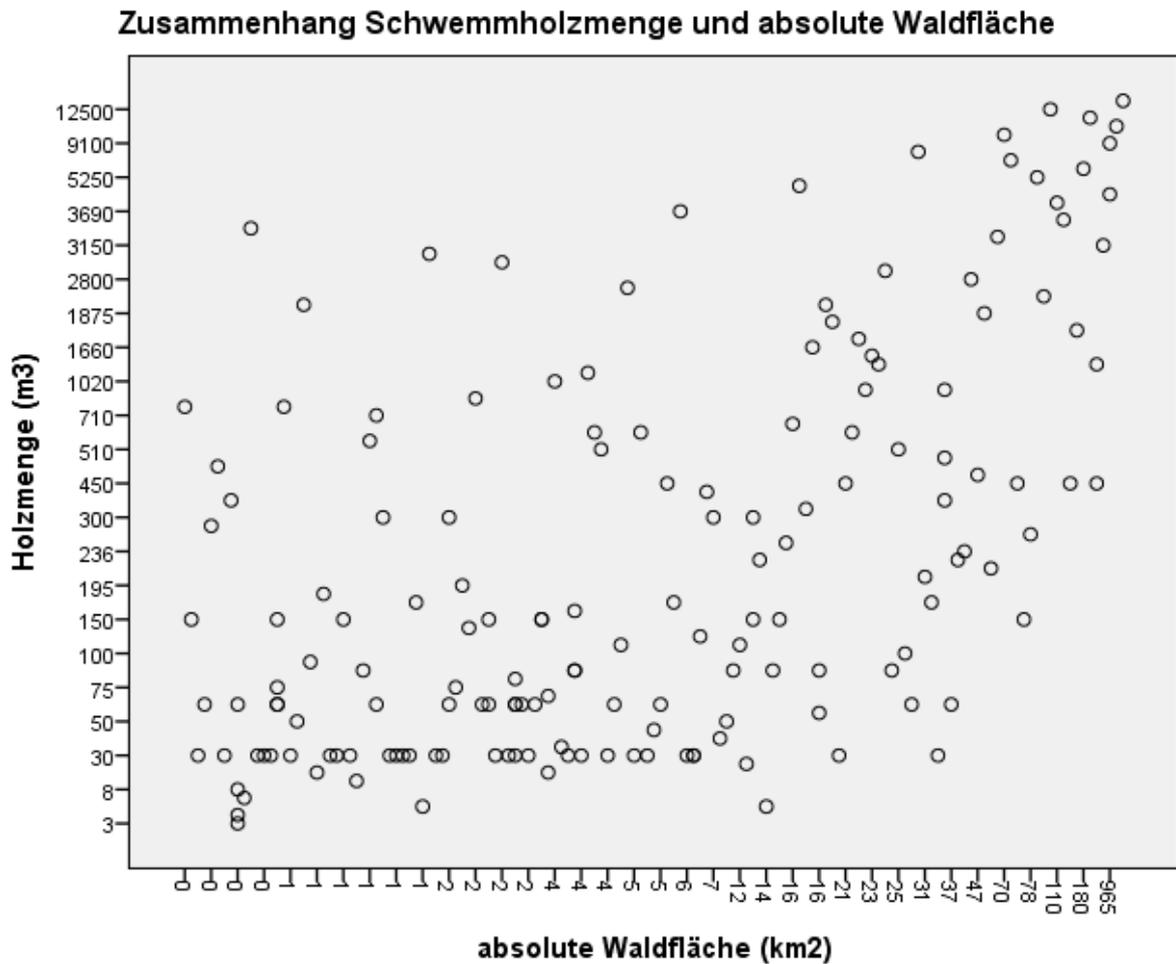


Abbildung 43: Zusammenhang zwischen der effektiven Schwemmholzmenge und der Einzugsgebietsfläche

Die starke Korrelation der Schwemmholzmenge mit der absoluten Waldfläche zeigt auch das Streudiagramm in Abbildung 43 auf, indem die Werte mehrheitlich zwischen der linken unteren Ecke (geringe Holzmenge & kleine Waldfläche) und der oberen rechten Ecke (grosse Holzmenge & grosse Waldfläche) verteilt sind. Grundsätzlich gilt also, je grösser die Waldfläche, desto mehr Schwemmholz fällt an.

Zusammenhang Schwemmholzmenge und Wasserfracht

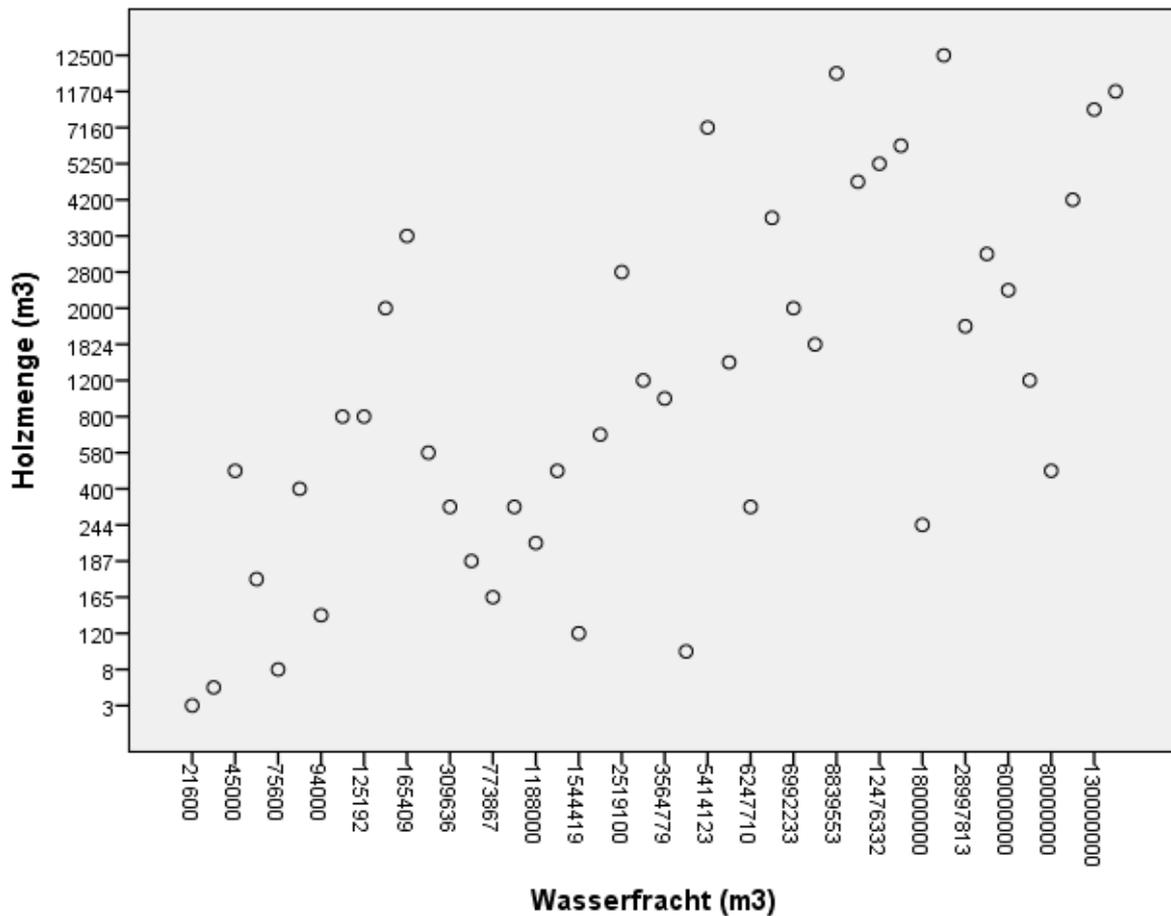


Abbildung 44: Zusammenhang zwischen der effektiven Schwemmholzmenge und der Wasserfracht

Der mittlere positive Zusammenhang der Schwemmholzmenge mit der Wasserfracht ist auch auf dem Streudiagramm (Abbildung 44) zu erkennen. Die Werte verteilen sich mehrheitlich zwischen links unten und oben rechts, was davon zeugt, dass grosse Schwemmholz mengen eher mit grossen Wasserfrachten und kleine Mengen eher mit kleinen Wasserfrachten korrelieren. Bei einem Hochwasser mit einer hohen Wasserfracht ist also mit mehr Schwemmholz zu rechnen.

Eine mittlere Korrelation der effektiven Schwemmholzmenge wird zu der Gerinnelänge und der bewaldeten Gerinnelänge festgestellt. Grundsätzlich ist also die Schwemmholzmenge also eher höher bei Einzugsgebieten mit einem langen Gewässernetz bzw. mit langen bewaldeten Gewässernetzabschnitten.

Die Rangkorrelationsanalyse mit der Schwemmholzmenge und der mittleren Höhenlage respektive der Niederschlagsintensität ergibt nur einen schwachen Zusammenhang. Die Korrelation mit der Niederschlagsintensität ist allerdings gar nicht signifikant. Das heisst also, dass die mittlere Höhenlage und die Niederschlagsintensität kaum Einfluss auf das Schwemmholzvolumen haben.

5 Diskussion

Im Diskussionsteil werden die Methoden und die Erkenntnisse der Resultate dieser Arbeit kritisch diskutiert und Verbesserungsmöglichkeiten vorgeschlagen.

5.1 Methoden

In diesem Unterkapitel werden die Methoden zur Berechnung des Schwemmholtzpotentials beleuchtet, die Wahl der Parameter für das GIS-Modell begründet und Vorschläge für mögliche Änderungen zur Verbesserung des Modells präsentiert.

5.1.1 Gerinneholz

Eine negative Korrelation der Schwemmholtzmenge mit der Gerinnebreite wird in mehreren Arbeiten nachgewiesen wie beispielsweise von Warren et al. (2007) oder Morris et al. (2007). Eine Berücksichtigung der Gerinnebreite wie bei den Ansätzen der 2. Iteration macht also Sinn. Der Ansatz von Ruiz-Villanueva et al. (2016) kalkuliert bei grossen Gerinnebreiten eher geringere Holzvolumen als der Ansatz von Gurnell (2013). Dies erscheint mir sinnvoll, da bei breiteren Gerinnen in flacheren Gegenden eher Holzräumung erwartet werden muss, was das Gerinneholzvolumen massiv reduziert. Deshalb wird für das GIS-Modell der Ansatz von Ruiz-Villanueva et al. (2016) verwendet.

Trotz Differenzierung der Gerinnebreite ist diese Berechnungsmethode sehr allgemein. Dies vor allem, da die Menge an Gerinneholz von zahlreichen weiteren Faktoren abhängig ist, wie beispielsweise der Baumart, der Topographie, der Transportaktivität des Fliessgewässers, der Intensität der Eintragsprozesse und Unterhaltmassnahmen durch den Menschen (Rickli & Bucher, 2006), welche in dieser Berechnungsmethode nicht berücksichtigt werden. Die Einbeziehung solcher Faktoren kann die Berechnung des Gerinneholzpotentials genauer machen. Beispiele sind eine stärkere Differenzierung der Gerinnebreite mittels der FLOZ oder eine Bestimmung der Natürlichkeit eines Gewässers mit Hilfe eines Indikators.

5.1.2 Seitenerosion

Gemäss Steeb et al. (2017) und Waldner et al. (2009) trug die Seitenerosion beim Hochwasser 2005 relativ viel zum gesamten Schwemmholtzeintrag bei. Der verhältnismässige Anteil des Eintrages durch Seitenerosion wird bei der Modellierung mit beiden Berechnungsansätzen prinzipiell eher unterschätzt. Auf Grund der höheren Ergebnisse beim Ansatz der 2. Iteration, wird dieser als Berechnungsmethode im GIS-Modell bestimmt. Diese Wahl wird durch Bachmann Walker (2012) bestärkt, welche in ihrer Arbeit eine positive Korrelation zwischen der Gerinne- und der Erosionsbreite nachweist.

Bart (2012) hat Erfahrungswerte von Rückgriffweiten in Abhängigkeit zur Einzugsgebietsgrösse und der Jährlichkeit aufgelistet. Diese Werte bewegen sich bei einem Hochwasser mit einer Jährlichkeit von 30 Jahren zwischen 3 und 13m, bei 100 Jahren zwischen 4 und 19m und bei 300 Jahren zwischen 5 und 25m. In diesem Rahmen bewegt sich auch die Mehrheit der berechneten Weiten gemäss dem

Ansatz der 2. Iteration.

Für eine einheitliche Modellierung der Seitenerosionsfläche macht somit eine Abhängigkeit von der Gerinnebreite Sinn, für eine genaue Bestimmung der potentiellen Rückgriffweite für ein kleinräumiges Gebiet müssten aber zahlreiche andere Faktoren miteinbezogen werden. Möglichkeiten dafür sind die Sinuosität des Flussverlaufes (wie in Ruiz-Villanueva et al. (2014)), das Ausmass der anthropogenen Flussbegradigung, der Verbauungsgrad des Uferbereiches, der Untergrund des Gerinnes oder die Bodeneigenschaften der Uferböschung.

5.1.3 Rutschungen

Die Breite des Puffers wird je nach Ereigniswahrscheinlichkeit konstant auf 5, 10 oder 15m gesetzt. Die Untersuchung zahlreicher Rutschungsflächen in verschiedenen Gebieten durch Rickli (2008) zeigt für die Breite Medianwerte von 12 – 15m. Die Verteilung der Werte von im Minimum 5.7m bis maximal 68m zeigt aber auch, dass die Breite einzelner Rutschungen massiv variieren kann. Im Vergleich mit diesen Werten sind die Annahmen von den einheitlichen Breiten für das Modell eher konservativ gewählt. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass für das Projekt SilvaProtect enorm viele Trajektorien ausgeschieden wurden und dass deren Pufferflächen ohnehin eine sehr grosse Fläche bilden. Die Länge der von Rickli (2008) dokumentierten Rutschungen beträgt im Maximum 116m. Dies lässt darauf schliessen, dass eine maximale Entfernung des Anrissbereichs vom Gewässer von 100m durchaus Sinn macht und die Rutschungsfläche nicht zu stark eingrenzt.

Die SilvaProtect-Trajektorien für Rutschungen wurden wie auch bei den Murgängen auf Grundlage mehrerer Faktoren berechnet (Losey, 2013), weshalb angenommen werden kann, dass deren räumliche Verteilung im Grundsatz stimmt.

Eine Alternative zur Bestimmung von möglichen Rutschungsflächen ist die Verwendung von Gefahrenhinweiskarten, welche potentielle Gefahrengebiete ausserhalb von Siedlungsgebieten dokumentieren. Dieser Ansatz wurde beispielsweise von Deplazes (2016) gewählt. Solche Karten unterscheiden sich allerdings von Kanton zu Kanton hinsichtlich der Erarbeitungsmethodik und eine Harmonisierung der kantonalen Daten zu einem schweizweit einheitlichen Modell ist erst im Aufbau (BAFU, 2016). Bei der verwendeten Methode zur Bestimmung des potentiellen Schwemmhölzeintrages durch Rutschungen resultieren sehr grosse Flächen. Eine solche Überschätzung der Rutschungsflächen könnte durch kleinere Abminderungsfaktoren oder durch eine stärkere Eingrenzung der Trajektorien (z.B. auf 50 m) limitiert werden. Letzteres würde Sinn machen, da Benda & Bigelow (2014) zwar eine maximale Distanz des eingetragenen Holzes zum Gewässer von ungefähr 100 m nachweisen, gleichzeitig aber auch feststellen, dass über 80 % des eingetragenen Holzes von Bereichen stammt, welche weniger als 50 m Abstand zum Gewässer haben.

5.1.4 Murgänge

Typische Murgangbreiten sind in der Literatur kaum vorhanden. Da Murgänge aber häufig in Gerinnen aktiv sind (BAFU, 2015), ist die Breite eines Murganges oftmals durch die Gerinnebreite limitiert.

Hürlimann et al. (2008) empfehlen die Breite eines Murganges im Feld zu bestimmen. Diese wäre aber für ein nationales Modell wie dieses zu aufwändig und würde nicht zu konstanten Werten führen.

Aus diesem Grund werden für die Modellierung die Murgang-Trajektorien von SilvaProtect je nach Jährlichkeit mit einheitlichen Breiten von 5, 10 und 15m gepuffert. Die Annahmen für die Breiten können durch Willi et al. (2015) teilweise bestätigt werden, welche in der Untersuchung von Murgang-aktiven Gerinnen Bachbettbreiten zwischen 2 und 15m gemessen haben.

Im Gegensatz zu den Unsicherheiten der Murgangbreiten kann für die Lage der Trajektorien eine hohe Übereinstimmung mit den potentiellen Murganggerinnen erwartet werden, da diese im Project SilvaProtect aufwändig berechnet und geeicht wurden (Losey, 2013).

Eine mögliche Alternative zur Bestimmung potentieller Murgangsflächen ist wie bei den Rutschungen der Einbezug von Gefahrenhinweiskarten. Ein solcher Ansatz wurde von Deplazes (2016) und Mazzorana et al. (2009) gewählt. Stärker reduziert werden könnten die potentiellen Murgangsflächen durch die Berücksichtigung der Gerinneneigung. Mit Hilfe eines Grenzwertes könnten nur die steilsten Gerinne als aktive Murgänge festgelegt werden. Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit wäre die Unterscheidung zwischen Eintrags- und Ablagerungsflächen von Murgängen, da von den Ablagerungsflächen kaum Schwemmhölzeintrag erwartet werden kann.

5.1.5 Zusammenführung der Prozessflächen

Bei der Zusammenführung der Prozessflächen wird folgende Reihenfolge der Prioritäten beachtet: Gerinne > Murgang > Seitenerosion > Rutschung.

Bei einem Hochwasserereignis ist das ganze Gerinne von der Flut betroffen, weshalb dessen Fläche bei der Zusammenführung die oberste Priorität hat. Gelangt eine Rutschung in ein Wildbachgerinne, fließt sie als Murgang weiter (BAFU, 2015). Deshalb wird dem Prozess der Murgänge die höhere Priorität zugeordnet. Die Seitenerosion wird den Rutschungen bei der Zusammenführung vorrangig behandelt. Eine solcher Priorisierung begründet Hunziker (2017) damit, dass die Ufererosionsbereiche bei einem Hochwasser stärker exponiert sind und das Holz somit leichter mobilisiert werden kann. Rutschungen hingegen werden nicht unbedingt durch die Flutwellen erzeugt und das Holz muss zuerst über eine gewisse Strecke in das Gerinne transportiert werden. Ausserdem wird der Schwemmhölzbeitrag durch Rutschungen auf Grund der Vielzahl an Hangmure-Trajektorien ohnehin überschätzt.

Der Abzug der Überschneidungsflächen reduziert das Schwemmhölzpotential deutlich. Ohne Mehrfachzählung dieser Flächen wird das Total um ca. 10 – 30 % (1. Iteration) respektive ca. 20 – 50 % (2. Iteration) reduziert, was aufzeigt, dass gemäss Modell eine beachtliche Fläche von mehreren Eintragsprozessen betroffen ist.

Da jedoch die Prozessflächen unabhängig vom Prozess (mit Ausnahme des Gerinnes) mit dem gleichen Holzvorrat multipliziert werden, spielt die Reihenfolgen der Priorisierung der Prozesse Seitenerosion, Murgang und Rutschung für das gesamte Schwemmhölzpotential keine Rolle. Eine andere

Prioritätenliste bei der Zusammenführung ergäbe nur für die Teilpotentiale der einzelnen Prozesse andere Resultate.

Zu beachten ist, dass die verwendeten Waldflächen von SilvaProtect (SilvaProtect-CH © 2013 BAFU) vor dem Hochwasser 2005 aufgenommen wurden. Flächen, von denen 2005 im grossen Stile Holz wegerodiert wurde, können in der Modellierung also fälschlicherweise als potentielle Schwemmhöflä-chen bestimmt werden, obwohl dort seit 2005 gar keine oder erst kleine Bäume stehen.

5.2 GIS-Modell

5.2.1 Schwemmhöflöpotential

Einen Vergleich der modellierten potentiellen Schwemmhöflövolumen mit Gesamtpotentialen aus anderen Studien zu machen, um sie zu testen, ist schwierig, da diese sehr stark von der jeweiligen Berechnungsmethode abhängen und das Potential in der Natur nicht direkt messbar ist. Ausserdem gibt es kaum Schwemmhöflöanalysen, in welchen das Schwemmhöflöpotential für die gleichen Einzugsgebiete ermittelt wurde. Eine Ausnahme ist die Masterarbeit von Deplazes (2016), in welcher sie unter anderem das Schwemmhöflöpotential für die Chiene und der Chirel berechnet hat. Dieses wird bei der Chiene auf etwa 135'000 m³ und bei der Chirel auf ca. 170'000 m³ geschätzt, was ungefähr dem in dieser Arbeit modellierten HQ100-Ereignis entspricht (Tabelle 15 bzw. Tabelle 17). Ausserdem wurde in der Untersuchung zum Schwemmhöflöaufkommen in der Zulg und deren Seitenbächen von Hunziker (2017) das Schwemmhöflöpotential dieses Einzugsgebietes ermittelt, wobei ein Gesamtpotential von 355'000 m³ resultiert. Dieses ist etwas kleiner als das mit dem GIS-Modell berechnete HQ30-Potential, welches 425'960 m³ beträgt (Abbildung 31). Der höhere Wert ist aber vor allem auf den grösseren verwendeten Holzvorratsdurchschnitt von 360 m³/ha (im GIS-Modell: 446.6 m³/ha) zurückzuführen, da die modellierte potentielle Fläche von 984 ha (im GIS-Modell: 893 ha) bei Hunziker (2017) sogar grösser ist.

Besser vergleichbar sind hingegen die prozentualen Anteile der verschiedenen Prozesse. Dieser Vergleich zeigt, wie gut die modellierten Anteile des Potentials mit den gemessenen Anteilen des effektiven Volumens übereinstimmen. Eine geringe Übereinstimmung dieser Anteile kann durch die Abminderungsfaktoren angepasst werden. Ist also beispielsweise ein Prozess gemäss der Modellierung zu dominant im Vergleich zum gemessenen effektiven Volumen, kann der Abminderungsfaktor herabgesetzt werden, um so die Reduktion zu erhöhen.

Die klar dominierenden Prozesse gemäss der GIS-Modellierung in den fünf Testeinzugsgebieten sind Rutschungen und Murgänge. Dies ist auf die sehr hohe Anzahl an SilvaProtect-Trajektorien zurückzuführen. Vor allem die Hangmure-Trajektorien bedecken in den mehrheitlich gebirgigen Gebieten mit der Pufferung eine sehr grosse Fläche, was in einem sehr hohen Schwemmhöflöpotential resultiert. Diese grosse Anzahl basiert aber auch darauf, dass für die Modellierung der Hangmure-Trajektorien

die Waldfläche nicht berücksichtigt wurde, obwohl Wald die Auslösung einer Rutschung stark dämpfen kann (Losey, 2013). Einzig im Einzugsgebiet der Landquart ist die Anzahl der Hangmure-Trajektorien beschränkt, weshalb dort das potentielle Schwemmholtzvolumen durch Murgänge grösser ist als durch Rutschungen (Abbildung 22). Zu berücksichtigen ist, dass laut der Beschreibung der SilvaProtect-Prozessmodellierung von Losey (2013) nur ein geringer Anteil der modellierten Rutschungen effektiv ausgelöst wird und diese oftmals auch kürzer sind als die Trajektorien.

Durch die sehr grossen modellierten Schwemmholtzpotentiale infolge Rutschungen und Murgänge verlieren die Anteile der Seitenerosion und des Gerinneholzes an Bedeutung. Werden bei einem effektiven Hochwasserereignis allerdings keine Rutschungen oder Murgänge ausgelöst, nehmen die relativen Anteile der anderen Prozesse beim Schwemmholtzeintrag zu. Dies war 2005 beispielsweise der Fall im Teileinzugsgebiet der Landquart, wo grossflächige Überschwemmungen dominierten (Hilker et al., 2007). Ein weiteres Beispiel ist das Einzugsgebiet der Kleinen Emme. Dort kam es zwar zu vielen Rutschungen, allerdings passierten diese ausserhalb des Einflussbereiches des Gerinne und waren so für keinen Schwemmholtzeintrag verantwortlich (Waldner et al., 2009).

Das Potential an Schwemmholtzeintrag ist grundsätzlich sicherlich grösser bei umfangreicheren Ereignissen wie Rutschungen oder Murgänge, da diese in kurzer Zeit enorme Mengen an Holz in das Gewässer befördern können. Dies wurde beim Unwetter 2005 zum Beispiel bei der Chirel gezeigt, in welche Murgänge beachtliche Mengen an Holz transportierten oder bei der Grossen Melchaa, wo trotz Schwemmholtzeintrag an zahlreichen Stellen durch Seitenerosion die beiden grossen Rutschungen „Cholrüti“ und „Stöckwald“ für den Haupteintragsprozess verantwortlich waren. Die Seitenerosion oder die Mobilisierung von Gerinneholz ist hingegen beschränkt auf gerinnenahen Flächen.

5.2.1.1 Totholzanteil

Der Vergleich der berechneten Totholzanteile (Tabelle 26) mit den Schwemmholtzuntersuchungen vom Hochwasser 2005 von Waldner et al. (2009) und Steeb et al. (2017) zeigt, dass dort ähnliche prozentuale Anteile ermittelt wurden. Waldner et al. (2009) schätzen einen Totholzanteil von 5-15 % und Steeb et al. (2017) berechneten einen durchschnittlichen Anteil an Totholz von 12.1 %. Der Vergleich der Totholzanteil in den einzelnen Einzugsgebieten führt hingegen zu unterschiedlichen Ergebnissen. So resultieren bei Steeb et al. (2017) 17 % Totholz bei der Grossen Melchaa, 9.3 % bei der Landquart und 22 % bei der Kleinen Emme. Diese Prozentangaben sind aber deutlich grösser als die im GIS-Modell berechneten, welche je 5 % für die Grosse Melchaa und die Landquart sowie 12 % für die Kleine Emme betragen. Für die einzelnen Einzugsgebiete der Chiene und Chirel werden von Steeb et al. (2017) keine Totholzanteile angegeben, dafür aber für das ganze Einzugsgebiet der Kander, in welchem diese beiden Flüsse liegen. Der Totholzanteil der Kander von 10 % entspricht dabei ziemlich genau dem modellierten Anteil der Chiene (11 %) und der Chirel (10 %).

Die grösseren Unterschiede beim Totholzanteil der verschiedenen Einzugsgebiete lassen erkennen, dass die Berechnung der Totholzanteile mit Unsicherheiten behaftet ist. So basiert das relative Ver-

hältnis des Totholzvolumens zum Gesamtpotential im GIS-Modell lediglich auf den Daten vom LFI (Abegg et al., 2014). Wie auch beim Holzvorrat sind diese nur Durchschnittswerte ganzer Forstkreise. Liegt das Einzugsgebiet nur in einem Forstkreis, ist der im GIS-Modell berechnete Totholzanteil gleich dem mittleren Anteil an Totholz im jeweiligen Forstkreis. Kleinräumigere Unterscheidungen oder Differenzen im Eintragsprozess werden nicht berücksichtigt, weshalb diese Berechnungsmethode als stark vereinfacht betrachtet werden kann. Allerdings zeigt der Vergleich mit den beiden Schwemmholzuntersuchungen von 2005 (Steeb et al., 2017; Waldner et al., 2009) auch, dass eine ungefähre Annahme von 10 % an Totholz am gesamten Schwemmholzvolumen in etwa zutrifft.

5.2.2 Effektives Schwemmholzvolumen

Abbildung 25 bis Abbildung 29 und Abbildung 35 bis Abbildung 39 zeigen den Vergleich der modellierten reduzierten Schwemmholz mengen mit den effektiv gemessenen Schwemmholz mengen in den verschiedenen Einzugsgebieten, was auf eine modellierte Ereignisintensität schliessen lässt. In Tabelle 28 wird diese der effektiven Wiederkehrperiode des jeweiligen Hochwasserereignisses gegenübergestellt. So soll auf die Genauigkeit der Abminderungsfaktoren geschlossen werden. Ziel ist es, dass die Ereignisintensitäten schwach, mittel und extrem etwa Wiederkehrperioden von 30, 100 bzw. 300 Jahren entsprechen.

Tabelle 28: Vergleich der Wiederkehrperiode des Hochwasserereignisses mit den modellierten Ereignisintensitäten

Einzugsgebiet	Wiederkehrperiode des Spitzenabflusses des untersuchten Hochwasserereignisses [Jahre]	Gemessen Holzmenge im Vergleich zur modellierten reduzierten Holzmenge
Grosse Melchaa	> 200	Schwaches – Mittleres Ereignis
Chiene	50 – 100	Schwaches – Mittleres Ereignis
Landquart	50 – 100	Mittleres – Extremes Ereignis
Chirel	50 – 100	Schwaches – Mittleres Ereignis
Kleine Emme	50 – 100	Geringer als Schwaches Ereignis
Sundgraben	30	Geringer als Schwaches Ereignis
Zulg	100	Geringer als Schwaches Ereignis
Secklisbach	100	Geringer als Schwaches Ereignis
Schächen	> 200	Schwaches – Mittleres Ereignis
Saltina	> 50	Geringer als Schwaches Ereignis

Die effektiven Schwemmholzvolumen beim Hochwasser 2005 in den Einzugsgebieten der Grossen Melchaa, der Chiene und der Chirel liegen zwischen einem modellierten schwachen und mittleren Ereignis. Im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa lag aber die Wiederkehrperiode deutlich über 100 Jahren, weshalb der Abminderungsfaktor eher zu hoch gewählt und so das Schwemmholzpotential zu gering reduziert wurde. Bei der Chirel und der Chiene wurden hingegen 2005 Wiederkehrperioden zwischen 50 und 100 Jahren gemessen, was der Berechnung in etwa entspricht.

Anders sieht es im Einzugsgebiet der Landquart aus, wo die effektive Schwemmholzmenge von 2005 zwischen dem modellierten mittleren und extremen Ereignis liegt. Dies entspräche also einem Ereignis

mit einer Wiederkehrperiode zwischen ungefähr 100 – 300 Jahren. Die Abflussspitze der Landquart hatte 2005 allerdings nur eine Jährlichkeit zwischen 50 – 100 Jahren, weshalb die Berechnung die Schwemmholzmenge eher überschätzt.

Deutlich zu hoch sind jedoch die berechneten effektiven Volumen bei der Kleinen Emme. 2005 wurde dort eine Wiederkehrperiode zwischen 50 und 100 Jahre beobachtet, was einem mittleren Ereignis entspräche. Die berechnete Schwemmholzmenge der mittleren Intensität ist aber sehr viel höher als die effektiv gemessene Menge. Das reduzierte Gesamtpotential ist somit deutlich zu hoch berechnet. Dies lässt darauf schliessen, dass das Modell für sehr grosse Einzugsgebiete wie die Kleine Emme nicht sehr aussagekräftig ist.

Das Ereignis 2012 im Sundgraben hatte eine Wiederkehrperiode von nur 30 Jahren. Die modellierte Ereignisintensität liegt aber weit unter einem schwachen Ereignis, weshalb auch bei diesem Ereignis das Gesamtpotential zu gering reduziert wurde.

Das Unwetter, welches 2012 für rund 1'000 m³ Schwemmholz bei der Zulg sorgte, hatte eine ungefähre Jährlichkeit von 100 Jahren. Dies käme einem mittleren modellierten Ereignis gleich. Die dort resultierende Schwemmholzmenge ist aber klar grösser.

Die Reduktion des Schwemmholzpotentials für den Secklisbach und die Saltina ergibt eine Menge leicht unter dem schwachen Ereignis. Dies ist aber zu gering, da die effektiven Wiederkehrperioden höher bei 100 bzw. >50 Jahren lag.

Beim Schächen wurden 2005 ca. 2000 m³ Schwemmholz mobilisiert. Dieser Wert ist leicht höher als die modellierte Menge für ein schwaches Ereignis, was etwa einer Jährlichkeit von 30 Jahren entsprechen müsste. Die effektive Wiederkehrperiode von 2005 beim Schächen ist aber grösser als 200 Jahren.

Der Vergleich der berechneten effektiven Schwemmholzvolumen mit den effektiven Volumen von vergangenen Hochwasserereignissen zeigt auf, dass sich die Werte meistens in einem ähnlichen Rahmen bewegen. Ausser bei der Kleinen Emme, dem Sundgraben und der Zulg liegen die tatsächlich gemessenen Holzvolumen zwischen oder nur leicht unter den modellierten Schwemmholzmengen. Bei der Kleinen Emme kann dies vor allem auf die sehr grosse Einzugsgebietsfläche zurückzuführen werden, wodurch bereits ein sehr hoher Wert für das Schwemmholzpotential berechnet wurde.

Generell stimmen also die berechneten Schwemmholzmengen mit den tatsächlich gemessenen relativ gut überein, auch wenn die Ereignisintensitäten bei der Berechnung eher zu tief sind. Ein in dieser Arbeit als schwach definiertes Ereignis entspricht demzufolge eher einem 100-jährigen Ereignis als einem 30-jährigen und dem entsprechend kommt ein mittleres Ereignis eher einer Jährlichkeit von 300 Jahren gleich. Ein extremes Ereignis hätte somit sogar eine Wiederkehrperiode von über 300 Jahren. Grundsätzlich ergibt die Reduktion der modellierten Schwemmholzpotentiale mit den quantifizierten Abminderungsfaktoren einen guten Überblick über denkbare Schwemmholzmengen bei einem Hochwasserereignis. Allerdings können die Abminderungsfaktoren noch besser angepasst werden, so dass eine Reduktion Intensitäten ergibt, welche der effektiven Wiederkehrperiode näher kommen.

5.2.3 Anwendung des GIS-Modells

Das GIS-Modell kann auf jedes Einzugsgebiet der Schweiz angewendet werden. Durch das Einfügen von bloss sieben Variablen (siehe Kapitel 3.3) und der anschliessenden automatischen Berechnung der Schwemmholtzvolumen und Eintragsflächen für verschiedene Ereignisintensitäten ist das Modell einfach anzuwenden. Die Berechnungszeit variiert je nach Einzugsgebietsgrösse zwischen wenigen Minuten bis zu einigen Stunden (Genauere Angaben in Anhang 2), was als akzeptabel gewertet werden kann.

Der simple Aufbau des Modells und die nationale Anwendung mit schweizweit einheitlichen Daten bedingen allerdings eine Vereinfachung der Berechnungsmethoden. So werden die Eintragsprozesse stark verallgemeinert und für die ganze Schweiz die gleichen Parameter angenommen. Für die Holzmenge im Gerinne wird bloss zwischen drei mittleren Volumen unterschieden. Die Seitenerosion wird durch Pufferflächen entlang dem ganzen bewaldeten Gerinne modelliert und die Rutschungen und Murgänge werden mit einheitlichen Breiten gepuffert. Zusätzlich werden als Holzvorrat Durchschnittswerte pro Forstkreis angenommen, deren Flächen bis über 2'500 km² betragen. Dies alles erhöht die Unsicherheit der Resultate. Eine Verbesserungsmöglichkeit wäre eine Holzvorratsangabe für kleinräumigere Einheiten. Gemäss LFI (mündliche Information von Christian Ginzler) ist ein Vegetationshöhenmodell mit Angaben zum Holzvorrat für jeden Pixel in Bearbeitung.

Grundsätzlich kann allerdings festgestellt werden, dass das Modell als einfach erste Abschätzung eines ungefähren Schwemmholtzpotentials durchaus nützlich ist. Durch die Darstellung der Eintragsflächen wird ausserdem die räumliche Verteilung der Eintragsprozesse dokumentiert. Für eine genauere Analyse müsste das Einzugsgebiet jedoch genauer untersucht und auf lokale Charakteristika der Eintragsprozesse und der Vegetation stärker eingegangen werden.

5.3 Zusammenhang der Schwemmholtzmenge mit anderen Variablen

Die Rangkorrelationsanalyse ergibt eine starke positive Korrelation zwischen Schwemmholtzmenge und der Einzugsgebietsfläche, der absoluten Waldfläche und der Wasserfracht. All diese Zusammenhänge wurden auch durch Rickenmann (1997) festgestellt. Allerdings sind die Daten von Rickenmann (1997) teilweise identisch mit denen der Schwemmholtzdatenbank (Steeb, 2017), weshalb gewisse Daten in beiden Analysen einbezogen werden.

Der Zusammenhang zwischen der Schwemmholtzmenge und der Grösse des Einzugsgebietes kann dadurch erklärt werden, dass bei einer grösseren Fläche normalerweise auch die Waldflächen und die Prozessflächen zunehmen. Dies führt zu grösseren potentiellen Schwemmholtzeintragsflächen, was auch einen Einfluss auf die effektive Schwemmholtzmenge hat.

Ein positiver Zusammenhang zwischen der Schwemmholtzmenge und der Fläche des Einzugsgebietes wurde auch bereits durch Rickenmann (1997) nachgewiesen, welcher die ungefähre Abhängigkeit gemäss Gleichung (1) angibt:

$$H \approx A * EG^{2/3} \quad (2)$$

Dabei gibt H die Holzmenge in m³ und EG die Einzugsgebietsfläche in km² an. A ist eine Konstante, deren Wert ungefähr 45 beträgt.

Die starke positive Korrelation zwischen der Schwemmholzmenge und der Waldfläche kann darauf zurückgeführt werden, dass bei einer grösseren Waldfläche mehr Holz verfügbar ist, was die Wahrscheinlichkeit für grosse Schwemmholzvolumen erhöht.

Auch dieser Zusammenhang wurde von Rickenmann (1997) bereits beschrieben und in der Gleichung (3) zusammengefasst:

$$H \approx D * F_w \quad (3)$$

D steht dabei für eine Konstante von ungefähr 90 und F_w für die Waldfläche in km².

Eine starke Korrelation wurde für die Schwemmholzmenge auch mit der Wasserfracht nachgewiesen, welche während eines Hochwasserereignisses transportiert wird. Dieser Zusammenhang ist mutmasslich durch die Seitenerosion und die Mobilisierung des Gerinneholzes bedingt, welche stark vom Abfluss angängig sind (Bachmann Walker, 2012; Ruiz-Villanueva et al., 2016).

Die Korrelation zwischen der Schwemmholzmenge und der Wasserfracht wurde von Rickenmann (1997) ebenfalls bereits festgestellt und in eine Gleichung gesetzt:

$$H \approx B * V_w^{2/5} \quad (4)$$

Die Konstante B beträgt dabei etwa 4 und V_w entspricht der Wasserfracht in m³.

Der mittlere positive Zusammenhang der Schwemmholzmenge mit der Gerinnelänge kann dadurch erklärt werden, dass bei einem längeren Gerinnenetz die Wahrscheinlichkeit steigt, dass ein Eintragsprozess das Fliessgewässer erreicht und so für Schwemmholzeintrag sorgt.

Für die positive mittlere Korrelation zwischen der Holzmenge und der bewaldeten Gerinnelänge ist das gerinnenaher Holz als Ursache wahrscheinlich. Laut Benda et al. (2003) nimmt die Eintragsrate von Schwemmholz mit zunehmender Distanz vom Gerinne ab. Bei langen bewaldeten Abschnitten des Gerinnenetzes ist hingegen viel Holz in unmittelbarer Nähe zum Gewässer vorhanden, welches mit grösserer Wahrscheinlichkeit in das Gewässer eingetragen wird als Holz aus vom Gerinne entfernten Wäldern.

Rickenmann (1997) beschreibt ebenfalls eine positive Korrelation zwischen der bewaldeten Gerinnelänge und der Holzmenge, sowohl der verfrachteten als auch der potentiellen. Diese Abhängigkeit stellt er mit Gleichung (5) dar:

$$H \approx E * (L_w)^2 \quad (5)$$

E ist eine Konstante von ungefähr 40 und L_w die bewaldete Gerinnelänge.

Der signifikant nachgewiesene Zusammenhang zwischen der Schwemmh Holzmenge und der mittleren Höhe des Einzugsgebietes ist nur schwach positiv. Dafür sind verschiedene Gründe denkbar. In höheren Lagen sind vermehrt steilere Hänge vorzufinden und somit eine grössere Anfälligkeit für Prozesse wie Rutschungen und Murgänge. Weiter kann in höheren Lagen eine weniger intensive Waldbewirtschaftung auf Grund der erschwerten Zugänglichkeit oder fehlenden Waldnutzung erwartet werden, was den Eintrag von Schwemmh Holz ebenfalls fördert. Dieser Trend gilt jedoch nicht für Lagen oberhalb der Baumgrenze, da es dort an potentiell em Schwemmh Holz fehlt.

Entgegen der Erwartungen ergibt die Analyse der Schwemmh Holzdaten keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Schwemmh Holzmenge und der mittleren Niederschlagsintensität. Dies kann dadurch erklärt werden, dass mehrere Variablen des Niederschlages einen Einfluss auf die Schwemmh Holzmenge haben. Nebst der Intensität spielen auch die Dauer, die Lage und Ausdehnung der Niederschlagszelle und die meteorologischen Bedingungen vor dem eigentlichen Unwetter eine Rolle (Hunziker, 2017). So können grössere Schwemmh Holz mengen auch bei langandauernden Niederschlägen ohne hohen Intensitäten anfallen.

Als weiterer Zusammenhang beschreibt Rickenmann (1997), eine Abhängigkeit des Schwemmh Holzpotentials von der Art der Bewaldung. Dabei sollen Nadelwälder eher für ein höheres potentielles Volumen sorgen als es bei Laubwäldern beobachtet wird. Entscheidend ist laut Steeb et al. (2017) auch die Dauer eines Ereignisses. So ist das lange Andauern von 2 – 3 Tagen beim Hochwasser 2005 in der Schweiz eine mögliche Erklärung für die aussergewöhnlich hohen Schwemmh Holz mengen.

Einige der betrachteten Variablen weisen auch untereinander einen hohen signifikanten Korrelationswert auf. Dies lässt darauf schliessen, dass diese Variablen nicht unbedingt einen direkten Einfluss auf die Schwemmh Holzmenge haben. Trotzdem zeigen die berechneten Korrelationen gewisse Tendenzen auf, welche Voraussetzungen ein hohes Schwemmh Holzvolumen erwarten lassen.

Diese können für eine Anpassung der Abminderungsfaktoren angewendet werden. Beispielsweise sollte der Abminderungsfaktor bei Hochwasser mit enorm hoher Wasserfracht gegen oben korrigiert werden, da dann mit einer geringeren Reduktion des Schwemmh Holzpotentials gerechnet werden kann. Allerdings ist mit dem Einbezug der Charakteristika des Einzugsgebietes Vorsicht angebracht, da diese oft bereits bei der Modellierung Einfluss ausüben. Beispielsweise resultiert bei einem grossen Einzugsgebiet oder einer grossen absoluten Waldfläche auf Grund der Berechnungsmethoden eher ein höheres Schwemmh Holzpotential. In diesem Fall macht eine Anpassung der Abminderungsfaktoren nur beschränkt Sinn.

5.4 Anpassung der Abminderungsfaktoren

Die Reduktion der Schwemmh Holzpotentiale mit den quantifizierten Abminderungsfaktoren führte meistens zu ähnlichen Volumen, wie sie bei vergangenen Hochwasserereignissen gemessen wurden. Die Übereinstimmung galt eher für die kleinen Abminderungsfaktoren (schwaches Ereignis), obwohl

fast alle tatsächlich stattgefundenen Hochwasser eine hohe Jährlichkeit (mindestens 100 Jahre) hatten. Daraus kann man schliessen, dass für kleinere Ereignisse mit Wiederkehrperioden von wenigen Jahrzehnten die Abminderungsfaktoren noch geringer sein müssten.

Wie die Berechnung des Schwemmholtzpotentials, wurden auch die Abminderungsfaktoren sehr allgemein quantifiziert. Der Vorteil ist eine einfache und allgemeine Anwendung dieser Faktoren, wodurch ein guter Überblick über den ungefähren Anteil an effektiv eingetragendem Schwemmholtz aufgezeigt werden kann. Grundsätzlich können aber die Abminderungsfaktoren noch besser an die effektiv gemessenen Schwemmholtzmengen angepasst werden.

Weiter ist es möglich, wie bei der Berechnung des Potentials auch die Abminderungsfaktoren spezifisch auf ein Einzugsgebiet anzupassen. Charakteristika, welche hier einbezogen werden könnten, sind beispielsweise die Wasserfracht oder die bewaldete Gerinnelänge, bei welchen eine starke Korrelation zur Schwemmholtzmenge nachgewiesen wurde. Weitere Charakteristika zur Anpassung der Abminderungsfaktoren sind denkbar, wie zum Beispiel die durch Deplazes (2016) respektive Ruiz-Villanueva et al. (2014) angewendete Geologie und der Widerstand durch die Vegetation, oder auch der Verbauungsgrad. Für den Einbezug solcher Charakteristika bei der Bestimmung der Abminderungsfaktoren ist aber eine genauere Untersuchung des Einzugsgebietes notwendig. Einen Einbezug von räumlich expliziten Unterschieden kann wie bei Ruiz-Villanueva et al. (2014) mittels „fuzzy logic principles“ vorgenommen werden. Dabei werden die Pixelwerte der jeweiligen Faktoren unscharfen Kategorien (z.B. hoch, mittel, schwach) zugeordnet. Dies ergibt für jeden Pixel eine Klassierung, wodurch auf der Karte die räumliche Ordnung der unterschiedlichen Kategorien dargestellt wird.

6 Fazit und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war eine Methode zu entwickeln, mit welcher das Schwemmholtzpotential in verschiedenen Einzugsgebieten und dessen Beiträge durch die wichtigsten Eintragsprozesse geschätzt werden können. Damit sollte überprüft werden, wie gut das Schwemmholtzvolumen in einem Einzugsgebiet und die Anteile der verschiedenen Eintragsprozesse modelliert werden können. Ein weiteres Ziel war die Eruiierung von Faktoren, welche für die Reduktion des Potentials zum effektiven Schwemmholtzvolumen massgebend sind.

Dafür wurde ein benutzerfreundliches und national anwendbares GIS-Modell geschaffen, welches für Einzugsgebiete das gesamte Schwemmholtzpotential und die Teilpotentiale der Eintragsprozesse berechnet. Weiter wurde basierend auf Werten aus unterschiedlichen Studien Abminderungsfaktoren quantifiziert, welche das Gesamtpotential auf die effektive Schwemmholtzmenge reduzieren. Mittels des GIS-Modells wurden die Schwemmholtzpotentiale verschiedener Einzugsgebieten in der Schweiz ermittelt. Diese wurden durch die quantifizierten Abminderungsfaktoren reduziert und mit in der Vergangenheit tatsächlich angefallen Schwemmholtzmengen verglichen.

Die Genauigkeit der Modellierung des Potentials zu bestimmen ist allerdings schwierig, da dieser Wert in der Natur nicht einfach festzustellen ist und es zum Vergleich kaum Berechnungen in den gleichen Einzugsgebieten aus anderen Studien gibt. Im GIS-Modell ergab sich aber, dass das Schwemmholtzpotential vor allem durch Rutschungen und Murgänge dominiert ist. Diese sind mehrheitlich auf die hohe Anzahl an möglichen Fliess- bzw. Rutschungswege in gebirgigen Regionen zurückzuführen. Der Eintrag durch Seitenerosion und die Mobilisierung von Gerinneholz sind hingegen auf gerinnenahere Bereiche beschränkt, weshalb das Potential dieser Prozesse geringer ist und die Anteile nur auf einige Prozente des Gesamtpotentials ausmachen. Der Vergleich mit den prozentualen Anteilen der Eintragsprozesse beim Hochwasser 2005 weist allerdings nach, dass sich die relativen Anteile der effektiven Schwemmholtzmenge stark vom Potential unterscheiden können.

Mit der Reduktion der modellierten Gesamtpotentiale durch die quantifizierten Abminderungsfaktoren wurden Volumen in ähnlicher Grössenordnung geschätzt, wie die tatsächlich angefallenen Schwemmholtzmengen. Die Genauigkeit der Resultate ist bei grossen Einzugsgebieten von mehreren 100 km² jedoch limitiert, wie das Beispiel der Kleinen Emme zeigte. Weiter legte dieser Vergleich auch dar, dass die definierten Ereignisintensitäten der quantifizierten Abminderungsfaktoren kaum mit den real beobachteten Wiederkehrperioden übereinstimmen. So ergab die Gegenüberstellung der geschätzten mit der tatsächlichen Schwemmholtzmenge meistens eine zu geringe Ereignisintensität. Grundsätzlich kann also festgestellt werden, dass das GIS-Modell und die quantifizierten Abminderungsfaktoren ungefähre Schwemmholtzmengen in einem Einzugsgebiet abschätzen können. Begrenzt konform sind allerdings die in dieser Arbeit definierten Ereignisintensitäten der Abminderungsfaktoren mit den tatsächlich gemessenen Wiederkehrperioden. Anpassungen der Abminderungsfaktoren sind aber möglich, indem beispielsweise auch weitere Charakteristika des Einzugsgebietes oder des Unwetters berücksichtigt werden. Der Zusammenhang der Schwemmholtzmenge zu mehreren solchen Merkmalen,

wie beispielsweise die Einzugsgebietsfläche, die absolute Waldfläche oder die Wasserfracht konnte nachgewiesen werden. Beobachtete Korrelationen können bei der Quantifizierung der Abminderungsfaktoren somit Ausschlag für eine schwächere oder eine stärkere Reduktion geben.

Zusammenfassend konnte in der vorliegenden Arbeit festgestellt werden, dass der Eintrag von Schwemmholz in Gewässer bei Hochwasserereignissen ein komplexer Prozess ist, welcher von zahlreichen Faktoren abhängig ist. Mit einem GIS-Modell und einheitlichen Abminderungsfaktoren, wie den hier präsentierten, können zwar Berechnungen zum Potential und der effektiven Schwemmholzmenge gemacht werden, allerdings ist deren Genauigkeit beschränkt. Trotzdem helfen sie die Schwemmholzsituation in einem Einzugsgebiet abzuschätzen und einen groben Überblick zu geben. Dies kann nützlich sein, um ohne grossen Aufwand eine potentielle Gefährdung durch Schwemmholz zu erkennen. Somit kann ermittelt werden, wo eine spezifischere Untersuchung eines Gebietes Sinn macht. Solche genaueren Analysen der Schwemmholzsituation in einzelnen Einzugsgebieten können Aufgabe zukünftiger Studien sein, bei welchen für die Berechnung des Potentials wie auch für die Quantifizierung der Abminderungsfaktoren verstärkt auf lokale Unterschiede eingegangen wird. Ausserdem wäre auch eine ausführlichere Untersuchung der beobachteten Zusammenhänge zwischen der Schwemmholzmenge und Charakteristika interessant, um so die Abminderungsfaktoren noch mehr an die lokalen Bedingungen anzupassen. Eine genaue Abschätzung der Gefahr durch Schwemmholz wäre nützlich, um diese Problematik beim Umgang mit Naturgefahren stärker zu berücksichtigen, damit beim nächsten grossen Hochwasserereignis die Schäden durch Schwemmholz minim bleiben.

7 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.
- Andres, N., Badoux, A., Hegg, C., 2013. Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2012. Rutschungen, Murgänge, Hochwasser und Sturzereignisse. *Wasser Energie Luft* 105 (1), 55–61.
- Andres, N., Badoux, A., Hilker, N., Hegg, C., 2012. Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2011. Rutschungen, Murgänge, Hochwasser und Sturzereignisse. *Wasser Energie Luft* 104 (1), 41–49.
- Bachmann Walker, A., 2012. Ausmass und Auftreten von Seitenerosionen bei Hochwasserereignissen. Auswertung von hydraulisch verursachten Seitenerosionen und Herleitung von empirischen Zusammenhängen zur Ermittlung des Erosionsausmasses und -auftreten (Masterarbeit). Geographisches Institut der Universität Bern.
- BAFU, 2016. Gefahrenkarten, Intensitätskarten und Gefahrenhinweiskarten
<<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/fachinformationen/naturgefahr-ensituation-und-raumnutzung/gefahregrundlagen/gefahrenkarten--intensitaetskarten-und-gefahrenhinweiskarten.html>> (Stand: 06.12.2016; Zugriff:22.05.2017).
- BAFU, 2015. Hochwasser und Murgang. Faktenblätter Gefahrenprozesse.
- Bänziger, R., 1989. Schwemmholz. Projektabschlussbericht Teilprojekt A1 des interdisziplinären Forschungsprogrammes des Bundesamts für Wasserwirtschaft zur Ursachenanalyse des Hochwasser 1987. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Bart, R., 2012. Methodik zur Modellierung der Ufererosion basierend auf 2D-Überflutungsmodellierungen. *FAN Agenda* 2, 12–14.
- Benda, L., Bigelow, P., 2014. On the patterns and processes of wood in northern California streams. *Geomorphology* 209, 79–97.
- Benda, L.E., Miller, D., Sias, J., Martin, D., Bilby, R., Veldhuisen, C., Dunne, T., 2003. Wood Recruitment Processes and Wood Budgeting, in: Gregory, S., Boyer, K., Gurnell, A. (Hrsg.), *The Ecology and Management of Wood in World Rivers*. American Fisheries Society Symposium 37, Bethesda, Maryland, pp. 49–73.
- Bezzola, G.R., Hegg, C. (Hrsg.), 2007. Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern & Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. Umwelt-Wissen Nr. 0707.

- Böckli, M., Rickenmann, D., Heimann, F.U.M., 2015a. DFdelivery: Ein empirisch-stochastisches Modell zur Bestimmung des Sedimenteintrages durch Murgänge in Gebirgsflüsse. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Böckli, M., Rickli, C., Badoux, A., Rickenmann, D., Villanueva, V.R., Zurbrügg, S., Stoffel, M., 2015b. Schwemmholzstudie Hochwasser 24. Juli 2014 im oberen Emmental, Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Abteilung Gefahrenprävention. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf & Dendrolab, Bern.
- Bruschin, J., Bauer, S., Delley, P., Trucco, G., 1982. The overtopping of the Palagnedra dam. *Int. Water Power Dam Constr.* 34 (1), 13–19.
- Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), 1998. Ereignisdokumentation Sachseln - Unwetter vom 15. August 1997. Studienbericht Nr. 8 / 1998.
- Cohen, J., 1992. A Power Primer. *Psychol. Bull.* 112 (1), 155–159.
- Deplazes, S., 2016. Erhebung der Herkunftsflächen und des potentiellen Volumens von Schwemmholz im Einzugsgebiet der Zuflüsse zum Thunersee im Hochwasserfall (Masterarbeit). Geographisches Institut der Universität Bern.
- Dobmann, J., Liener, S., 2012. Unwetterdokumentation Sundgraben, Gemeinde Beatenberg. Bericht. Geo7 AG, Bern. Im Auftrag des Amtes für Wald des Kantons Bern, Interlaken.
- Duwaplan GmbH, 1999. Schwemmholzuntersuchungen Riemenstaldnerbach, Gemeinden Sisikon, Morschach und Riemenstalden; Kommentar zur Abschätzung der Schwemmholzmenge und des Schwemmholzpotenziales, Zustand 1999. Altdorf.
- Eberhard, A., Diezig, R., Kan, C., Sigrist, B., 2007. Hydrologie Fließgewässer, in: Bezzola, G.R., Hegg, C. (Hrsg.), Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern & Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Bern, pp. 39–70.
- Emch+Berger AG, Hunziker Zarn & Partner AG, Geotest AG, 2006. Lokale Lösungsorientierte Ereignisanalyse (LLE). Reichenbach (Technischer Bericht). Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
- Flussbau AG, 2009. Schwemmholzstudie Sihl. Im Auftrag von der Baudirektion Kanton Zürich & Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL, Zürich.

- Gerber, R., 2015. Analyse der Schwemmholzsituation in einem voralpinen Wildbach (Bachelorarbeit). Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW.
- Ginzler, C., Hobi, M.L., 2015. Countrywide Stereo-Image Matching for Updating Digital Surface Models in the Framework of the Swiss National Forest Inventory. *Remote Sens.* 7 (4), 4343–4370.
- Gurnell, A.M., 2013. Wood in Fluvial Systems, in: Shroder, J., Wohl, E. (Hrsg.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, pp. 163–188.
- Hagedorn, F., Rigling, A., Bebi, P., 2006. Die Waldgrenze. *Die Alpen* (9), 52–55.
- Hering, D., Kail, J., Eckert, S., Gerhard, M., Meyer, E., Mutz, M., Reich, M., Weiß, I., 2000. Coarse woody debris quantity and distribution in Central European streams. *Internat. Rev. Hydrobiol.* 85 (1), 5–23.
- Hilker, N., Jeisy, M., Badoux, A., Hegg, C., 2007. Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2005. *Wasser Energie Luft* 99 (1), 31–41.
- Hübl, J., Anderschitz, M., Florineth, F., Gatterbauer, H., Habersack, H., Jäger, E., Kogelnig, A., Krepp, F., Rauch, J.P., Schulev-Steindl, E., 2008. Präventive Strategien für das Wildholzrisiko in Wildbächen. Studie im Auftrag des Lebensministeriums im Rahmen des Projekts „Floodrisk II“, Wien.
- Hunziker, G., 2017. Schwemmholz Zulg. Untersuchungen zum Schwemmholzaufkommen in der Zulg und deren Seitenbächen. Hunziker Gefahrenmanagement. Im Auftrag der Gemeinde Steffisburg, Steffisburg.
- Hunzinger, L., Durrer, S., 2009. Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Seitenerosion. Projektbericht vom 31.05.2009 für das Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Flussbau AG, Bern.
- Hunzinger, L., Hunziker, G., Mani, P., 2008. Die Umsetzung von Ergebnissen einer Ereignisanalyse. Hochwasser 2005 im Diemtigtal. Flussbau AG, Bern & Geo7 AG, Bern.
- Hürlimann, M., Rickenmann, D., Medina, V., Bateman, A., 2008. Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment. *Eng. Geol.* 102 (3-4), 152–163.
- 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 (3), 311–320.

- Kramer, N., Wohl, E., 2017. Rules of the road: A qualitative and quantitative synthesis of large wood transport through drainage networks. *Geomorphology* 279, 74–97.
- Künzi, R., Hunziker, G., Krähenbühl, S., 2012. Hochwasser vom 4. Juli 2012 in der Zulg. Ereignisanalyse. Flusbbau AG, Bern. Im Auftrag der Abteilung Naturgefahren des Kantons Bern, Interlaken.
- Lange, D., Bezzola, G.R., 2006. Schwemmholz: Probleme und Lösungsansätze. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) an der ETH Zürich 188.
- Losey, S., 2013. SilvaProtect-CH: Prozessmodellierung. Anhang 1. Abteilung Gefahrenprävention des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Bern.
- Mächler, M., 2009. GIS-Modellierung von potentiellen Schwemmholzeinträgen durch Rutschungen (Semesterarbeit). Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften.
- Martin, D.J., Benda, L.E., 2001. Patterns of Instream Wood Recruitment and Transport at the Watershed Scale. *Trans. Am. Fish. Soc.* 130 (5), 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.
- Meyer, J., Rimböck, A., 2014. GIS basierter Ansatz zur Abschätzung des Schwemmholzpotenzials in Wildbächen. Tagungsband Int. Symp. 2014 Zürich Wasser- und Flussbau im Alpenraum. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) an der ETH Zürich. 443–452.
- Morris, A.E.L., Goebel, P.C., Palik, B.J., 2007. Geomorphic and riparian forest influences on characteristics of large wood and large-wood jams in old-growth and second-growth forests in Northern Michigan, USA. *Earth Surf. Process. Landforms* 32, 1131–1153.
- Pfister, C., Wetter, O., 2011. Das Jahrtausendhochwasser von 1480 an Aare und Rhein. *BEZG* 73 (4), 41–49.
- Raetzo, H., Rickli, C., 2007. Rutschungen, in: Bezzola, G.R., Hegg, C. (Hrsg.), Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU & Eidg. Forschungsanstalt WS, Bern, pp. 198–210.
- Rickenmann, D., 1997. Schwemmholz und Hochwasser. *Wasser Energie Luft* 89 (5/6), 115–119.

- Rickenmann, D., Canuto, N., Koschni, A., 2008. Ereignisanalyse Hochwasser 2005: Einfluss von Lithologie/Geotechnik und Niederschlag auf die Wildbachaktivität beim Hochwasser 2005. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. Projektbericht zuhanden des Bundesamt für Umwelt BAFU.
- Rickli, C., 2009. Schwemmholz in Wildbächen, in: Forstliche Arbeitsgruppe Naturgefahren FAN (Hrsg.), Wildbacheinzugsgebiete - Prozesse, Gefahren Und Schutzmassnahmen. FAN-Tagung September 2009.
- Rickli, C., 2008. Ereignisanalyse Hochwasser 2005: Flachgründige Rutschungen. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Rickli, C., 2001. Vegetationswirkungen und Rutschungen - Untersuchung zum Einfluss der Vegetation auf oberflächennahe Rutschprozesse anhand der Unwetterereignisse in Sachsein OW am 15. August 1997. Birmensdorf, Bern.
- Rickli, C., Bucher, H., 2006. Einfluss ufernaher Bestockungen auf das Schwemmholzvorkommen in Wildbächen. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. Projektbericht zuhanden des Bundesamts für Umwelt BAFU, Sektion Schutzwald und Naturgefahren, Bern.
- Rickli, C., Bucher, H., 2003. Oberflächennahe Rutschungen, ausgelöst durch die Unwetter vom 15.-16.7.2002 im Napfgebiet und vom 31.8.-1.9.2002 im Gebiet Appenzell. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. Projektbericht zuhanden des Bundesamtes für Wasser und Geologie BWG.
- Rimböck, A., 2003. Schwemmholzrückhalt in Wildbächen: Grundlagen zu Planung und Berechnung von Seilnetzsperrern, Ausgabe 94. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München (Hrsg.).
- Rimböck, A., Strobl, T., 2001. Schwemmholzpotenzial und Schwemmholzrückhalt am Beispiel Partnach / Ferchenbach (Oberbayern). Wildbach- und Lawinenverbau 65 (145), 15–27.
- Rotach, M., Appenzeller, C., Bader, S., Frei, C., Germann, U., Liniger, M., Zbinden, P., 2007. Meteorologie, in: Bezzola, G.R., Hegg, C. (Hrsg.), Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern & Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Bern, pp. 19–38.
- 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. Applic.* 30 (1), 81–97.
- Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Gurnell, A.A., Marston, R.A., Stoffel, M., 2016. Reviews of Geophysics. *Rev. Geophys.* 54 (3), 611–652.
- Schalko, I., Schmocker, L., Weitbrecht, V., Boes, R., 2016. Schwemmholzrisiko und Massnahmenplanung am Fallbeispiel Rengbach. *Proc. Int. Symposium “Wasserbau – mehr als Bauen im Wasser”*, TU München, Mitteilung 134.
- 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.
- StorMe, 2006. Erhebungsformulare zur Dokumentation von Naturereignissen (STORME 2.0). Bern.
- Tamagni, S., Weitbrecht, V., Müller, U., Hunziker, R., Wyss, H., Kolb, R., Baumann, W., 2010. Schwemmholzrückhalt Ettisbühl / Malter. *Wasser Energie Luft* 102 (4), 269–274.
- Universität Zürich, 2016. Rangkorrelation nach Spearman
<<http://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse/zusammenhaenge/rangkorrelation.html>>
(Stand: 13.09.2016; Zugriff: 26.05.17).
- Von Glutz, M., 2011. Verfahren zur Abschätzung des Schwemmholzpotentials von Wildbächen (Bachelorarbeit). Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft (SHL).
- Von Ruette, J., Papritz, A., Lehmann, P., Rickli, C., Or, D., 2011. Spatial statistical modeling of shallow landslides—validating predictions for different landslide inventories and rainfall events. *Geomorphology*, 133 (1-2), 11–22.
- 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. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Walther, S., Schönbächler, D., Burkard, A., 1996. Projekt CONSECRU. Teilprojekt Schwemmholz. Schlussbericht. Dienststelle für Wald und Landschaft, Kanton Wallis. Eidg. Forstdirektion, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Brig-Glis.

- Warren, D.R., Bernhardt, E.S., Hall, R.O., Likens, G.E., 2007. Forest age, wood and nutrient dynamics in headwater streams of the Hubbard Brook Experimental Forest, NH. *Earth Surf. Process. Landforms* 32 (8), 1154–1163.
- Willi, C., Graf, C., Deubelbeiss, Y., Keiler, M., 2015. Methods for detecting channel bed surface changes in a mountain torrent – experiences from the Dorfbach torrent. *Geogr. Helv.* 70 (4), 265–279.
- Wohl, E., Jaeger, K., 2009. A conceptual model for the longitudinal distribution of wood in mountain streams. *Earth Surf. Process. Landforms* 34 (3), 329–344.

8 Daten

Aquaprotect:	Aquaprotect © 2008 Swiss Re & BAFU
Digitales Höhenmodell:	DTM 2m Raster (swissALTI3D) © 2016 swisstopo (5704 000 000)
Einzugsgebietgliederung:	BAFU: Einzugsgebietgliederung Schweiz EZGG-CH
Flussordnungszahl:	CH-FLOZ: Vector25 © 2007 swisstopo (DV033594)
Geoportal des Bundes:	geo.admin.ch © swisstopo
Gewässernetz:	TLM_FLIESSGEWAESSER: swissTLM3D © 2016 swisstopo (DV033594)
Holzbestand (LFD):	Abegg, M.; Brändli, U.-B.; Cioldi, F.; Fischer, C.; Herold-Bonardi, A.; M., Huber; Keller, M.; Meile, R.; Rösler, E.; Speich, S.; Traub, B. & Vidondo, B. (2014): Schweizerisches Landesforstinventar - Ergebnistabelle Nr. 125449: Gesamtholzvolumen. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL.
Landschaftsmodell:	Vector25 © 2007 swisstopo (DV033594)
Ökomorphologie:	BAFU (2008): Datenbank Oekomorphologie Stufe F
Rutschungsdatenbank:	McArdell, Brian & Rickli, Christian (2017): Database shallow landslides and hillslope debris flows. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
Schwemmh Holzdatenbank:	Steeb, Nicolas (2017): Schwemmh Holzdatenbank für Projekt Wood-FLow (Provisorische Version). Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
SilvaProtect:	SilvaProtect-CH © 2013 BAFU

9 Anhang

Anhang 1: GIS-Modell Schema

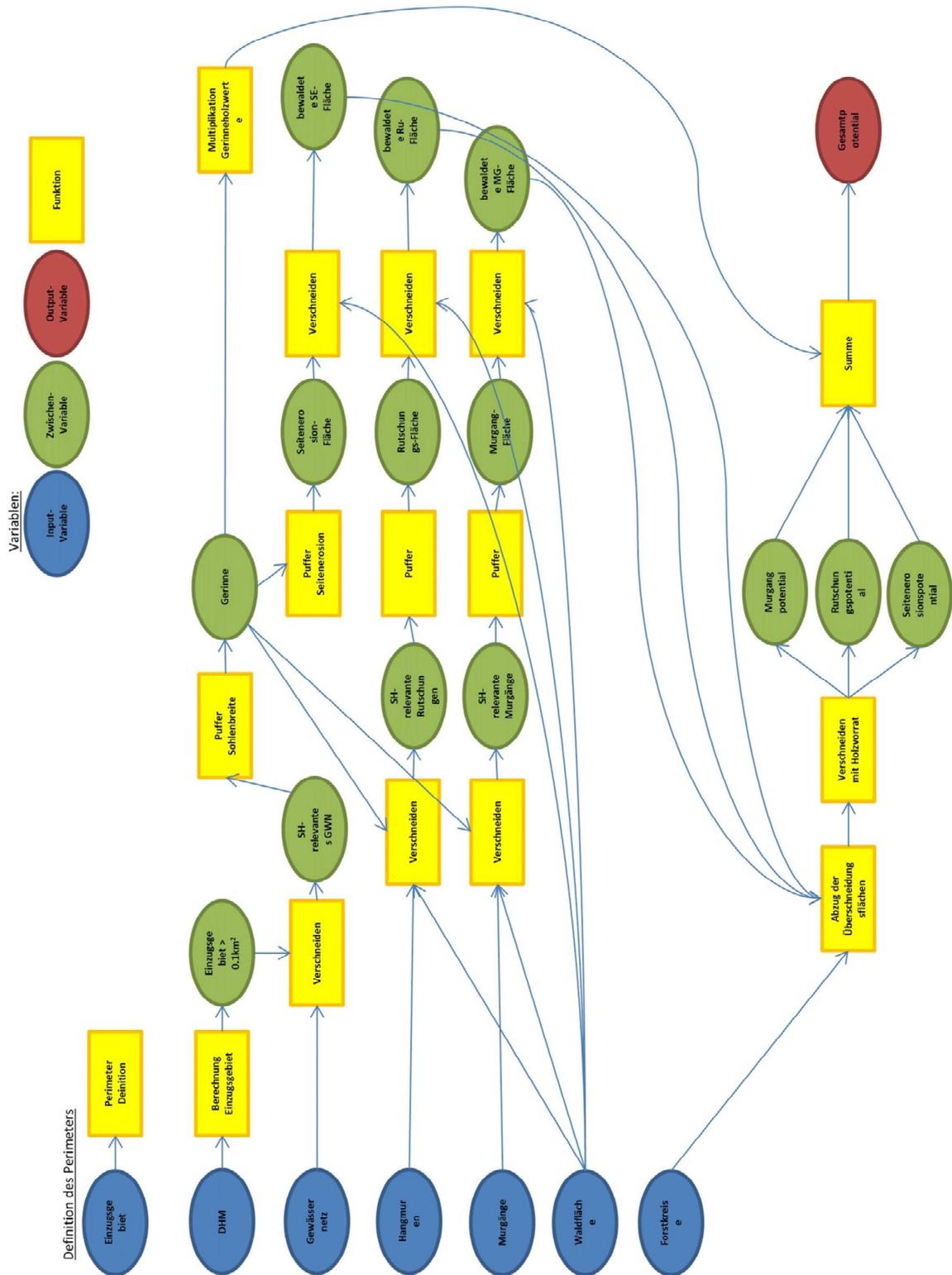


Abbildung 45: Schematischer Aufbau des GIS-Modells

Anhang 2: Berechnungszeiten des GIS-Modells

Tabelle 29: Rechenzeit des GIS-Modells für die verschiedenen Einzugsgebiete

Einzugsgebiet	Rechenzeit
Grosse Melchaa	39 min
Chiene	39 min
Landquart	36 min
Chirel	44 min
Kleine Emme	5 h 55 min
Sundgraben	9 min
Zulg	36 min
Secklisbach	11 min
Schächen	57 min
Saltina	45 min

Anhang 3: Berechnungen des GIS-Modells für die Testeinzugsgebiete

Grosse Melchaa

Tabelle 30: Potentielle Schwemmhölzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Grosse Melchaa (GIS-Modell)

	HQ30		HQ100		HQ300	
	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)
Gerinneholz	0.52	3'863	0.52	3'863	0.52	3'863
Seitenerosion	0.33	14'355	0.67	28'817	0.84	36'271
Rutschung	2.86	123'565	3.09	133'713	3.11	134'324
Murgang	0.69	29'849	0.97	42'060	1.24	53'789
Total	4.40	171'632	5.25	208'453	5.71	228'247

Chiene

Tabelle 31: Potentielle Schwemmhölzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Grosse Melchaa (GIS-Modell)

	HQ30		HQ100		HQ300	
	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)
Gerinneholz	635'281	3'595	635'281	3'595	635'281	3'595
Seitenerosion	292'335	13'439	597'860	27'484	749'297	34'445
Rutschung	1'920'008	88'263	2'138'672	98'315	2'152'472	98'949
Murgang	698'590	32'114	977'028	44'914	1'246'687	57'310
Total	3'546'215	137'411	4'348'841	174'307	4'783'738	194'300

Landquart

Tabelle 32: Potentielle Schwemmhölzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Landquart (GIS-Modell)

	HQ30		HQ100		HQ300	
	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)
Gerinneholz	1.24	1'032	1.24	1'032	1.24	1'032
Seitenerosion	0.10	3'403	0.21	7'248	0.27	9'344
Rutschung	0.25	8'658	0.32	11'003	0.36	12'319
Murgang	0.52	17'868	0.58	20'087	0.64	22'041
Total	2.11	30'960	2.35	39'369	2.51	44'736

Chirel

Tabelle 33: Potentielle Schwemmhölzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Chirel (GIS-Modell)

	HQ30		HQ100		HQ300	
	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)
Gerinneholz	499'209	5'545	499'209	5'545	499'209	5'545
Seitenerosion	306'929	13'719	591'794	26'452	739'738	33'067
Rutschung	1'864'826	83'331	2'164'052	96'708	2'249'130	100'516
Murgang	981'197	43'829	1'366'942	61'061	1'727'155	77'152
Total	3'652'161	146'423	4'621'997	189'767	5'215'231	216'280

Kleine Emme

Tabelle 34: Potentielle Schwemmhölzeintragsflächen und –volumen im Einzugsgebiet der Kleinen Emme (GIS-Modell)

	HQ30		HQ100		HQ300	
	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)	bewaldete Fläche (km ²)	Holz-Volumen (m ³)
Gerinneholz	6'308'082	65'127	6'308'082	65'127	6'308'082	65'127
Seitenerosion	9'425'034	470'136	17'815'680	887'603	22'779'340	1'134'362
Rutschung	31'407'170	1'576'066	36'606'210	1'836'261	38'819'910	1'945'582
Murgang	1'264'974	61'249	1'816'836	87'947	2'449'652	118'773
Total	48'405'260	2'172'577	62'546'808	2'876'938	70'356'984	3'263'844

Persönliche Erklärung: Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Birmensdorf, den 27. Juni 2017: