

---

Detailbericht zum Forschungsprojekt WoodFlow

# Empirische Schätzformeln

---

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

Birmensdorf, Dezember 2019



Eidg. Forschungsanstalt für Wald,  
Schnee und Landschaft WSL

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

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Methodik.....	4
2.1	Datengrundlage.....	4
2.2	Auswahl und Definition der Variablen.....	7
2.3	Homogenisierung der Angaben zur Schwemmh Holzmenge.....	8
2.4	Bestimmung verschiedener Kontrollparameter.....	8
2.5	Konsolidierung der Schwemmh Holzdatenbank.....	11
2.6	Statistische Verfahren / Auswertungen.....	12
2.7	Untersuchung weiterer Einflussfaktoren auf die Schwemmh Holzmenge.....	15
3	Resultate und Diskussion.....	16
3.1	Spearman-Korrelationsmatrix.....	16
3.2	Hauptkomponentenanalyse (PCA).....	17
3.3	Empirische Schätzformeln der Schwemmh Holzmenge.....	19
3.4	Modellierte versus beobachtete Schwemmh Holzmenge.....	21
3.5	Vergleich mit dem empirischen GIS-Ansatz (EGA).....	23
3.6	Weitere Einflussfaktoren.....	24
4	Interpretation der Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	36
5	Literatur.....	38
6	Anhang.....	40
A.	Scatterplots der Schätzformeln.....	40
B.	Weitere statistische Auswertungen zur Anpassungsgüte der zehn Schätzformeln:.....	48
C.	Akaike weights.....	51
D.	Modellierte versus beobachtete Schwemmh Holzmenge:.....	52
E.	Verschiedene Varianten für die multiple Regression mit $Q_{\max}$ und $V_w$ .....	57

# 1 Einleitung

Die Ereignisanalyse des Unwetters vom August 2005 in der Schweiz zeigt eine sehr heterogene Situation der Schwemmhholzprozesse. Untersuchungen in verschiedenen Gebirgseinzugsgebieten weisen auf sehr unterschiedliche Schwemmhholzvolumina hin. Grund dafür sind unter anderem die unterschiedlichen Prozesse, die zum Eintrag von Schwemmhholz (SH) geführt haben (Ufererosion, Uferrutschungen, Hangrutschungen, Runsen, Murgänge, Gerinneerosion in Wildbächen). Neben der räumlichen Heterogenität dieser Prozesse, ist auch eine sehr hohe zeitliche Variabilität zu beobachten.

In einem Gerinne mitgeführtes Schwemmhholz während eines Unwetterereignisses kann demnach einen grossen Einfluss auf die ablaufenden Schadensprozesse haben (Verklausungen und Rückstau). Für einen ganzheitlichen Hochwasserschutz muss deshalb auch die zu erwartende Schwemmhholzfracht im Ereignisfall abgeschätzt werden. Eine schnelle und einfache Methode dafür ist die Verwendung einfacher empirischer Schätzformeln, wie sie beispielsweise von Rickenmann (1997) oder Uchiogi et al. (1996) entwickelt wurden. Diese Gleichungen werden heute in der Praxis häufig verwendet, um die Grössenordnung der potenziell transportierten Schwemmhholzmenge im Falle eines Hochwassers abzuschätzen. Das Problem ist, dass bereits existierende Schätzformeln eine relativ kleine Datengrundlage haben, was deren Vorhersagekraft einschränkt.

Im Kontext des Forschungsprogramms WoodFlow wurde eine umfangreiche Datenbank erstellt, welche eingetragene und transportierte Schwemmhholzmengen sowie relevante Parameter der Einzugsgebiete bzw. des zugrundeliegenden Hochwasserereignisses dokumentiert (Fokus auf Gebirgsflüsse und Wildbäche im alpinen Raum). Mithilfe dieser Datengrundlage wurden bestehende empirische Ansätze zur Abschätzung der Schwemmhholzmenge getestet und weiterentwickelt, sowie neue Abhängigkeiten aufgezeigt.

**Ziel:** Abschätzung der Schwemmhholzmengen in Abhängigkeit verschiedener Einzugsgebiets-Charakteristika und ereignisabhängigen Faktoren

- Wieviel Schwemmhholz ist während eines Hochwassers in einem bestimmten Einzugsgebiet zu erwarten?
- Welche Faktoren beeinflussen den Schwemmhholztransport?

## 2 Methodik

### 2.1 Datengrundlage

Insgesamt besteht die Schwemmh Holzdatenbank aus 210 Dateneinträgen. Jeder dieser Einträge beschreibt ein Unwetterereignis, bei dem es zu einem Schwemmh Holzauflkommen in Fliessgewässern gekommen ist. Zusätzlich zur dokumentierten Schwemmh Holzmenge wurden diverse weitere Faktoren erhoben, welche die Topographie, den Vegetationszustand, die Eintragsprozesse sowie das Hochwasserereignis beschreiben. Zu erwähnen ist, dass gewisse Dateneinträge nicht unabhängig voneinander sind. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn während desselben Ereignisses an mehreren Punkten entlang eines Gewässers bilanziert wird (Einzugsgebiet und Teileinzugsgebiete davon).

Der überwiegende Teil der Dateneinträge stammt aus Hochwasserereignissen in der Schweiz (Abbildung 1). Zwei Drittel der dokumentierten Schwemmh Holz mengen stammt aus Ablagerungen, während der Rest aus Eintragsflächen rekonstruiert wurde (Abbildung 2). Mit 64 Einträgen deutlich am häufigsten vertreten ist das August Hochwasser 2005 (Abbildung 3). Weitere gut dokumentierte Ereignisse, welche zu diversen Einträgen in die Datenbank führten, sind z.B. die Hochwasser 1978 im Tessin (Melezza, Lago di Palagnedra), 1987 (Rhein, Reuss, Ticino, Rhone), 1993 im Wallis (Saltina, Rhone), sowie 2014 im Emmental (Emme und seitliche Zubringer). Das Jahr 2011 war mit 13 Einträgen auch sehr aktiv bezüglich Schwemmh Holzauflkommen, bestehend jedoch aus mehreren Ereignissen im Kanton Bern und Solothurn sowie in Italien.

Die Einzugsgebiete der untersuchten Fliessgewässer sind vor allem im voralpinen und alpinen Raum zu finden – es handelt sich demnach hauptsächlich um Gebirgsflüsse und Wildbäche (Abbildung 4). Der Bewaldungsgrad der Einzugsgebiete liegt vorwiegend im Bereich zwischen 20 und 60% (Abbildung 5). Die Hälfte der untersuchten Einzugsgebiete ist kleiner als 10 km<sup>2</sup> und rund 60% sind kleiner als 25 km<sup>2</sup> (Abbildung 6).

Die Schwemmh Holzdatenbank wurde mit Informationen aus mit folgenden Quellen erarbeitet:

- Auszug aus der StorMe Datenbank des BAFU (StorMe-Formular „Wasser/Murgang“; nur Ereignisse mit  $\geq 100\text{m}^3$  dokumentiertem Schwemmh Holz; StorMe, 2006)
- Kantonale Dokumente wie Ereignisanalysen, Fotodokumentationen oder Listen
- Daten von Flusskraftwerken (Geschwemmselektnahme)
- Fernerkundungsdaten (z.B. Luftbilder, LiDAR) und GIS Auswertungen (z.B. Prozesskarten)
- Weitere Zahlen aus wissenschaftlichen Publikationen
- Zusätzliche Erhebungen und Meldungen, z.B. für die Entsorgung zuständige Stellen bezüglich Räumung von Schwemmh Holz auf Seen, Gemeinden, Feuerwehr (meist telefonisch oder digital per E-Mail übermittelt)
- Nachträglich selbst erhobene Daten (hauptsächlich durch GIS Analysen; siehe Kap. 2.4)
- BAFU GHO-SOLID Datenbank: Das BAFU erfasst die von Gewässern transportierten Geschiebemengen von rund 100 Geschiebesammlern, welche mit Vermessungsinstrumenten oder bei der Entleerung der Geschiebesammler geschätzt werden. Nebst den Geschiebemengen werden auch noch weitere Parameter in der SOLID Datenbank erfasst, unter anderem auch Angaben zur Schwemmh Holzmenge (BAFU, 2017).

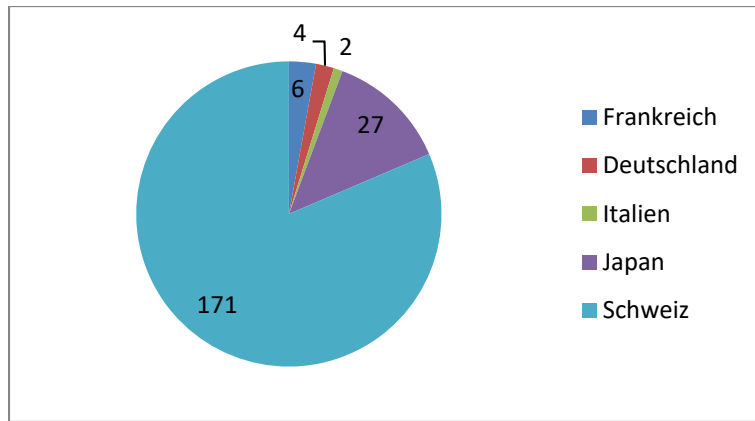


Abbildung 1: Herkunft der Dateneinträge nach Ländern.

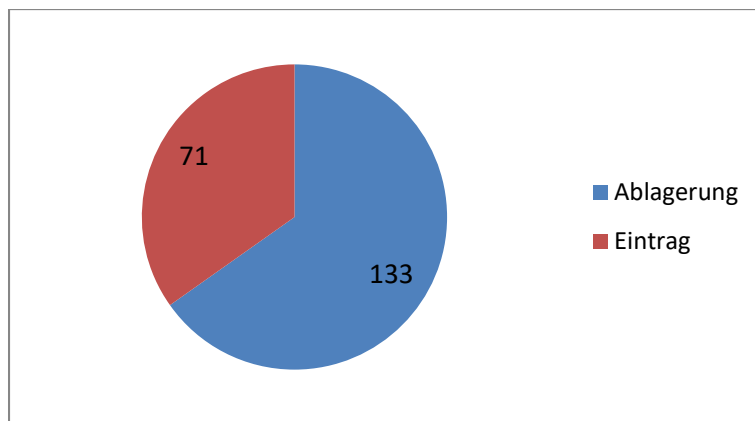


Abbildung 2: Art der dokumentierten Schwemmholzmenge.

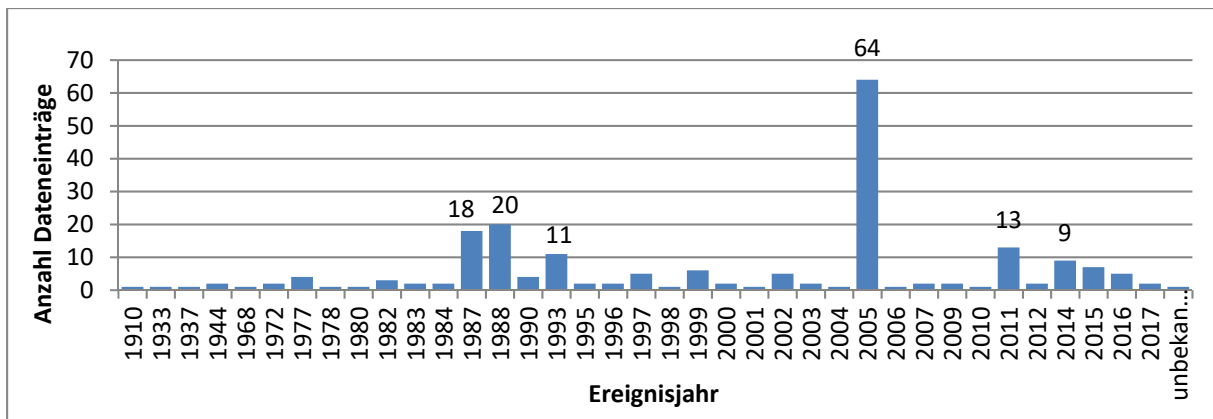


Abbildung 3: Zeitreihe der insgesamt 210 Dateneinträge.

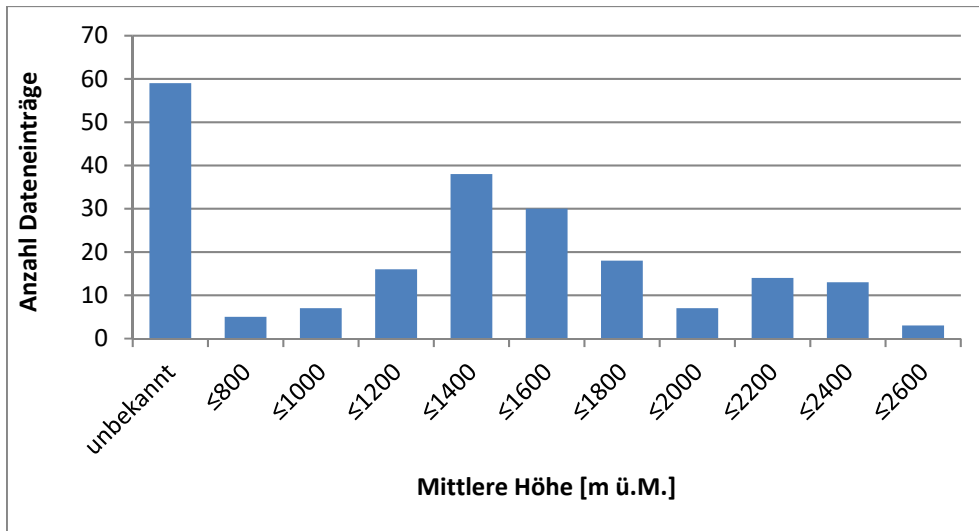


Abbildung 4: Mittlere Höhe der untersuchten Einzugsgebiete.

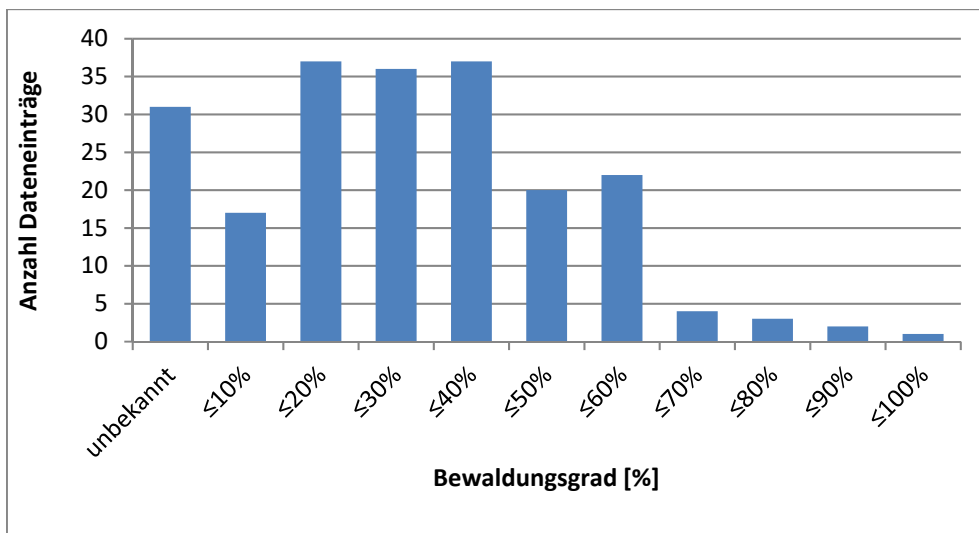


Abbildung 5: Bewaldungsgrad der untersuchten Einzugsgebiete.

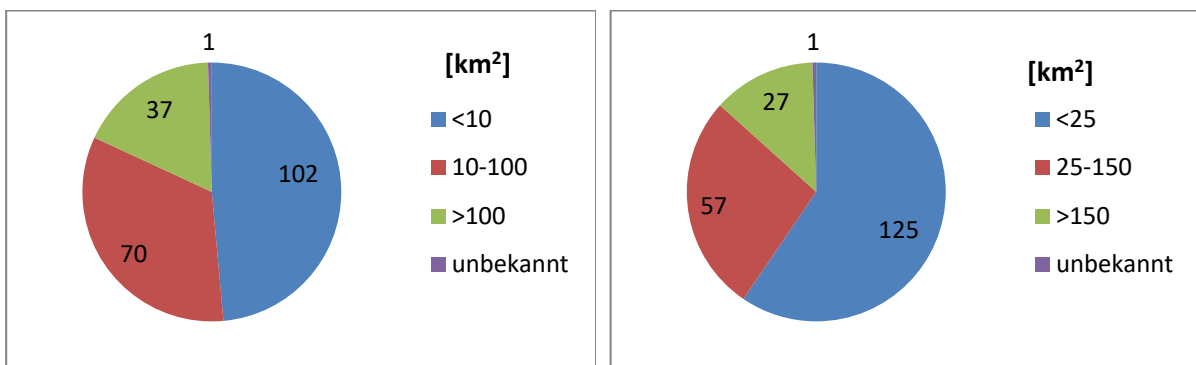


Abbildung 6: Grösse der untersuchten Einzugsgebiete

## 2.2 Auswahl und Definition der Variablen

Die Faktoren zur Beschreibung der Schwemmh Holzmenge werden in Einzugsgebiets-Charakteristika und ereignisabhängige Faktoren unterteilt (Abbildung 7). Die hier vorgestellte Auswahl an Variablen hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern umfasst diejenigen, welche mit Zuverlässigkeit anhand der Ereignisanalyse rekonstruiert werden konnten. Für jeden Datenbankeintrag wurde versucht, möglichst vollständig alle Faktoren zu eruieren bzw. abzuschätzen.

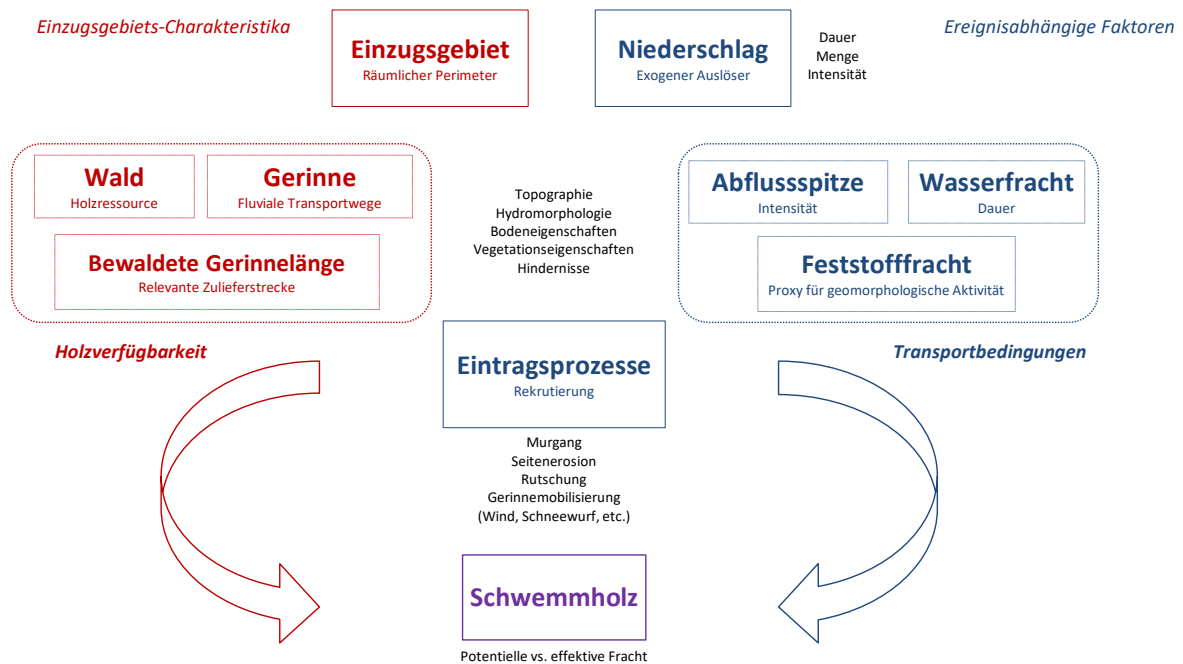


Abbildung 7: Konzeptuelles Schema der Einflussvariablen von Schwemmh Holztransport.

Folgende Liste fasst die Faktoren sowie deren Kürzel und Einheiten für die Berechnung der empirischen Schätzformeln zusammen:

- $V_{reg}$  : Geschätzte Schwemmh Holzmenge in Festmeter [ $m^3$ ]
- $E$  : Einzugsgebiet [ $km^2$ ]
- $L$  : Gerinnelänge [ $km$ ]
- $L_w$  : Bewaldete Gerinnelänge [ $km$ ]
- $W$  : Waldfläche [ $km^2$ ]
- $M$  : Meltonzahl [-]
- $Q_{max}$  : Spitzenabfluss [ $m^3/s$ ]
- $Q_{spez}$  : Abflussspende [ $m^3/(s \cdot km^2)$ ]
- $V_w$  : Wasserfracht [ $m^3$ ]
- $F$  : Feststofffracht [ $m^3$ ]
- $P_h$  : Niederschlagsdauer [h]
- $P_{mm}$  : Mittlere Niederschlagsmenge [mm]
- $P_{vol}$  : Gesamtes Niederschlagsvolumen [ $m^3$ ]

### 2.3 Homogenisierung der Angaben zur Schwemmholzmenge

In der Literatur wird die Schwemmholzmenge entweder als Volumen des lose angehäuften Holzes (Lockervolumen  $V_L$  in  $[m^3]$ ) oder als Festvolumen  $V_F$  [ $fm^3$ ] angegeben. Der Auflockerungsfaktor  $a$  gibt das Verhältnis zwischen dem Volumen des lose angehäuften Holzes und dem Holzvolumen in Festmetern an.

$$a = \frac{V_L}{V_F}$$

Der Auflockerungsfaktor  $a$  schwankt je nach Ablagerungsdichte des Holzes zwischen 2 (sehr kompakt) und 5 (locker) (Lange & Bezzola, 2006). Entsprechend liegt der Holzvolumenanteil der lockeren Holzansammlungen ( $\frac{1}{a}$ ) zwischen 0.2 und 0.5, was auch durch die Feldaufnahmen von Schwemmholzablagerungen nach dem Hochwasser 2005 in Waldner et al. (2009) bestätigt wird.

Leider wird in vielen Publikationen nicht klar definiert, ob es sich bei der angegebenen Schwemmholzmenge um Lockervolumen oder Festvolumen handelt. Wo in den Informationsquellen keine genauere Angabe dazu vorhanden ist, wird von Lockervolumen ausgegangen. Meist handelt es sich hier um Schätzungen des Volumens von Ablagerungshaufen oder von LKW-Ladungen. Diese Daten werden hier, wie in Waldner et al. (2009), mit einem einheitlichen Faktor von 0.3 in Festmeter umgerechnet. Wenn es sich um Volumenschätzungen von Schwemmholzteppichen auf Seen handelt (z.B. im Staubecken des Palagnedra Staudammes), wurden diese mit einem Faktor von 0.7 in Festmeter umgewandelt (Annahme, dass die schwimmenden Holzstücke kompakter aneinander liegen, als bei einem abgelagerten Schwemmholzhaufen).

Ist eine Schwemmholzmenge als Gewicht angegeben (z.B. bei der Entsorgung), so wurde sie wie in Waldner et al. (2009) unter Annahme einer Holzdichte von  $\rho = 1 \text{ t m}^{-3}$  in Festmeter umgerechnet. Dies berücksichtigt die Feuchtigkeitsaufnahme des Holzes während des Transportes in einem Fließgewässer.

Für die Datenbank wurden lediglich Schwemmholzmengen von mindestens  $100 \text{ m}^3$  Lockervolumen bzw.  $30 \text{ m}^3$  Festmeter berücksichtigt. Für die weiteren Analysen und die Darstellung der Resultate wurden in dieser Studie stets Festmeter verwendet.

### 2.4 Bestimmung verschiedener Kontrollparameter

Wenn nicht bereits in Ereignisdokumentationen oder anderen Quellen angegeben, wurden die Einzugsgebiets-Charakteristika mithilfe von Geodaten in ArcGIS (ESRI) eruiert:

- Einzugsgebietsfläche  $E$ :  
Wo Angaben über den Ablagerungsort von Schwemmholz vorhanden sind (z.B. bei StorMe-Formularen), wurden diese Koordinaten als Gebietsauslass verwendet. Ansonsten wurde die Mündung eines Zubringers als Gebietsauslass definiert. Die Einzugsgebiete wurden dann mit dem BAFU-Datensatz „Einzugsgebietsgliederung Schweiz“ (EZGG-CH) extrahiert. Der Datensatz beinhaltet ein flächendeckendes Mosaik aus über 22'000 aus der Topographie abgeleiteten Teileinzugsgebieten. EZGG-CH deckt die Schweiz sowie das angrenzende Ausland ab, wobei sämtliche Gewässer mit einer Einzugsgebietsfläche grösser  $1\text{-}1.5 \text{ km}^2$  berücksichtigt sind.

- **Waldfläche  $W$ :**  
Die Waldfläche innerhalb eines definierten Einzugsgebietes wurde extrahiert (ArcGIS Tool „Clip“). Als Datengrundlage für die Waldfläche wurde der Datensatz „SILVA“ aus SilvaProtect-CH verwendet (Losey & Wehrli, 2013). Dieses Shapefile wiederum basiert auf dem Swisstopo-Datensatz „Vektor25 Primärflächen“ (ohne Gebüschwälder), wobei zusätzlich noch die Vivian- und Lotharflächen berücksichtigt wurden.
- **Gerinnelänge  $L$ :**  
Das Gewässernetz wurde ebenfalls innerhalb eines definierten Einzugsgebietes extrahiert. Als Datengrundlage für das Gewässernetz wurde der Swisstopo-Datensatz „swissTLM3D“ gewählt.
- **Bewaldete Gerinnelänge  $L_w$ :**  
Für die Extraktion der bewaldeten Gerinnelänge, wurde zuerst das Shapefile der Waldfläche  $W$  mit 25 m gepuffert. Dies entspricht ungefähr der durchschnittlichen Baumhöhe in Schweizer Wäldern gemäss des Datensatzes des Schweizerischen Landesforstinventars (LFI; Ginzler & Hobi, 2016). Der Puffer von 25 m berücksichtigt den Perimeter von umfallenden Bäumen (z.B. durch Windwurf), welche im Abflussbereich von Fliessgewässern liegen und somit zum Schwemmholztransport beitragen können. Die gepufferte Waldfläche wird dann in einem zweiten Schritt mit der extrahierten Gerinnelänge  $L$  überschritten.
- **Melton-Zahl  $M$ :**  
Die dimensionslose Melton-Zahl beschreibt die Reliefenergie eines Einzugsgebietes (Melton, 1965). Eingangsgrößen sind die Höhendifferenz zwischen dem höchsten und niedrigsten Punkt im Einzugsgebiet basierend auf dem digitalen Höhenmodell ( $DHM_{max}$  bzw.  $DHM_{min}$ ) sowie die Fläche des Einzugsgebietes ( $E$ ). In Gebieten mit Melton-Werten  $M > 0.3$  und einem mittleren Kegelgefälle  $J_m > 0.1$  können demnach Murgänge vorkommen (Scheidl & Rickenmann, 2010; Wilford et al., 2005).

$$M = \frac{DHM_{max} - DHM_{min}}{\sqrt{E}}$$

Wo in den Ereignisdokumentationen nicht genauer angegeben, wurden auch ereignisabhängige Faktoren abgeschätzt, um die SH-Datenbank möglichst zu vervollständigen:

- **Niederschlag  $P_{mm}$  und  $P_{vol}$ :**  
Der Niederschlag im Einzugsgebiet wurde mit den Rasterdaten «RhiresD» (=daily precipitation (kalendarisch)) von MeteoSchweiz berechnet. Die Rasterdaten basieren auf verifizierten Messungen des täglichen Niederschlags ( $P_{mm}$  in Millimeter [mm]) gemessen an hochaufgelösten Bodenstationen von MeteoSchweiz. Die angegebene Niederschlagsmenge wird dabei generell eher unterschätzt, insbesondere bei Schneefall oder windexponierten Stellen. Systematischer Messfehler von 4% bestehen in niedrigen Höhenlagen im Sommer und bis zu 40% in hohen Höhenlagen im Winter (MeteoSwiss, 2019).  
In ArcGIS werden die RhiresD Daten des Ereignistages als Raster Layer extrahiert. Falls das Ereignis über mehrere Tage andauerte, werden die einzelnen Tage aufsummiert (entspricht immer der 24h-Summe). Das (aufsummierte) Niederschlagsraster wird nun mit dem Einzugsgebiet des entsprechenden Ereignisses kombiniert, um die durchschnittliche Verteilung des Niederschlags plus die Niederschlagsvolumen ( $P_{vol}$  in Kubikmeter [m<sup>3</sup>]) im gesamten Gebiet auszurechnen.

- Wasserfracht  $V_w$ :

Die Wasserfracht wurde durch die Kombination von Niederschlagsdaten und Volumenabflusskoeffizienten (VAK) geschätzt. Einige VAK wurden im Rahmen von Ereignisdokumentationen bereits bestimmt (z.B. HW 2005). Da das Hochwasser 2005 ein Extremereignis war, sind die entsprechenden VAK eher an einer oberen Grenze einzuordnen. Wo keine Angaben zu VAK zur Verfügung standen, wurden Werte abgeschätzt. Aufgrund von gemessenen Abflussdaten (Abflussganglinien) an den hydrometrischen BAFU Stationen während Hochwasserereignissen, wurden mittels der Niederschlagssumme (RhiresD) die Volumenabflusskoeffizienten ausgerechnet. Für die übrigen Gebiete ohne Messungen wurden die VAK aufgrund der Einzugsgebietsgrösse statistisch abgeleitet. Für  $>80 \text{ km}^2$  grosse Einzugsgebiete wurde basierend auf den vorhandenen VAK-Werten ein unterer und oberer Grenzwert (20%- bzw. 80 Perzentil) sowie ein Mittelwert angegeben, der für alle Einzugsgebiete gleich ist (Abbildung 8). Der Mittelwert wurde jeweils für die weitere Auswertung verwendet. Für Einzugsgebiete  $<80 \text{ km}^2$  wurde eine Potenzfunktion angewendet, die aufgrund der gemessenen Abflussdaten (BAFU) und Niederschlagsdaten (RhiresD) errechnet wurde (Abbildung 9). Die Bandbreite der verwendeten VAK-Werte zwischen 0.27 und 0.68 wird durch verschiedene andere Schweizer Studien bestätigt (Bezzola & Hegg, 2007, 2008; Naef, 1993; Rickli & Forster, 1997). Schlussendlich wurden die VAK-Werte mit den Niederschlagsvolumen multipliziert und somit eine Wasserfracht während des gesamten Ereignisses errechnet.

80% Perzentil	Median/Mean	20% Perzentil
<b>0.68</b>	<b>0.46</b>	<b>0.27</b>

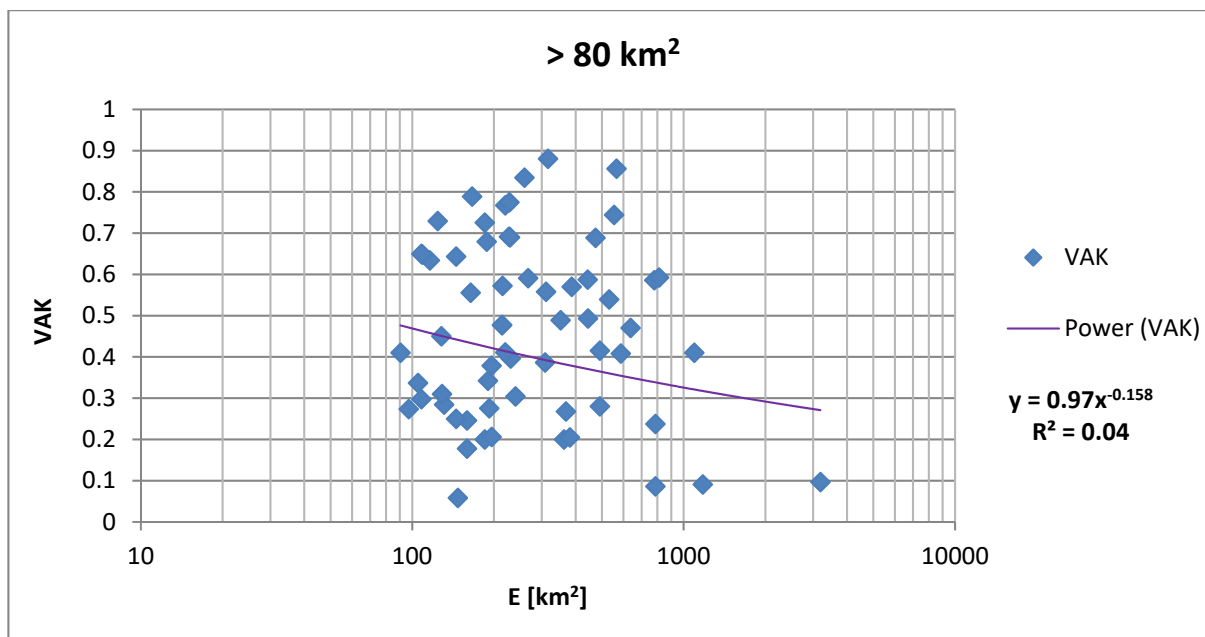


Abbildung 8: Scatterplot vorhandener VAK-Werte für Einzugsgebiete  $>80 \text{ km}^2$ , zusammen mit den verwendeten Perzentil- und Medianwerten.

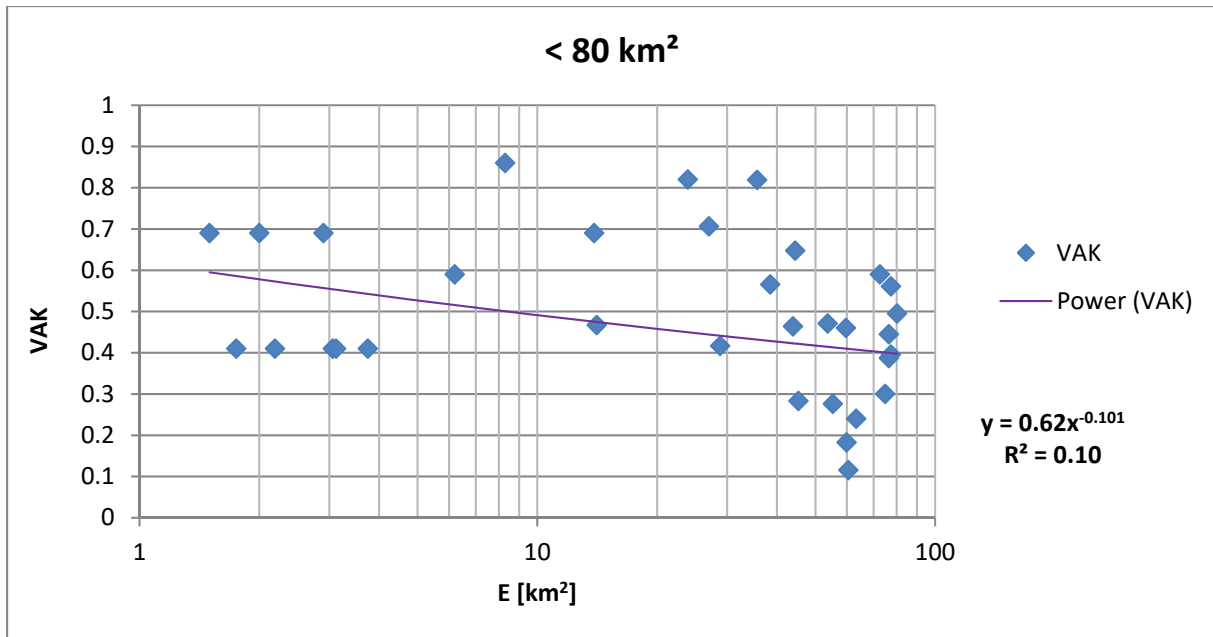


Abbildung 9: Scatterplot vorhandener VAK-Werte für Einzugsgebiete <80 km<sup>2</sup>.

- Spitzenabfluss  $Q_{max}$ :  
Spitzenabflusswerte konnten teilweise noch komplettiert werden mit hydrologischen Daten diverser BAFU Messstationen. Für die übrigen Dateneinträge wurde die Methode GIUB'96 (Weingartner, 1999) angewandt, bei dem ein hundert jährlicher Abfluss (HQ<sub>100</sub>) geschätzt wird. Die Einzugsgebiete wurden dabei in die Hochwasserregionen nach Kan (1995) eingeteilt.

## 2.5 Konsolidierung der Schwemmh Holzdatenbank

Bei der Erarbeitung der Datenbank wurden gewisse Faktoren mehrfach erfasst (verschiedene Angaben je nach Quelle oder verschiedene Berechnungsmethoden). Für die Ableitung der empirischen Schätzformeln (BAFU, 2019) wurde die finale Schwemmh Holzdatenbank (Stand August 2018) darum zuerst konsolidiert, d.h. es wurde gemäss einer Prioritätenreihenfolge jeweils ein Wert pro Faktor ausgewählt.

- Für  $Q_{max}$ : 1. Werte aus Ereignisdokumentationen, 2. Werte basierend auf hydrometrischer BAFU-Station in der Nähe
- Für  $V_w$ : 1. Werte aus Ereignisdokumentationen (u.a. Rickenmann & Koschni, 2010), 2. Werte errechnet mit RhiresD, 3. Schätzung  $V_w$  Median, 4. Oberflächenabflusswerte aus Waldner et al. (2009)
- Für Niederschlag (NS): 1. Lokaler NS aus Ereignisdokumentationen, 2. StorMe Angaben, 3. Regionaler NS aus Ereignisdokumentationen, 4. Werte RhiresD
- Für VAK: 1. Werte aus Dokumentationen des Hochwassers 2005 (Eberhard et al., 2007), 2. Werte aus Recherchen von P. Waldner (2009), 3. Daten von Rickli und Forster (1997), 4. Median der Schätzung VAK

## 2.6 Statistische Verfahren / Auswertungen

### 2.6.1 Normalverteilung

Zuerst wurde untersucht, ob die verschiedenen Variablen einer Normalverteilung folgen, da dies Auswirkungen auf die anzuwendenden statistischen Verfahren hat. Generell haben alle Variablen einen grossen Streubereich über mehrere Grössenordnungen (Abbildung 10).

In einem weiteren Schritt wurden zwei verschiedene Tests auf Normalverteilung angewendet: Shapiro-Wilk Test und D'Agostino-Pearson Test (Signifikanzniveau  $p=0.05$ ). Beide Testergebnisse zeigen, dass keine der untersuchten Variablen normalverteilt ist.

Aufgrund dieses Erkenntnis wurden alle Variablen logarithmiert (mit Basis 10) und die beiden Tests noch einmal durchgeführt (Abbildung 11). Die Ergebnisse sind je nach Test unterschiedlich. Mit logarithmierten Werten eindeutig normalverteilt sind lediglich die Variablen Abflussspitze, Wasserfracht und Feststofffracht. Die logarithmierte Schwemmh Holzmenge (entspricht der abhängigen Variable in den später folgenden Regressionen) zeigt sich nur beim D'Agostino-Pearson Test normalverteilt. Eine visuelle Begutachtung der logarithmierten Schwemmh Holzmenge mittels Q-Q-Plot zeigt, dass die Verteilung auf jeden Fall annähernd normalverteilt ist (Abbildung 12). Für die weiteren Auswertungen wurde stets mit den logarithmierten Werten der Schwemmh Holzdatenbank gearbeitet.

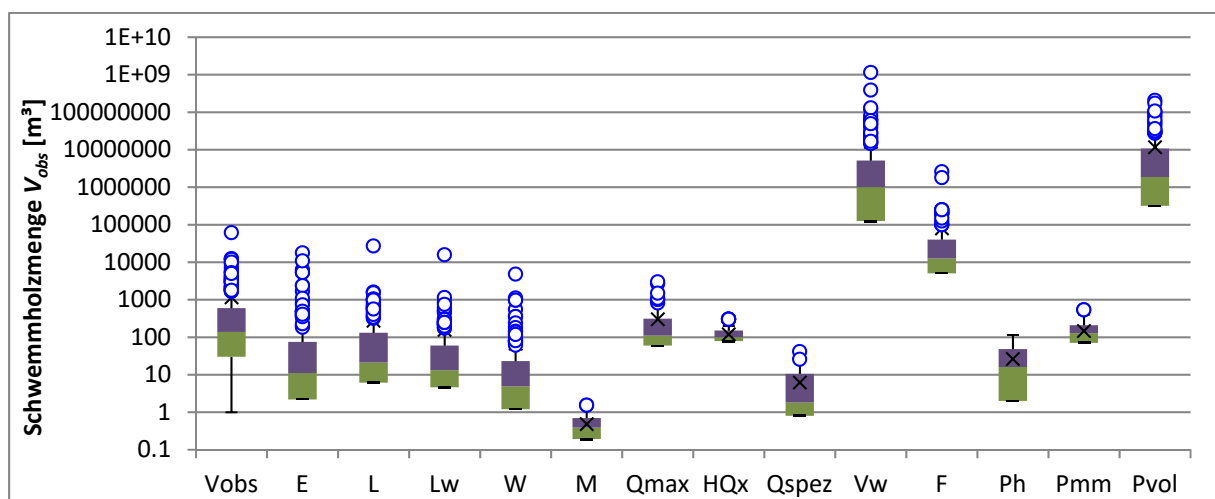


Abbildung 10: Boxplot der Schwemmh Holzmenge  $V_{obs}$  sowie der untersuchten Faktoren.

### Shapiro-Wilk Test

	Vobs	E	L	Lw	W	M	Qmax	HQx	Qspez	Vw	F	Ph	Pmm	Pvol
W-stat	0.9846	0.9864	0.9798	0.9786	0.9710	0.9729	0.9870	0.8323	0.9517	0.9850	0.9866	0.9018	0.9441	0.9819
p-value	0.0217	0.0426	0.0113	0.0085	0.0009	0.0028	0.6225	0.0000	0.0054	0.0699	0.3630	0.0000	0.0000	0.0315
alpha	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
normal	no	no	no	no	no	no	yes	no	no	yes	yes	no	no	no

### d'Agostino-Pearson

DA-stat	2.1753	3.7316	3.9207	7.5134	9.4413	5.1459	1.5077	76.1207	3.8510	2.8965	0.2212	9.1770	58.3345	4.8916
p-value	0.3370	0.1548	0.1408	0.0234	0.0089	0.0763	0.4706	0.0000	0.1458	0.2350	0.8953	0.0102	0.0000	0.0867
alpha	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
normal	yes	yes	yes	no	no	yes	yes	no	yes	yes	yes	no	no	yes

Abbildung 11: Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung (Shapiro-Wilk Test & D'Agostino-Pearson Test).

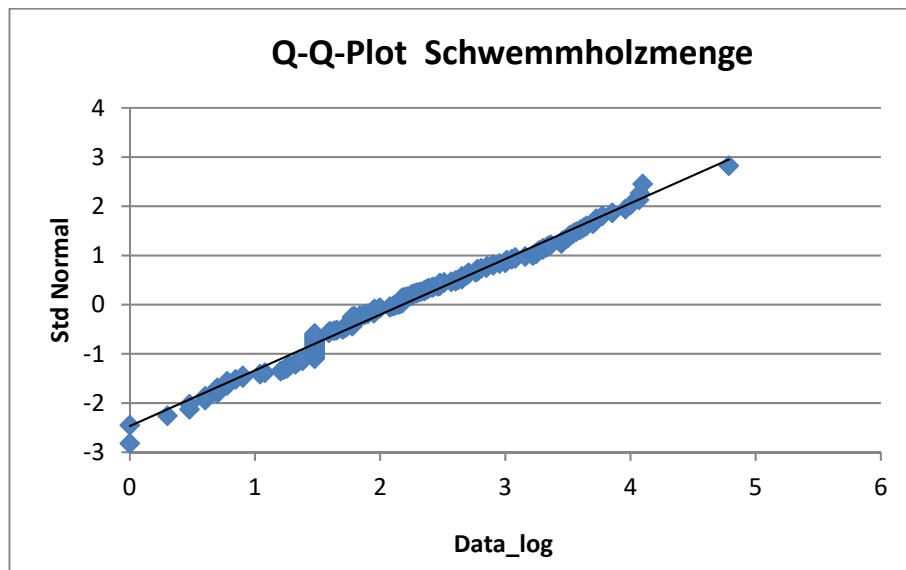


Abbildung 12: Quantil-Quantil-Diagramm der logarithmierten Schwemmholzmengen.

## 2.6.2 Korrelationsmatrix

Korrelationskoeffizienten liefern einen ersten Überblick über den Zusammenhang der Schwemmholzmenge mit den verschiedenen Faktoren. Aufgrund der fehlenden Normalverteilung wird dafür mit dem parameterfreien Spearmans Rangkorrelationskoeffizient gearbeitet. Die logarithmierten Variablen werden hierfür in einer Korrelationsmatrix gegenübergestellt.

## 2.6.3 Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis PCA)

PCA ist ein exploratives Verfahren der multivariaten Statistik. Sie dient dazu, umfangreiche Datensätze zu strukturieren, zu vereinfachen und zu veranschaulichen, indem eine Vielzahl statistischer Variablen durch eine geringere Zahl möglichst aussagekräftiger Linearkombinationen (die „Hauptkomponenten“) genähert wird. Mass für den Informationsgehalt ist der Anteil an der totalen

Varianz, den die einzelnen Hauptkomponenten beschreiben (Smith, 2002). In unserem Fall können somit entlang der Hauptkomponenten-Achsen die Faktoren zusammengefasst und kategorisiert werden.

#### 2.6.4 Regressionen

Für die Ableitung der empirischen Schätzformeln für die Schwemmholzmenge wurden verschiedene Regressionsverfahren getestet. Es hat sich gezeigt, dass aufgrund der grossen Streuung der Daten über mehrere Grössenordnungen, Potenzfunktionen am besten geeignet sind – ähnlich wie das auch bei der Abschätzung von Geschiebefrachten gehandhabt wird (Rickenmann, 2014).

Um die grosse Streuung der Daten zu berücksichtigen, wurden nebst der ordentlichen Regression mittels der Methode der kleinsten Quadrate auch obere und untere Bandbreiten definiert, welche das 90%- bzw. 10%-Perzentil der Datenmenge abdecken. Zusätzlich wurde jeweils noch ein Worst-Case Szenario definiert, wobei nur die extremen Werte oberhalb der definierten Bandbreite (90%-Perzentil) für die Berechnung der Potenzfunktion verwendet wurden.

#### 2.6.5 Multiple Regressionen

Des Weiteren wurde eine Auswahl von multiplen Regressionen mit mehreren Faktoren definiert (ebenfalls als Potenzfunktionen ausgedrückt; Lacombe et al., 2014), welche eine noch bessere Abschätzung der Schwemmholzfracht erlauben als mit nur einem Regressor. Um die multiplen Regressionen praktikabel zu halten, wurden maximal zwei Regressoren in der Gleichung behalten.

#### **Stepwise backward regression**

Einerseits wurde mit der Methode der stepwise backward regression gearbeitet. Hierbei wird in einem ersten Schritt eine multiple Regression mit allen Variablen gerechnet. Diejenige Variable mit der kleinsten Signifikanz wird danach ausgeschlossen und die multiple Regression neu berechnet. Das Verfahren wird solange wiederholt, bis nur noch signifikante Variablen in der Gleichung übrigbleiben bzw. nur noch zwei Regressoren übrigbleiben.

#### **Informationskriterium nach Akaike (AIC)**

Ein weiterer Ansatz der hier zur Anwendung kam, ist die Verwendung des Informationskriteriums nach Akaike (Symonds & Moussalli, 2011). Bei einer Auswahl möglicher Regressoren ist das bevorzugte Modell dasjenige mit dem minimalen AIC-Wert. Das AIC belohnt die Anpassungsgüte, aber es enthält auch einen Strafterm, der eine zunehmende Funktion in Abhängigkeit von der Anzahl der geschätzten Parameter ist. Der Strafterm verhindert Überanpassung, denn die Erhöhung der Anzahl der Parameter im Modell verbessert fast immer die Anpassungsgüte.

Für die Auswahl geeigneter Regressionsmodelle gingen wir hier einen Schritt weiter und verwendeten sogenannte Akaike weights  $w_{AIC}$  (Burnham & Anderson, 2002; Wagenmakers & Farrell, 2004). Für dieses Verfahren wird zuerst ein globales Regressionsmodell berechnet, das alle möglichen Kombinationen von linearen Regressionen anhand der vorhandenen Faktoren auflistet. Dazu wird für

jedes Modell der jeweilige  $w_{AIC}$  Wert berechnet (Wertebereich von 0-1). Dieser kann dann als die Wahrscheinlichkeit interpretiert werden, dass man unter allen möglichen Kombinationen das beste Modell ausgewählt hat; d.h. je höher der  $w_{AIC}$  Wert umso besser.

Des Weiteren kann unter Verwendung des globalen Regressionsmodells der  $w_{AIC}$  Wert für jeden einzelnen Regressor aufsummiert werden. Je höher der  $w_{AIC}$  Wert eines einzelnen Regressors, desto besser erklärt die Variable den Regressand Schwemmholzmenge.

### 2.6.6 Anpassungsgüte

Die Anpassungsgüte (engl.: goodness of fit) gibt an, wie gut ein geschätztes Modell eine Menge von Beobachtungen erklären kann. Masse der Anpassungsgüte erlauben eine Aussage über die Diskrepanz zwischen den theoretischen Werten der untersuchten Zufallsvariablen, die aufgrund des Modells erwartet bzw. prognostiziert werden, und den tatsächlich gemessenen Werten.

Um die Anpassungsgüte der hier entwickelten empirischen Schätzformeln abzuschätzen, wurden folgende Gütemasse berechnet und miteinander verglichen (Moriasi et al., 2007):

- Bestimmtheitsmass  $R^2$  und adjustiertes Bestimmtheitsmass  $R^2_{adj}$
- Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)
- Normalized root mean standard deviation (NRMSD)
- Root-mean square deviation (RMSD)
- Root-mean square normalized error (RMSNE)
- Gemittelte absolute Differenz (Überschätzung vs. Unterschätzung)
- Gemitteltes Verhältnis ( $V_{reg}/V_{obs}$ )

In Anhang B sind die oben gelisteten Gütemasse für die empirischen Schätzformeln quantifiziert und tabellarisch aufgelistet.

## 2.7 Untersuchung weiterer Einflussfaktoren auf die Schwemmholzmenge

Neben den oben erwähnten quantitativen Faktoren (Verhältnisskala), wurden auch andere mögliche Einflussfaktoren auf tieferen Skalenniveaus (Nominalskala, Intervallskala) eruiert. So wurden die dokumentierten Schwemmholzmengen beispielsweise kategorisiert nach:

- Eintragsprozess (Rutschung, Murgang, Seitenerosion, Gerinneholz-Mobilisierung)
- Niederschlagstyp (Dauerregen, Gewitter, Schneeschmelze oder Kombination davon)
- Jährlichkeit (von Niederschlag und Abfluss)
- Anteil Laub- vs. Nadelholz (Angaben aus LFI Datensatz)
- Anteil Totholz (Angaben aus LFI Datensatz)

Methodisch wurde dafür einerseits mit Box-Plots gearbeitet zur grafischen Darstellung der Verteilung. Dabei werden verschiedene robuste Streuungs- und Lagemasse in einer Darstellung zusammengefasst (u.a. Median, oberes und unteres Quartil, Ausreisser).

Mit nichtparametrischen Tests, namentlich dem Wilcoxon-Mann-Whitney-Test (2 Gruppen) bzw. dem Kruskal-Wallis-Test (> 2 Gruppen), wurde untersucht, ob es innerhalb einer Kategorisierung (z.B. Eintragsprozess) signifikante Unterschiede in der Verteilung der Schwemmh Holzmenge gibt. Falls signifikante Unterschiede zwischen den Unterkategorien angezeigt werden, kann mit dem Dunn's Test (nichtparametrischer Post-hoc-Test) weiter untersucht werden, welche der Unterkategorien sich konkret voneinander unterscheiden.

## 3 Resultate und Diskussion

### 3.1 Spearman-Korrelationsmatrix

Abbildung 13 zeigt in der ersten Kolonne die Abhängigkeit der Schwemmh Holzmenge  $V_{obs}$  in Bezug auf die verschiedenen Kontrollparameter. Für die meisten Variablen ist eine signifikante, mittlere bis hohe positive Korrelation mit der Schwemmh Holzmenge feststellbar. Die negativen Werte von  $M$  und  $Q_{spez}$  sind darauf zurückzuführen, dass sie durch die Einzugsgebietsfläche im Divisor standardisiert werden und demnach umgekehrt proportional zu  $E$  sind.

Aus der Korrelationsmatrix kann man auch ableiten, dass die Faktoren untereinander nicht unabhängig sind und zum Teil hohe Korrelation aufweisen (Multikollinearität). Als dominanter Faktor kann die Einzugsgebietsfläche angesehen werden, da der Untersuchungsperimeter sowohl die topografischen Gegebenheiten bestimmt (je mehr Fläche, umso mehr Wald und Gerinne), als auch die hydrologischen Bedingungen stark beeinflusst (je mehr Fläche, umso grösser  $V_w$  und  $Q_{max}$ ). Als unabhängige Variablen können  $P_h$ ,  $P_{mm}$  und  $P_{vol}$  angesehen werden, die das Niederschlagsereignis charakterisieren. Je nach Dauer und Intensität des Niederschlags (konvektiver vs. stratiformer Niederschlag) herrschen ganz unterschiedliche hydrologische Bedingungen, welche wiederum Einfluss auf das Schwemmh Holzvorkommen haben können. Auch die räumliche Verteilung des Niederschlags (lokal vs. grossflächig) ist von grosser Bedeutung.

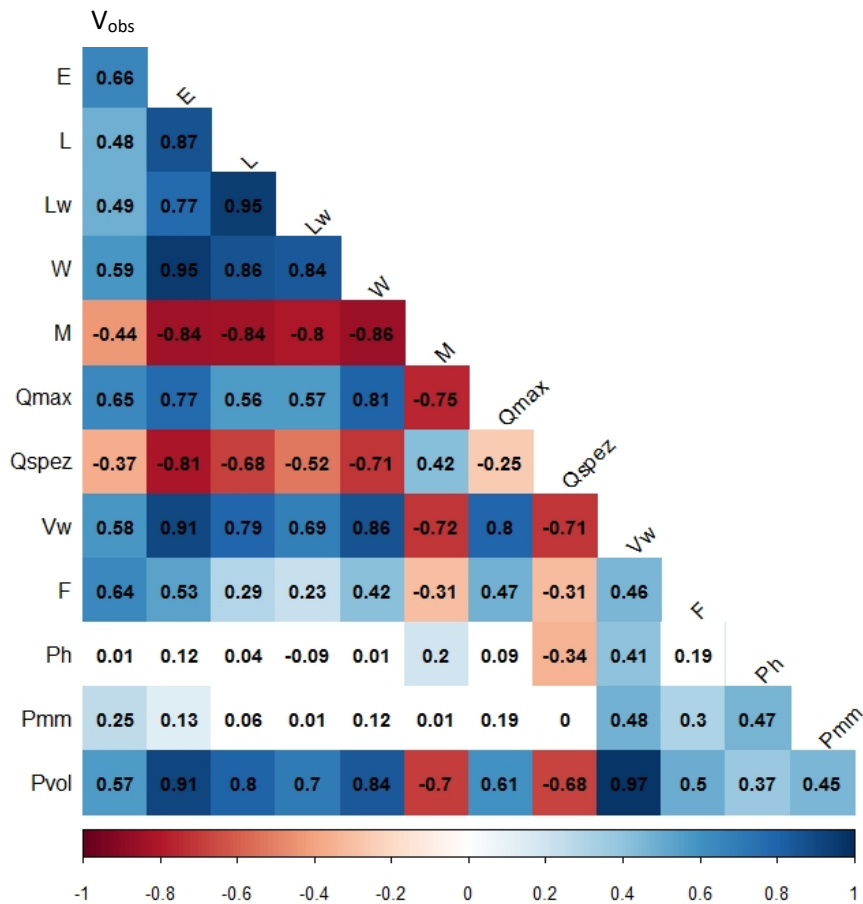


Abbildung 13: Spearman-Korrelationsmatrix der untersuchten Parameter.

### 3.2 Hauptkomponentenanalyse (PCA)

Das PCA-Eigenwertdiagramm (Abbildung 14) zeigt, dass die ersten beiden Hauptkomponenten rund 73% der Varianz zu erklären vermögen (erste Hauptkomponente PC1 = 57%, zweite Hauptkomponente PC2 = 16%). Mit zunehmender Anzahl Hauptkomponenten nimmt die erklärte Varianz nur noch marginal zu.

Wenn man nun die Variablen anhand der ersten beiden Hauptkomponenten zweidimensional darstellt, erkennt man ein relativ klares Clustering der Daten (Abbildung 15). Einzugsgebiets-Charakteristika werden hauptsächlich durch die erste Hauptkomponente beschrieben (PC1 ≈ 1). Ereignisabhängige Faktoren wiederum sind in einer relativ engen Bandbreite der zweiten Hauptkomponente anzutreffen (PC2 = -0.5 – -0.8). Die Schwemmholzmenge selbst liegt relativ mittig in der Punktwolke, was impliziert, dass sie von allen Faktoren beeinflusst wird.

Des Weiteren sieht man, dass die Einzugsgebietsgröße  $E$  nicht nur bezüglich PC1, sondern auch auf der „ereignisabhängigen“ Achse PC2 einen relativ hohen Absolutwert aufzeigt. Dies impliziert, dass  $E$  ein guter Proxy für die hydrologischen Variablen darstellt (beispielsweise, dass der Niederschlag  $P_{vol}$  über die Fläche integriert wird). Die Variablen  $M$  und  $Q_{spez}$  liegen diagonal gespiegelt zu  $E$ , was deren Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgröße hervorhebt.

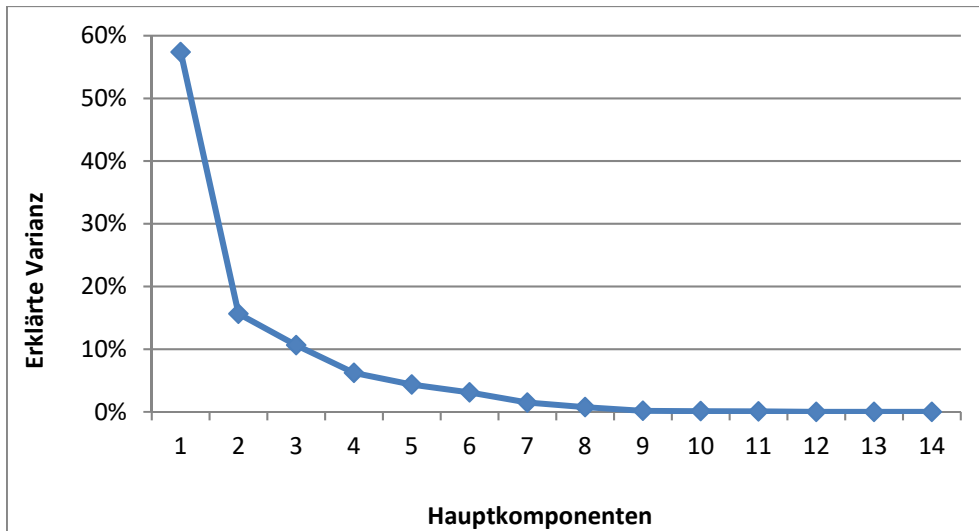


Abbildung 14: Eigenwertdiagramm (engl.: scree plot) der Hauptkomponentenanalyse aus der Schwemmholzdatenbank. Die y-Achse zeigt, wieviel Prozent der Varianz (bzgl. Grundgesamtheit) durch die einzelnen Komponenten erklärt werden.

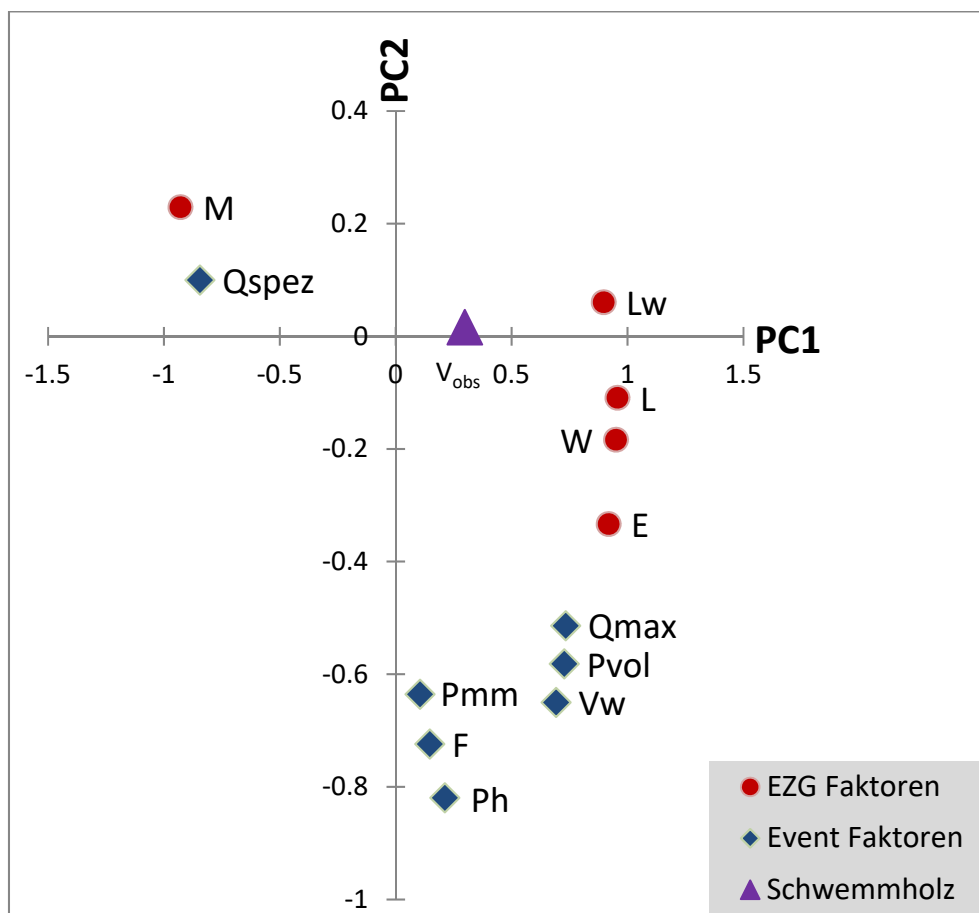


Abbildung 15: Zweidimensionale Hauptkomponentenanalyse der untersuchten Variablen der Schwemmholzdatenbank.

### 3.3 Empirische Schätzformeln der Schwemmholzmenge

Folgende Auflistung fasst die zehn aussagekräftigsten Schätzformeln zur Bestimmung der Schwemmholzmenge  $V_{reg}$  zusammen:

**Tabelle 1: Übersicht der Bandbreiten und Worst-Case-Szenarien je Schätzformel, inklusive Bewertungskriterien. Je dunkler ein Bewertungsfeld eingefärbt ist, desto besser ist die Anpassungsgüte.**

		Faktor	Exponent	$n$	$R^2$	$\frac{P_{90}}{P_{10}}$	$\frac{V_{reg}}{V_{obs}}$ [ $r = 0.33 - 3.33$ ] %	
***	(1)	$V_{reg} = 38 E^{0.54}$	10%-Perzentil	6	209	0.43	50	50
			90%-Perzentil	300				
			Worst Case	558				
**	(2)	$V_{reg} = 77 W^{0.56}$	10%-Perzentil	13	179	0.35	55	52
			90%-Perzentil	720				
			Worst Case	1460				
*	(3)	$V_{reg} = 49 L_W^{0.5}$	10%-Perzentil	7	175	0.24	71	44
			90%-Perzentil	500				
			Worst Case	925				
*	(4)	$V_{reg} = 40 L^{0.48}$	10%-Perzentil	5.5	177	0.23	73	41
			90%-Perzentil	400				
			Worst Case	860				
***	(5)	$V_{reg} = 0.2 F^{0.65}$	10%-Perzentil	0.04	196	0.45	35	56
			90%-Perzentil	1.4				
			Worst Case	1.4				
*	(6)	$V_{reg} = 0.3 V_W^{0.47}$	10%-Perzentil	0.04	167	0.34	65	50
			90%-Perzentil	2.6				
			Worst Case	6.2				
***	(7)	$V_{reg} = 5.7 Q_{max}^{0.91}$	10%-Perzentil	0.65	77	0.42	46	58
			90%-Perzentil	30				
			Worst Case	115				
**	(8)	$V_{reg} = 0.3 P_{vol}^{0.46}$	10%-Perzentil	0.04	164	0.32	55	51
			90%-Perzentil	2.2				
			Worst Case	8				
**	(9)	$V_{reg} = 0.4 Q_{max}^{0.46} V_W^{0.33}$	10%-Perzentil	0.3	166	0.32	47	51
			90%-Perzentil	14				
			Worst Case	87				
***	(10)	$V_{reg} = 0.2 E^{0.23} F^{0.6}$	10%-Perzentil	0.06	196	0.49	30	56
			90%-Perzentil	1.8				
			Worst Case	1.7				

Neben acht einfachen Gleichungen mit nur einem Regressor, wurden zusätzlich noch zwei multiple Regressionen mit jeweils zwei Faktoren bestimmt:

Gleichung (9) besteht ausschliesslich aus ereignisabhängigen Faktoren, wobei  $Q_{max}$  für die Intensität des Ereignisses steht, während  $V_w$  die Dauer des Ereignisses beschreibt. Intensität und Dauer eines Abflussereignisses sind beides wichtige Aspekte, die bestimmen wieviel Schwemmholz schliesslich effektiv transportiert wird.

Gleichung (10) ist eine Kombination aus Einzugsgebietsfläche und Feststofffracht, welche die erklärte Varianz mit  $R^2 = 0.49$  im Vergleich zu den anderen Gleichungen nochmals deutlich verbessert.

Anhang A visualisiert die oben erwähnten Gleichungen in Streudiagrammen und zeigt die definierten Bandbreiten sowie das jeweilige Worst-Case-Szenario an. Zusätzlich werden zum Vergleich bereits existierende Schätzformeln (Rickenmann, 1997) dargestellt und kommentiert.

Tabelle 1 gibt einen Überblick zu den Faktoren und Exponenten der zehn Schätzformeln. Neben der allgemeinen Potenzfunktion wird zusätzlich noch die Umhüllende sowie das Worst-Case-Szenario aufgelistet. Basierend auf einer multikriteriellen Entscheidungsanalyse (Saaty, 1990) wurden vier verschiedene Bewertungskriterien verwendet, um die Anpassungsgüte der zehn Schätzformeln zu differenzieren: 1) die Anzahl  $n$  der verwendeten Datenpunkte für die Herleitung der Formeln; 2) das Bestimmtheitsmass  $R^2$ ; 3) das Faktorverhältnis der Perzentilgleichungen  $\frac{P_{90}}{P_{10}}$  (bei gleichem Exponent ein Indikator für den Streubereich der Formeln); 4) die Prozentzahl der Datenpunkte, welche innerhalb einer Größenordnung liegen beim Vergleich der modellierten zur beobachteten Schwemmh Holzmenge ( $0.33 \leq \frac{V_{reg}}{V_{obs}} \leq 3.33$ ). Die Asteriske links neben den Gleichungen (1) bis (10) fassen die Anpassungsgüte schliesslich zusammen, wobei drei Asteriske (\*\*\*) der besten Bewertung entsprechen.

Die Umhüllende der zehn Schätzformeln liegt durchgehend zwischen 1-2 Größenordnungen. Da der Exponent der Perzentil-Gleichungen konstant gehalten wird, kann das Verhältnis zwischen den Faktoren 90%- vs. 10%-Perzentil genommen werden, um die Bandbreite der Umhüllenden zu quantifizieren. Dieser Quotient schwankt je nach Schätzformel zwischen 30 und 73.

### 3.4 Modellierte versus beobachtete Schwemmholzmenge

Innerhalb zweier Grössenordnungen ( $r = V_{reg}/V_{obs} = 0.1-10$ ) liegen bei allen zehn Schätzformeln rund 90% aller Verhältniswerte (Tabelle 2). Rund 50% der Verhältniswerte liegen innerhalb einer Grössenordnung grösser oder kleiner ( $r = 0.33-3.33$ ). Rund 30% der Verhältniswerte liegen innerhalb eines Faktors 2 grösser oder kleiner ( $r = 0.5-2$ , bzw. Faktor 2 über- oder unterschätzt).

Tabelle 2: Verhältnis  $r = V_{reg}/V_{obs}$  innerhalb gewisser Bandbreiten, aufgelistet nach den zehn Schätzformeln.

Gleichung	Formel		r =	r =	r =
			0.1-10	0.33-3.33	0.5-2
(1)	$V_{reg} = 38 E^{0.54}$	Anz.	184	104	68
		%	<b>88%</b>	<b>50%</b>	<b>33%</b>
(2)	$V_{reg} = 77 W^{0.56}$	Anz.	157	93	58
		%	<b>88%</b>	<b>52%</b>	<b>32%</b>
(3)	$V_{reg} = 49 L_W^{0.5}$	Anz.	149	77	43
		%	<b>85%</b>	<b>44%</b>	<b>25%</b>
(4)	$V_{reg} = 40 L^{0.48}$	Anz.	152	73	59
		%	<b>86%</b>	<b>41%</b>	<b>30%</b>
(5)	$V_{reg} = 0.2 F^{0.65}$	Anz.	175	109	68
		%	<b>89%</b>	<b>56%</b>	<b>35%</b>
(6)	$V_{reg} = 0.3 V_W^{0.47}$	Anz.	148	84	51
		%	<b>89%</b>	<b>50%</b>	<b>31%</b>
(7)	$V_{reg} = 5.7 Q_{max}^{0.91}$	Anz.	68	45	25
		%	<b>88%</b>	<b>58%</b>	<b>32%</b>
(8)	$V_{reg} = 0.3 P_{vol}^{0.46}$	Anz.	148	83	51
		%	<b>90%</b>	<b>51%</b>	<b>31%</b>
(9)	$V_{reg} = 0.4 Q_{max}^{0.46} V_W^{0.33}$	Anz.	149	84	53
		%	<b>90%</b>	<b>51%</b>	<b>32%</b>
(10)	$V_{reg} = 0.2 E^{0.23} F^{0.6}$	Anz.	179	109	64
		%	<b>91%</b>	<b>56%</b>	<b>33%</b>

In Abbildung 16 werden die Verhältniszerte  $r$  am Beispiel der Einzugsgebietsformel (Gleichung (1) in Tabellen 1 und 2) visualisiert. Dazu werden die Verhältniszerte  $r$  in Boxplots gleicher Populationsgrösse eingeteilt und aufsteigend gegen die beobachtete Schwemmh Holzmenge aufgetragen. Die Grafik zeigt, dass kleine SH-Mengen meist überschätzt werden, während grosse SH-Mengen meist unterschätzt werden. Dieser Trend ist generell bei allen zehn Schätzformeln erkennbar, jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt (siehe Anhang D). Relativ genau sind die Schätzformeln für Schwemmh Holz Mengen von ca. 50-500 fm<sup>3</sup>. Der Median der Boxplots liegt in diesem Bereich innerhalb eines Verhältniszerte  $r = 0.5-2$ , d.h. die modellierte SH-Menge wird maximal mit einem Faktor 2 unter- oder überschätzt. Bezüglich Einzugsgebietsgrösse ist kein Skaleneffekt des Verhältniszerte erkennbar (Abbildung 17).

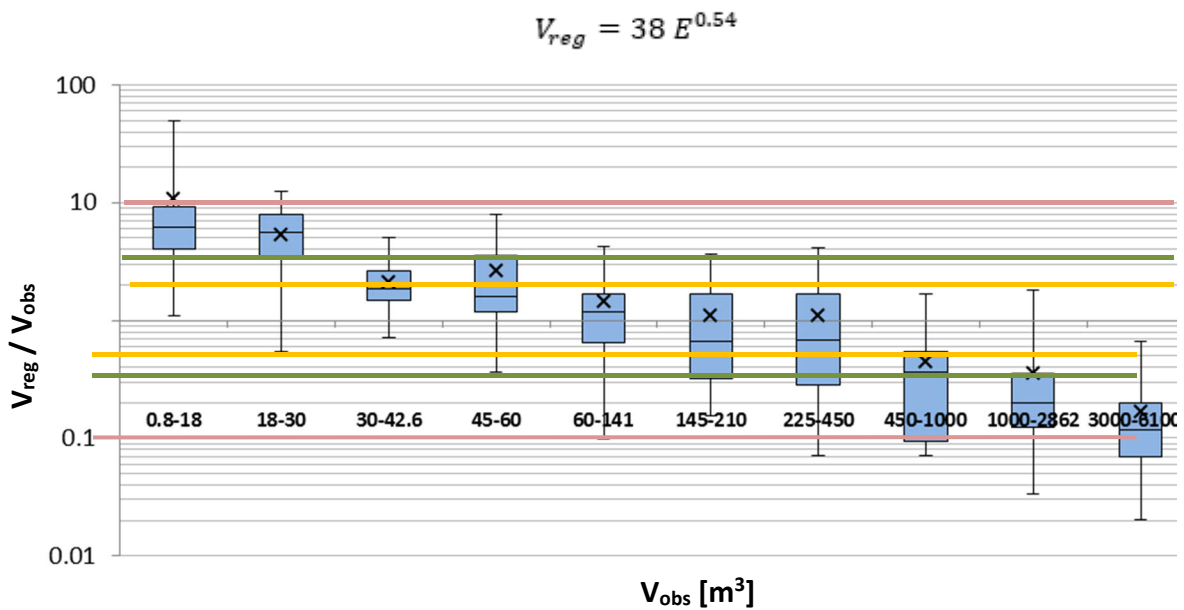


Abbildung 16: Boxplots der Verhältniszerte  $r$  am Beispiel von Gleichung (1) – der Einzugsgebietsformel –, aufgetragen gegen die beobachtete Schwemmh Holzmenge (X-Achse). Der schwarze Strich innerhalb der blauen Kästen zeigt den Median, das schwarze Kreuz den jeweiligen Mittelwert.

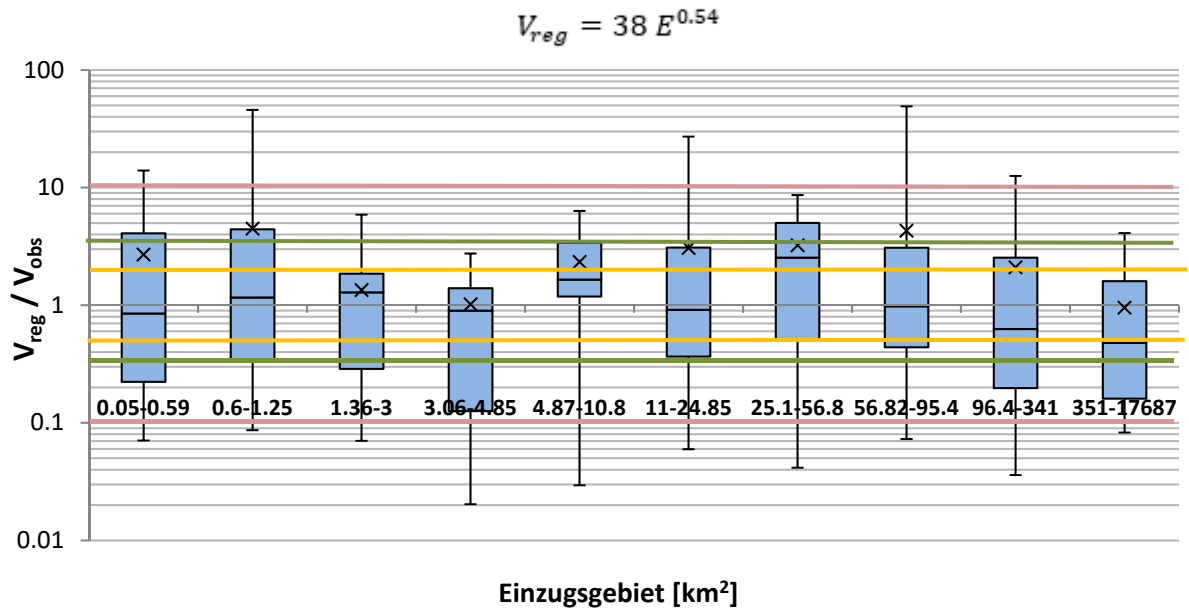


Abbildung 17: : Boxplots der Verhältniszerte  $r$  am Beispiel von Gleichung (1) – der Einzugsgebietsformel –, aufgetragen gegen die Einzugsgebietsgrösse (X-Achse). Der schwarze Strich innerhalb der blauen Kästen zeigt den Median, das schwarze Kreuz den jeweiligen Mittelwert.

### 3.5 Vergleich mit dem empirischen GIS-Ansatz (EGA)

Abbildung 18 stellt die beobachteten Schwemmh Holzfrachten ( $V_{obs}$ ) den geschätzten Schwemmh Holzfrachten gemäss des empirischen GIS-Ansatzes EGA ( $V_{est}$ ; Kap. 1.2 des WoodFlow Syntheseberichts, BAFU, 2019) bzw. den geschätzten Schwemmh Holzfrachten mittels empirischer Schätzformel ( $V_{reg}$  hier beispielhaft anhand Gleichung (1) mit der Einzugsgebietsgrösse als Kontrollvariable) gegenüber. Der EGA-Ansatz überschätzt die Holzmenge tendenziell (Abbildung 18B), während die empirische Gleichung (1) die Holz mengen eher unterschätzt (Abbildung 18A) – insbesondere bei Schwemmh Holz mengen  $V_{obs} \geq 500 \text{ m}^3$ . Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei allen anderen Schätzformeln.

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

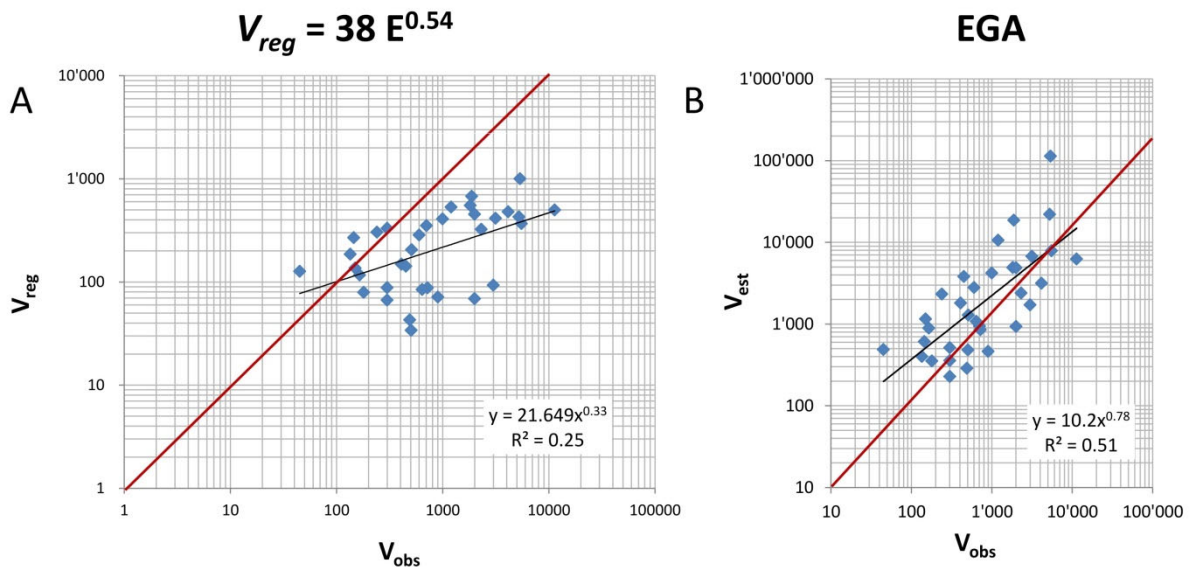


Abbildung 18: Vergleich der beobachteten Schwemmholzfracht  $V_{obs}$  gegenüber (A) der modellierten Schwemmholzfracht  $V_{reg}$  gemäss empirischer Schätzformel nach Einzugsgebietsgrösse und (B) der modellierten Schwemmholzfracht  $V_{est}$  gemäss EGA.

### 3.6 Weitere Einflussfaktoren

In diesem Unterkapitel werden weitere Einflussfaktoren auf das Schwemmholzvorkommen bei Abflussereignissen untersucht.

#### 3.6.1 Eintragsprozesse

Vier verschiedene Prozesse für den Eintrag von Schwemmholz ins Gerinne werden hier unterschieden, namentlich Mobilisierung von Totholz im Gerinne, Murgänge aus steilen Zubringern, Rutschungen sowie Seitenerosion. So vollständig wie möglich wurde aufgrund der vorhandenen Dokumentationen versucht, für jedes Schwemmholzereignis in der Datenbank den jeweilig dominanten Eintragsprozess zu definieren. In Abbildung 19 und 20 sind die beobachtete Schwemmholzmenge sowie die Schwemmholzmenge pro Quadratkilometer Einzugsgebiet (spezifische Schwemmholzmenge) nach den erwähnten Eintragsprozessen kategorisiert. Zwischen den Eintragsprozessen gibt es deutliche Unterschiede, was auch durch den Kruskal-Wallis Test bestätigt wird ( $p > 0.01$ ). Der Dunn Test zeigt weiter, dass sich vor allem der Prozess Murgang von den anderen Eintragsarten unterscheidet.

Die absolute Schwemmholzmenge ist bei Murgängen bezüglich Median ( $60 \text{ fm}^3$ ) am kleinsten, zeigt jedoch auch die grösste Streuung (Abbildung 19). Wenn man die spezifische Schwemmholzfracht ( $V_{obs}/E$ ) anschaut, ist die Schwemmholzmenge pro Quadratkilometer Einzugsgebietsfläche bei den Murgängen am höchsten (Abbildung 20). Murgänge, wie auch Rutschungen, sind sehr sporadische Prozesse. Wenn solche Prozesse jedoch ausgelöst werden, können diese sehr grosse Mengen an Schwemmholz mobilisieren.

Seitenerosion hingegen ist vor allem in grösseren Einzugsgebieten relevant (Abbildung 21). So war z.B. beim Hochwasser im August 2005 Seitenerosion häufig im Unterlauf (Einzugsgebietsgrösse  $\geq 100 \text{ km}^2$ ) der dominante Eintragsprozess von Schwemmholz (Steeb et al., 2017). Als Erklärung kann die erhöhte

Abflusskapazität flussabwärts aufgeführt werden, wobei durch die grösseren Abflüsse auch die erosive Kraft des Gebirgsflusses zunimmt. In Wildbächen mit kleineren Einzugsgebieten hingegen sind aufgrund der steilen Topografie meist sporadische Massenbewegungen wie Murgänge oder Rutschungen die dominierenden Prozesse für den Schwemmhölzeintrag, was häufig zu grösseren spezifischen Schwemmhölzfrachten führt.

Dies wird auch in Abbildung 22 deutlich, wo die Eintragsprozesse der Meltonzahl der entsprechenden Gebiete gegenübergestellt werden. Einzugsgebiete mit dominantem Eintragsprozess Murgang haben dabei klar die höchste Meltonzahl (Median = 0.62).

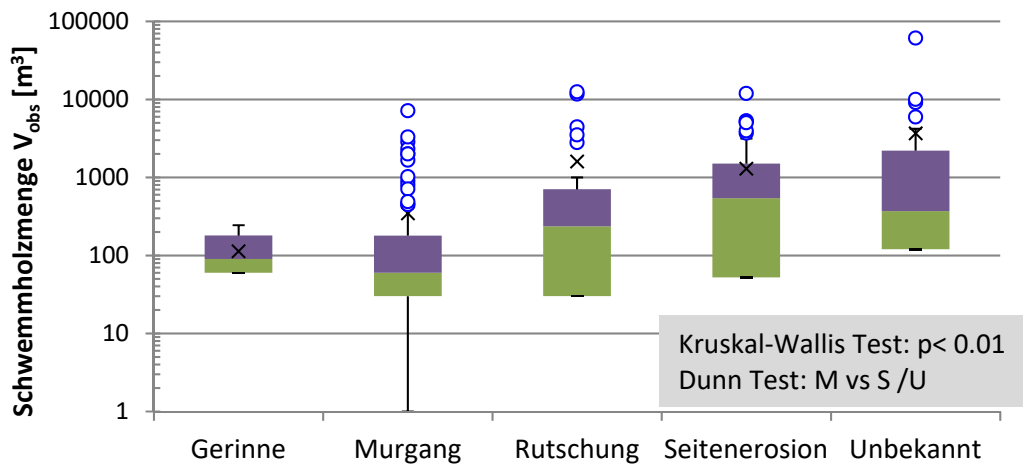


Abbildung 19: Boxplots von Schwemmhölzereignissen und Vergleich der Schwemmhölzmenge nach dominantem Eintragsprozess.

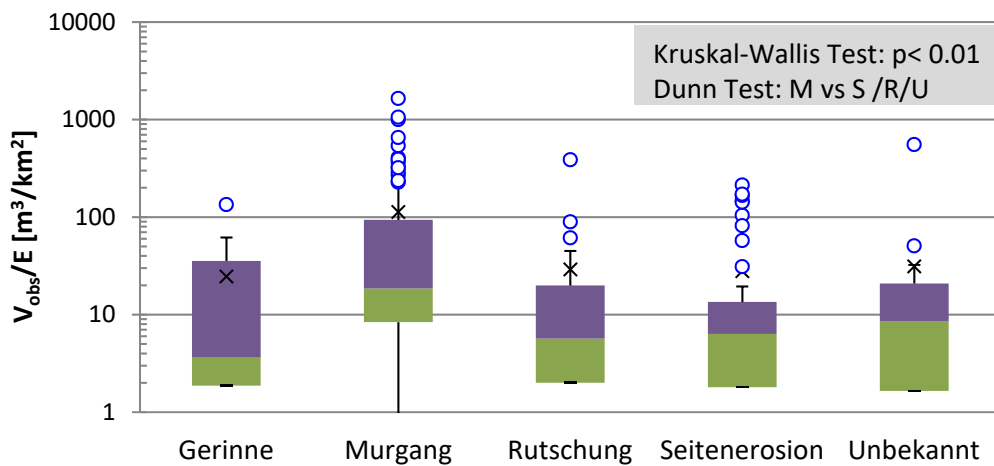


Abbildung 20: Boxplots von Schwemmhölzereignissen und Vergleich der spezifischen Schwemmhölzmenge nach dominantem Eintragsprozess.

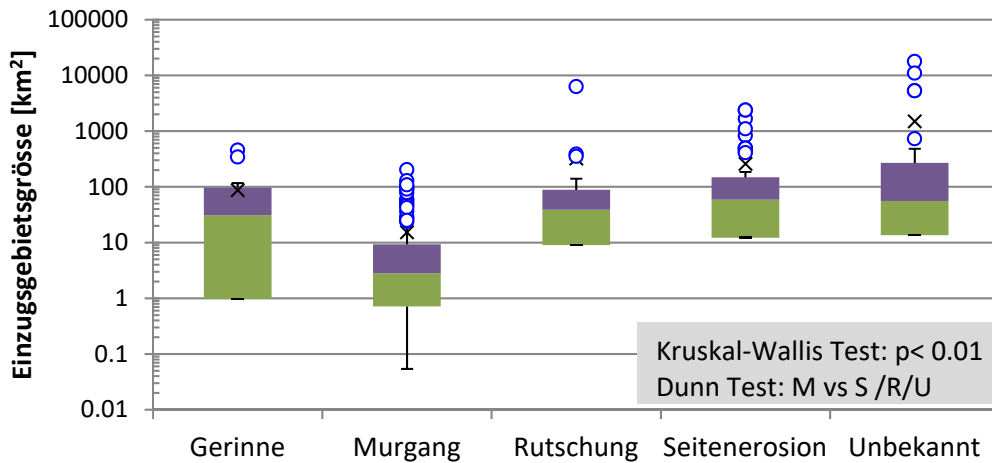


Abbildung 21: Boxplots zum Vergleich der Einzugsgebietsgrösse nach Eintragsprozess von Schwemmholz.

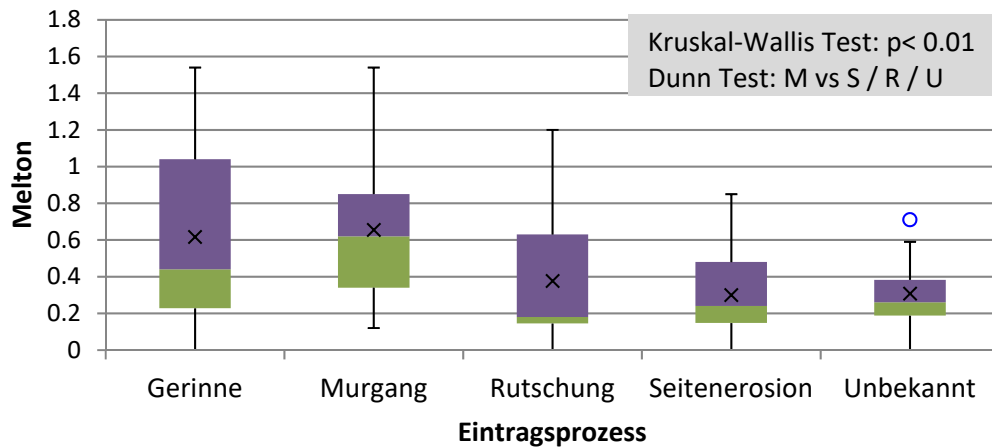


Abbildung 22: : Boxplots zum Vergleich der Meltonzahl von Einzugsgebieten nach deren Eintragsprozess.

### 3.6.2 Niederschlagstyp/Abflussbildung

Drei verschiedene auslösende Niederschlagstypen, welche die Abflussbildung beeinflussen, werden hier unterschieden, namentlich konvektiver Niederschlag (Gewitter), stratiformer Niederschlag (Dauerregen) sowie Schneeschmelze. So vollständig wie möglich wurde aufgrund der vorhandenen Dokumentationen versucht, für jedes Schwemmholzereignis in der Datenbank den jeweils dominanten Niederschlagstyp bzw. Prozess für die Abflussbildung zu definieren.

In Abbildung 23 sind die Schwemmholzmengen nach den erwähnten Ereignis auslösenden Niederschlagstypen (oder Kombinationen davon) kategorisiert. Gemäss Kruskal-Wallis Test gibt es keine signifikante Unterschiede zwischen den Kategorien, trotzdem lassen sich gewisse Differenzen feststellen. Der Median ist bezgl. Dauerregen und Gewitter mit 150 fm<sup>3</sup> gleich, jedoch gibt es beim Dauerregen grössere Ausreisser nach oben. Wenn es zu einer Kombination der Niederschlagstypen kommt, wird tendenziell mehr Schwemmholz mobilisiert. Dies zum Beispiel, wenn durch die Schneeschmelze zusätzliche Wasserfracht für den Transport vorhanden ist. Ein anderes Szenario für grosse Schwemmholzmengen ist gegeben, wenn die Böden bereits gesättigt sind (z.B. durch

Dauerregen) und es anschliessend zu einem regenreichen Gewitter über dem Einzugsgebiet kommt. Dadurch trägt ein Grossteil des Niederschlags direkt zum Abfluss bei.

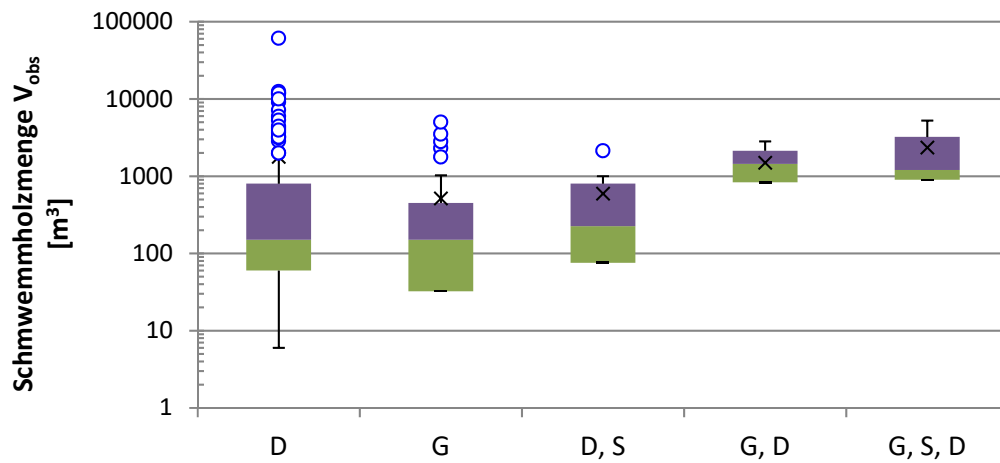


Abbildung 23: Boxplots zum Vergleich der Schwemmholzmenge nach Ereignis auslösenden Niederschlagstypen (D= Dauerregen; G= Gewitter; S= Schneesmelze).

Abbildung 24 vergleicht die Schwemmholzmengen, klassiert nach Niederschlagstypen, mit dem gesamten Niederschlagsvolumen eines Ereignisses. Aufgrund der kurzen Ereignisdauer und da sie meist lokal begrenzt sind, zeigen Gewitter grundsätzlich kleinere Niederschlagsvolumen als Dauerregen und kombinierte Niederschlagsprozesse. Die Schwemmholzmengen bei durch Gewitter verursachten Abflussereignissen liegen zum grössten Teil unter 1'000 fm<sup>3</sup>. Unter Berücksichtigung der Einzugsgebietsfläche ergeben sich für Gewitter tendenziell grössere spezifische Schwemmholzmengen als für Dauerregen (Abbildung 25).

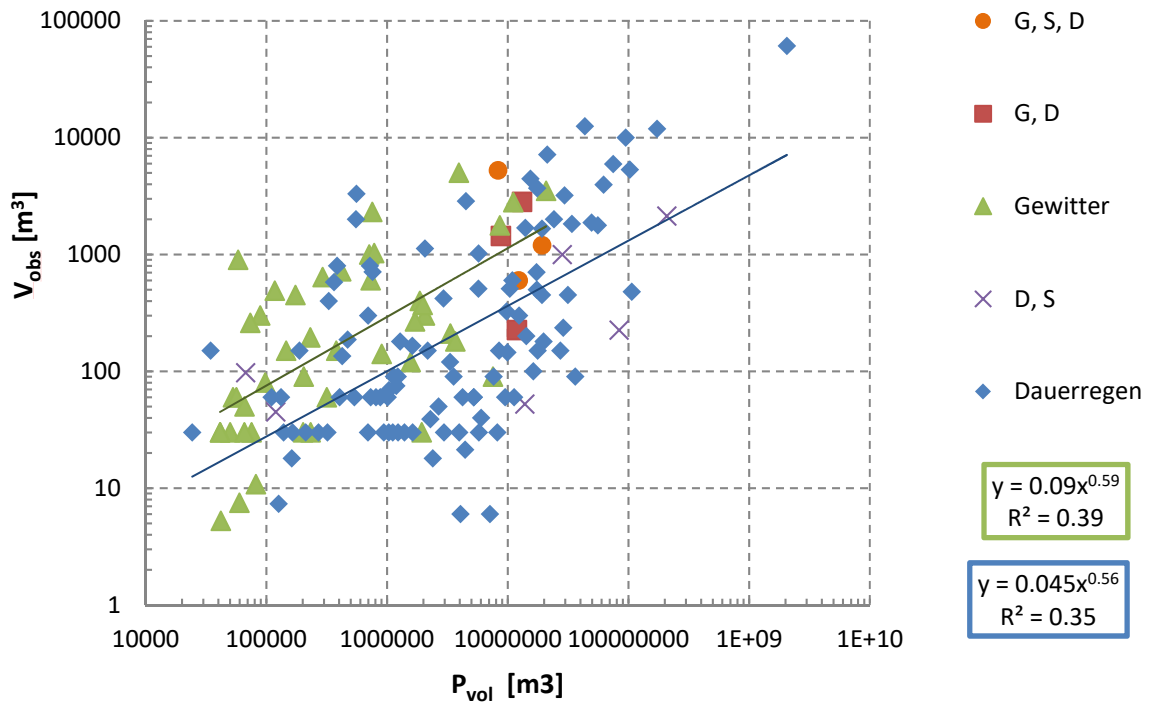


Abbildung 24: Scatterplots der Schwemmholzmengen klassiert nach Ereignis auslösenden Niederschlagstypen (D= Dauerregen; G= Gewitter; S= Schneeschmelze), in Abhängigkeit des gesamten Niederschlagsvolumens.

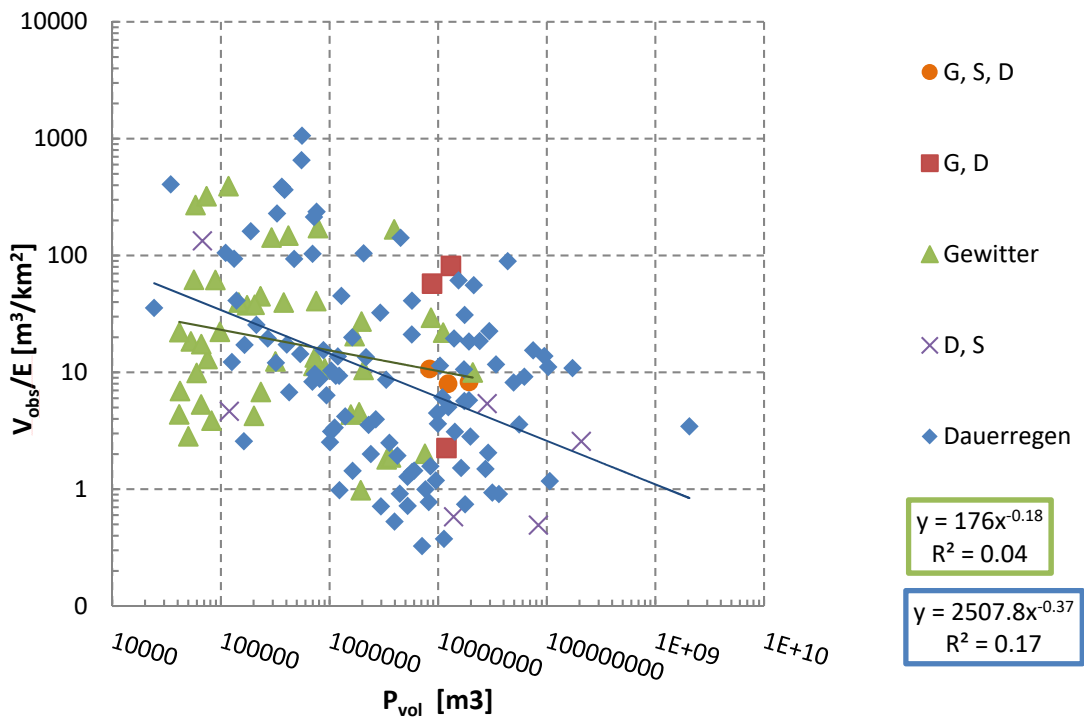


Abbildung 25: Scatterplots der spezifischen Schwemmholzmenge klassiert nach Ereignis auslösenden Niederschlagstypen (D= Dauerregen; G= Gewitter; S= Schneeschmelze), in Abhängigkeit des gesamten Niederschlagsvolumens.

Aus dem Vergleich der spezifischen Schwemmh Holzmenge mit dem gesamten Niederschlagsvolumen lässt sich eine Verschiebung bei ca.  $P_{vol} = 1'000'000 \text{ m}^3$  feststellen (Abbildung 26). Grob lassen sich die Ereignisse mit  $P_{vol} > 1'000'000 \text{ m}^3$  eher dem Dauerregen zuordnen. Gleichung (8) überschätzt tendenziell das SH-Volumen bei Ereignissen infolge Dauerregen (v.a. für  $V_{obs} < 300 \text{ m}^3$ ) und unterschätzt das SH-Volumen bei Ereignissen durch Gewitter (v.a. für  $V_{obs} > 200 \text{ m}^3$ ; Abbildung 27).

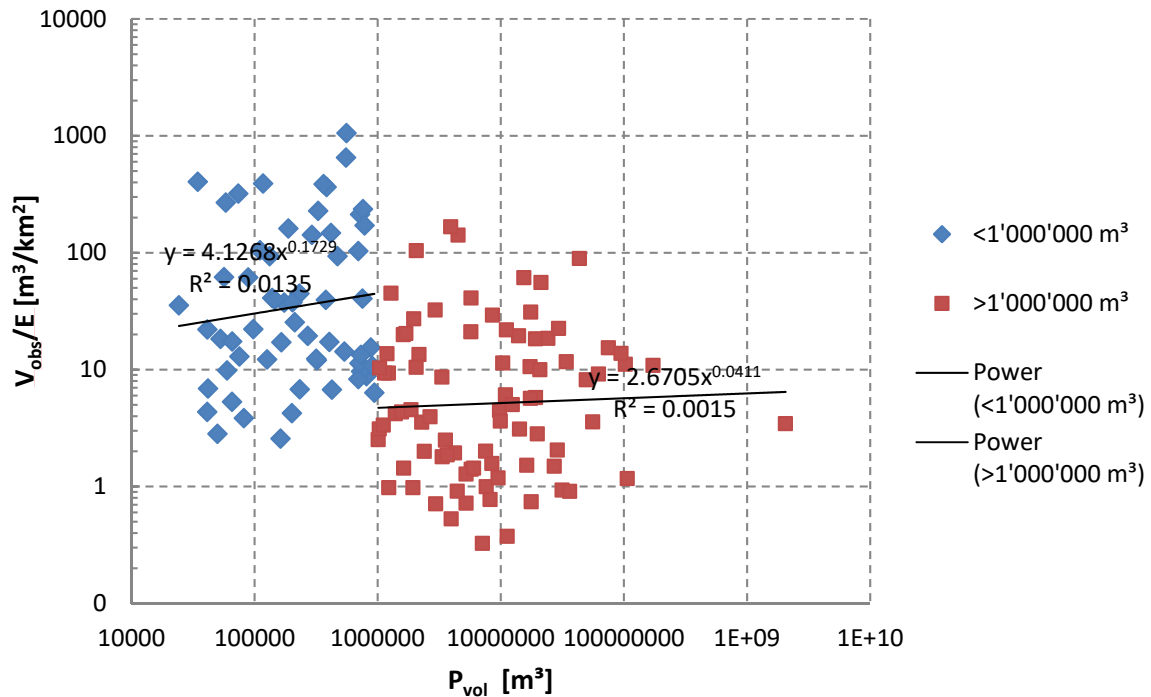


Abbildung 26: Scatterplots der spezifischen Schwemmh Holzmenge in Abhängigkeit des gesamten Niederschlagsvolumens, unterteilt nach Werten für  $P_{vol}$  grösser bzw. kleiner als  $1'000'000 \text{ m}^3$ . Kombo-Auslöser (z.B. [D,S]) wird hier nicht abgebildet.

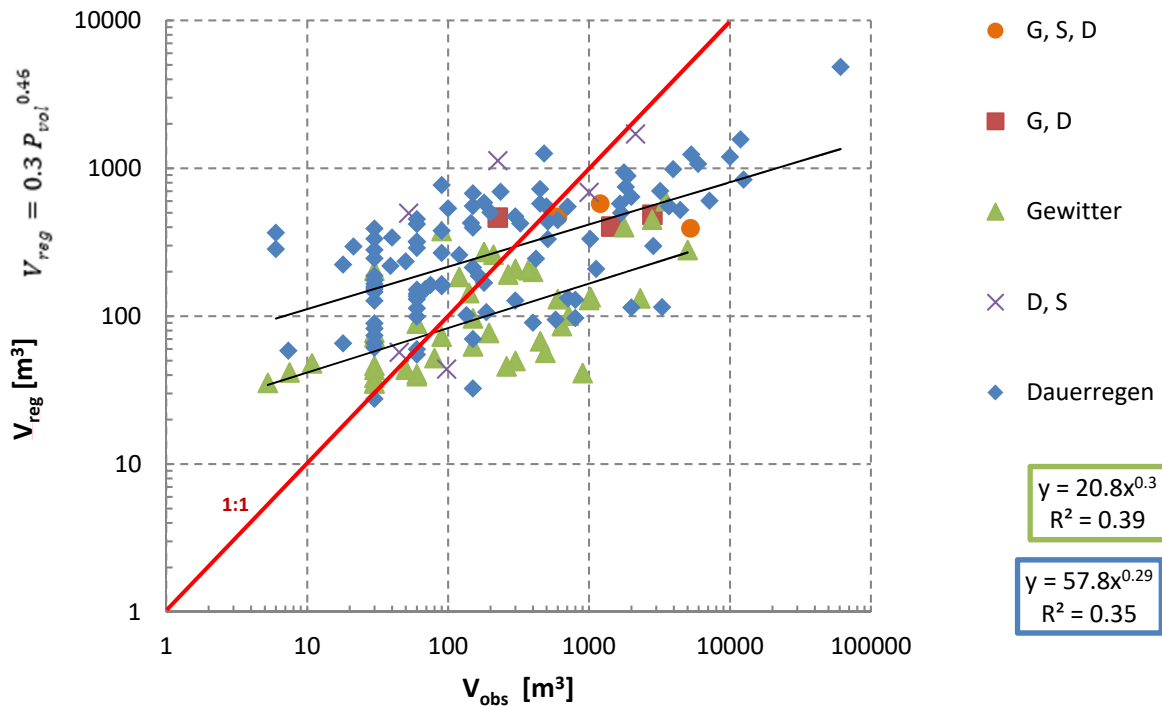


Abbildung 27: Vergleich der beobachteten Schwemmholzmengen klassiert nach Niederschlagstypen (D= Dauerregen; G= Gewitter; S= Schneeschmelze) mit den modellierten Schwemmholzmengen gemäss Gl. (8).

### 3.6.3 Ereignisdauer

Eine Studie zum Hochwasser vom August 2005 hat gezeigt, dass die Schwemmholzfrachten während dieses Ereignisses rund fünfmal grösser waren im Vergleich zu früheren Ereignissen mit vergleichbarer Wiederkehrperiode (Abbildung 28; Steeb et al., 2017). Dies zeigt, dass die Jährlichkeit eines Hochwasserereignisses allein basierend auf der Abflussspitze nicht für eine Beurteilung der Schwemmholzdynamik ausreicht. Neben der Abflussspitze ist auch die Dauer des Hochwassers von grosser Bedeutung. Gleichung (9)  $V_{reg} = 0.4 Q_{max}^{0.46} V_W^{0.33}$  widerspiegelt im Prinzip eine solche Abhängigkeit. Bekanntermassen besteht eine ähnliche Abhängigkeit beim fluvialen Geschiebetransport, und bei der Bildung von Murgängen sind analog die Intensität und die Dauer des Niederschlages von Bedeutung. Das Hochwasser 2005 wurde von Niederschlägen ausgelöst, die verbreitet drei Tage lang andauerten, und entsprechend waren die Abflüsse über einen längeren Zeitraum sehr hoch, was schliesslich zu den ausserordentlich grossen Schwemmholzfrachten führte. Da alle wichtigen Eintragsprozesse von Schwemmholz stark von der geomorphologischen Aktivität bzw. von Sedimenttransportprozessen abhängen, ist es nicht erstaunlich, dass die Regressionsgleichungen (5) und (10) mitunter die besten statistischen Bewertungen aufweisen (Tabelle 1 und 2).

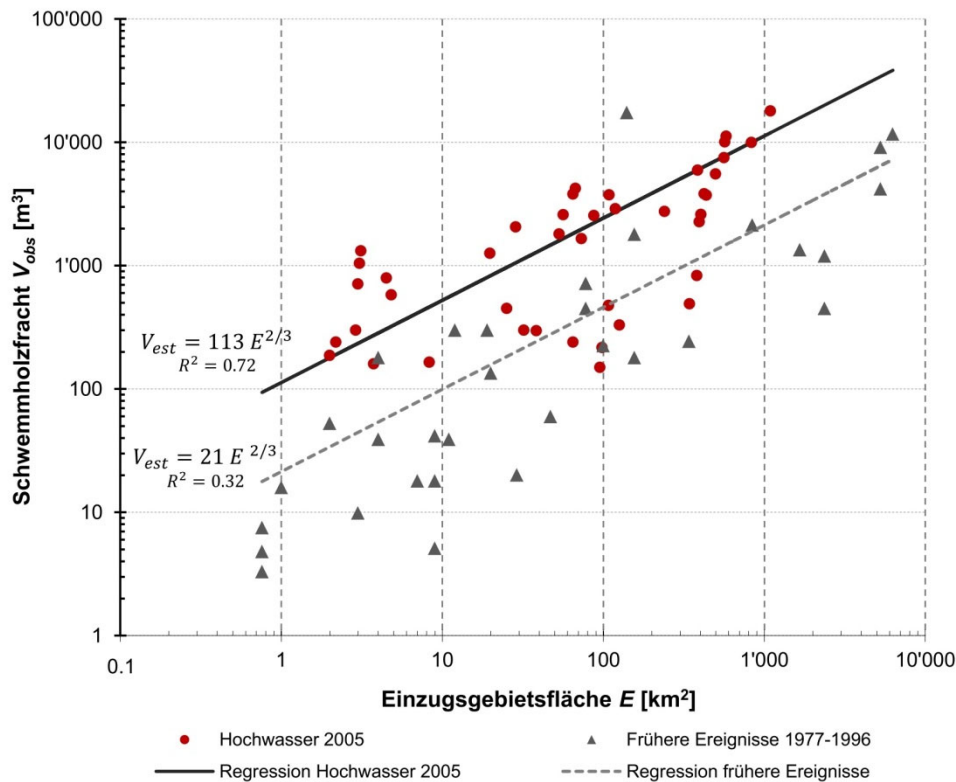


Abbildung 28: Schwemmholzfrachten des Hochwassers vom August 2005 in ausgewählten Einzugsgebieten verschiedener Größe (rote Punkte) und Vergleich mit früheren Ereignissen (graue Punkte; adaptiert aus Steeb et al., 2017).

### 3.6.4 Räumliche Skaleneffekte (Einzugsgebietsgröße)

Die spezifische Schwemmholzfracht nimmt mit zunehmender Einzugsgebietsgröße ab (Abbildung 29). Dies hat verschiedene Gründe:

Einerseits steigt das kumulative Eintragsvolumen von Schwemmholz langsamer an als die Einzugsgebietsgröße. Je grösser ein Einzugsgebiet desto weniger wahrscheinlich ist das Eintreten von Rutschungen und Murgänge pro Flächeneinheit (welche grosse Mengen an SH liefern können). Gründe dafür sind (i) dass es mit zunehmender Fläche immer unwahrscheinlicher wird, extreme (auslösende) Niederschlagsbedingungen auf dem gesamten Gebiet zu haben; und (ii) dass das mittlere Relief mit zunehmender Gebietsgröße abnimmt (verhältnismässig weniger steile Hänge).

Zudem ist bei grossen Einzugsgebieten wahrscheinlich, dass mobilisiertes Schwemmholz bereits weiter flussaufwärts abgelagert wird. Dies weil es tendenziell mehr künstliche Hindernisse wie Brücken oder Wehre hat, aber auch da die natürlichen morphologischen Bedingungen das SH aufhalten können (z.B. durch stabilere Ufervegetation im oder nahe am Gerinne).

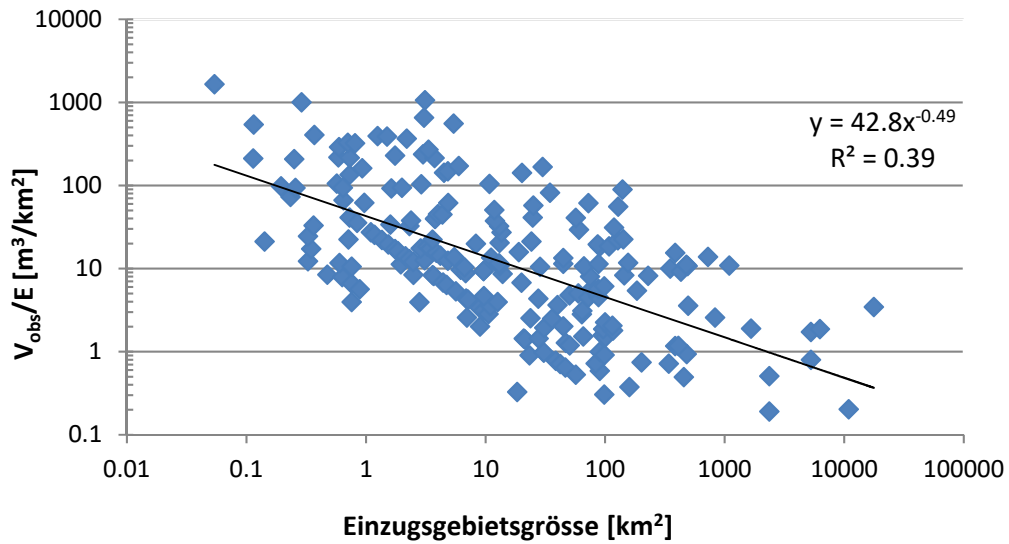


Abbildung 29: Vergleich der spezifischen Schwemmholzmenge mit der Einzugsgebietsgröße.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass die absolute Schwemmholzmenge zwar mit zunehmender Einzugsgebietsgröße steigt (Abbildung 30), jedoch sind Wildbäche bis 25 km<sup>2</sup> die effektivere Schwemmholzlieferanten, wenn das spezifische SH-Volumen betrachtet wird (Abbildung 31).

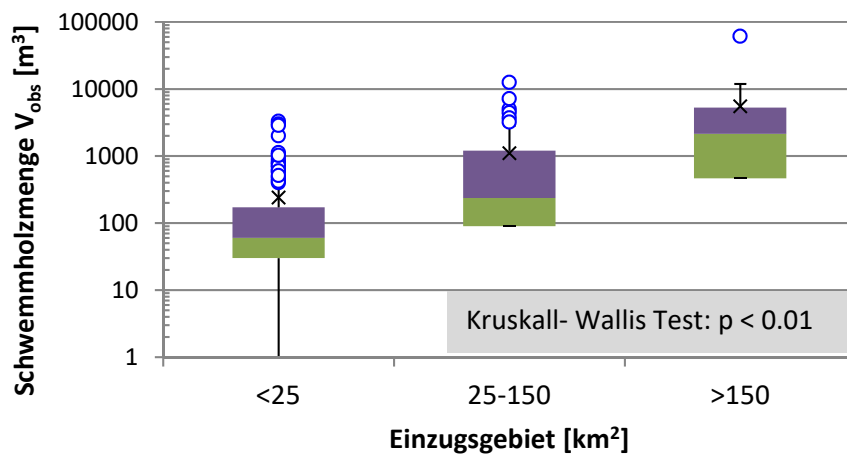


Abbildung 30: Größenklassen Einzugsgebietsfläche versus Schwemmholzmenge.

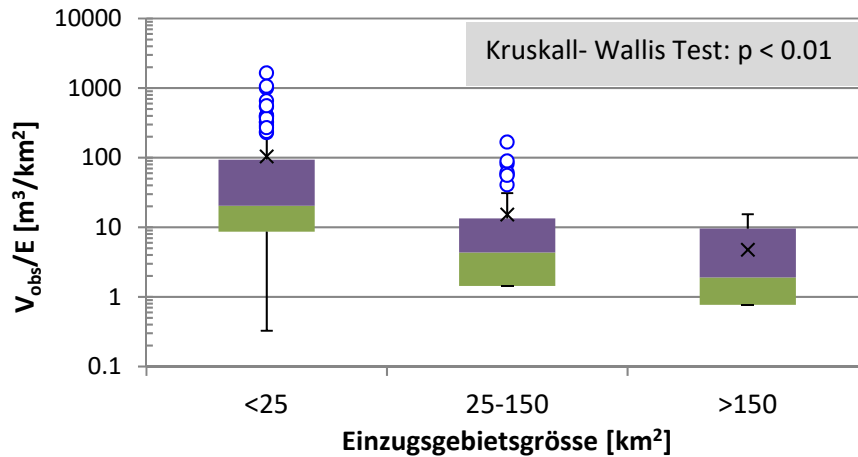


Abbildung 31: Größenklassen Einzugsgebietsfläche versus spezifische Schwemmh Holzmenge.

Sehr ähnlich verhält es sich auch mit der Feststoff- bzw. Geschiebefracht (negative Korrelation zw.  $F/E$  vs.  $E$ ). Schwemmh Holzfracht wie auch Feststofffracht sind häufig stark dominiert von episodischen, räumlich konzentrierten Einzelprozessen, welche eine grosse Aktivität auf begrenzter Fläche (z.B. in Wildbäche) bewirken. Die räumlich gemittelte Häufigkeit nimmt dabei mit zunehmender Einzugsgebietsfläche ab. Bei der Feststofffracht nimmt das Verhältnis  $F/E$  mit zunehmender Gebietsgröße ab, da es aufgrund abnehmender mittlerer Neigung zu weniger Erosionsprozessen im und entlang des Gerinnes kommt.

### 3.6.5 Jährlichkeit der Ereignisse

Wo möglich, wurde die Jährlichkeit der Schwemmh Holzereignisse abgeschätzt, einerseits anhand des Spitzenabflusses (erste Priorität) andererseits anhand der Niederschlagsmenge (zweite Priorität). Abbildung 32 zeigt, wie die spezifische Schwemmh Holzmenge mit der entsprechenden Jährlichkeit ansteigt. Dieser Trend ist jedoch nicht sehr ausgeprägt, was darauf hindeutet, dass andere Faktoren (vgl. Kap. 2.2) beim Schwemmh Holzeintrag ebenfalls eine wichtige Rolle spielen.

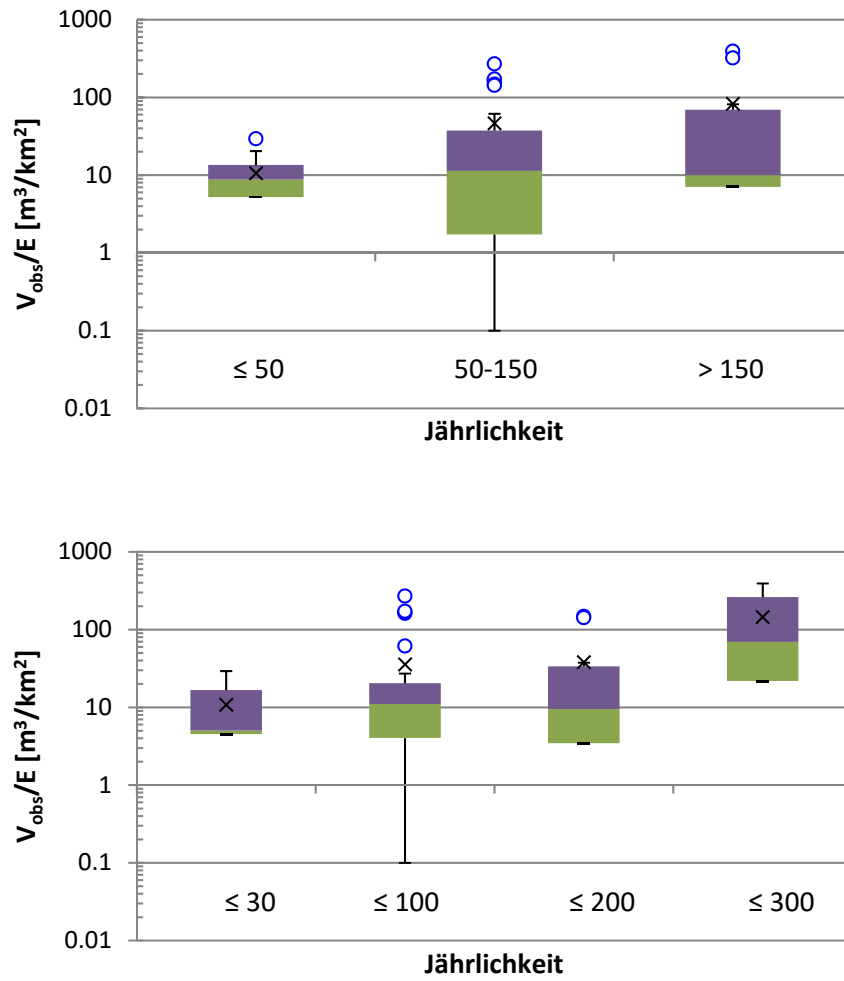


Abbildung 32: Spezifische Schwemmholzfracht im Vergleich zur Jährlichkeit des Abfluss- (oben) und Niederschlagsereignisses (unten).

### 3.6.6 Vegetationseinfluss

Weiter wurde der Einfluss vegetationspezifischer Faktoren auf den Schwemmhölzeintrag untersucht. Mithilfe der Daten aus dem Schweizerischen Landesforstinventar LFI (WSL, 2016) konnte der Anteil Nadelholz bzw. Anteil Totholz auf der Waldfläche der untersuchten Einzugsgebiete eruiert werden. Dabei lässt sich jedoch kein klarer Trend in Abhängigkeit zur spezifischen Schwemmhölzfracht herleiten (Abbildung 33 & Abbildung 34).

Köchli & Waldner (2005) kommen zu ähnlichen Resultaten, wonach beim August Hochwasser 2005 überwiegend frisches Holz eingetragen wurde. Mit dieser Studie konnte die Annahme entkräftet werden, dass ein Grossteil des mobilisierten Schwemmhölzes vom Hochwasser 2005 aus liegen gelassenem Lothar-Sturmholz von 1999 bestehe.

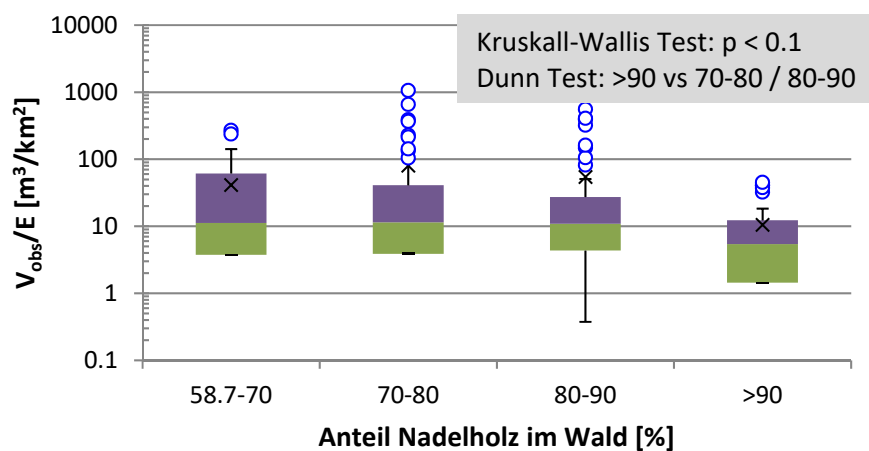


Abbildung 33: Spezifische Schwemmhölzfracht im Vergleich zum Anteil Nadelholz in den Waldflächen des untersuchten Einzugsgebiets.

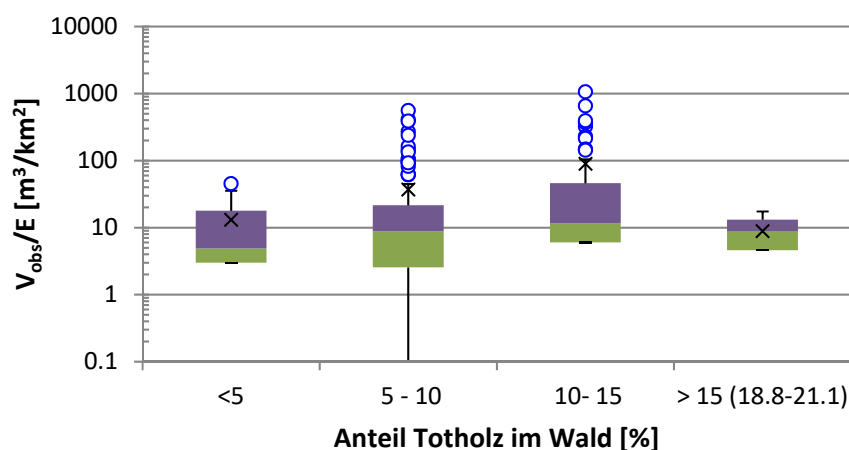


Abbildung 34: Spezifische Schwemmhölzfracht im Vergleich zum Anteil Totholz in den Waldflächen des untersuchten Einzugsgebiets.

## 4 Interpretation der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

### Aussagekraft der empirischen Schätzformeln

Die empirischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Schwemmh Holzfracht von diversen Faktoren abhängig ist. Schwemmholzeintrag steht am Ende einer langen Prozesskette, weshalb die quantitative Abschätzung der Schwemmh Holzfracht generell mit entsprechender Unsicherheit behaftet ist und die empirischen Gleichungen grundsätzlich eine grosse Streuung bzw. Variabilität aufweisen. Jedoch sind klare Trends über mehrere Grössenordnungen ersichtlich, welche sich am besten mit Potenzfunktionen abbilden lassen. Schätzformeln für verschiedene Perzentilwerte erlauben die Abschätzung einer Bandbreite möglicher Schwemmh Holzfrachten. Diese Varianten können helfen, die Unsicherheit in der Quantifizierung der Holzmenge besser beurteilen zu können.

### Vergleich mit früheren Schätzformeln

Mit der in WoodFlow erarbeiteten umfangreichen Schwemmh Holzdatenbank konnte die statistische Aussagekraft der Schätzformeln aufgrund der viel grösseren Datengrundlage im Vergleich zu Rickenmann (1997) deutlich erhöht werden. Der allgemeine Trend der Rickenmann-Formeln konnte bestätigt werden; sie liegen innerhalb der hier definierten Perzentil-Bandbreiten (10-90%). Neu werden auch Worst-Case-Szenarien definiert neue Kontrollparameter (Einzugsgebiets-Charakteristika vs. ereignisabhängige Faktoren) eingeführt.

Die hier vorgestellten empirischen Gleichungen schätzen die Schwemmh Holzfracht in Festmetern ab, während die Formeln von Rickenmann (1997) in Lockervolumen angegeben sind. Für die Umrechnung von Lockervolumen in Festvolumen eignet sich in diesem Fall ein Auflockerungsfaktor  $a = 3$ . Zu beachten ist auch, dass gewisse Gleichungen von Rickenmann (1997) wie im vorliegenden Bericht die Schwemmh Holzfracht beschreiben, andere hingegen schätzen das potenziell mobilisierbare (Tot-) Holz ab, das im Gerinne oder in bachnahen Bereichen zur Mobilisierung bereitliegt. Potenzielle Schwemmh Holz mengen können alternativ auch mit dem empirischen GIS-Ansatz (EGA) räumlich explizit, d.h. durch Identifizierung von potenziellen Eintragsflächen, abgeschätzt werden (Steeb et al., 2019).

### Erkenntnisse HW05

Eine Studie zum Hochwasser vom August 2005 hat gezeigt, dass die Schwemmh Holzfrachten während dieses Ereignisses rund fünfmal grösser waren im Vergleich zu früheren Ereignissen mit vergleichbarer Wiederkehrperiode (Steeb et al., 2017). Dies zeigt, dass die Jährlichkeit eines Hochwasserereignisses allein basierend auf der Abflussspitze nicht für eine Beurteilung des Schwemmh Holzaufkommens ausreicht. Neben der Abflussspitze ist auch die Dauer des Hochwassers von grosser Bedeutung. Gleichung (9) widerspiegelt im Prinzip eine solche Abhängigkeit. Bekanntermassen besteht eine ähnliche Abhängigkeit auch beim fluvialen Geschiebetransport, und bei der Bildung von Murgängen sind analog die Intensität und die Dauer des Niederschlages von Bedeutung.

### **Vergleich mit dem empirischen GIS-Ansatz**

Vergleicht man die Resultate der empirischen Schätzformeln mit dem empirischen GIS-Ansatz (EGA), so kann man feststellen, dass der EGA die Holzmenge tendenziell überschätzt, während die empirischen Schätzformeln die Holz mengen eher unterschätzen – insbesondere bei Schwemmh Holz m enge n  $V_{obs} \geq 500 \text{ m}^3$  (Steeb et al., 2019). Für eine erste grobe Abschätzung der Schwemmh Holz fracht bieten die empirischen Schätzformeln ein schnelleres Vorgehen. Ist man jedoch auch an der räumlichen Verteilung potenzieller Eintragsflächen interessiert, so eignet sich die Anwendung des EGA.

### **Verwendung Praxis**

Die hier vorgestellten empirischen Gleichungen nutzen für die Abschätzung der Schwemmh Holz fracht verschiedene Kontrollvariablen, die mit der beobachteten Schwemmh Holz m enge korrelieren und ergeben einen pauschalen Schätzwert für ein vorab definiertes Untersuchungsgebiet. Die empirischen Schätzformeln sind ein einfaches und schnelles Hilfsmittel, um eine erste Abschätzung der Größenordnung der Schwemmh Holz fracht in einem Untersuchungsgebiet vorzunehmen. Aus praktischer Sicht können solche Abschätzverfahren als Grundlage für wasserbauliche und/oder waldbauliche Massnahmen dienen (vgl. Anhang A3 des Syntheseberichts WoodFlow), beispielsweise als Hilfe für die Dimensionierung von Rückhaltestrukturen. Die hier vorgestellten Ansätze können zudem auch im Zusammenhang mit der Rekonstruktion vergangener Hochwasserereignisse (Ereignisanalysen) angewendet und mit beobachteten Schwemmh Holz frachten verglichen werden.

## 5 Literatur

- BAFU. (2017). *Datenbank Solid - Geschiebemessnetz der Schweiz. Hintergrund und Fakten*.
- BAFU. (2019). *Schwemmholz in Fließgewässern. Ein praxisorientiertes Forschungsprojekt. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1910, 100 p.*
- Bezzola, G. R., & Hegg, C. (2007). *Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 - Prozesse, Schäden und erste Einordnung*.
- Bezzola, G. R., & Hegg, C. (2008). *Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2 - Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen*.
- Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2002). Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach (2nd ed). In *Ecological Modelling* (Vol. 172). <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.11.004>
- Eberhard, A., Diezig, R., Kahn, C., & Cosandey, C. (2007). Hydrologie Fließgewässer. In G. R. Bezzola & C. Hegg (Eds.), *Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung*. (pp. 39-70 (in German)). Umwelt-Wissen Nr. 0707, Bundesamt für Umwelt BAFU & Eidg. Forschungsanstalt WSL.
- Ginzler, C., & Hobi, M. L. (2016). Das aktuelle Vegetationshöhenmodell der Schweiz: spezifische Anwendungen im Waldbereich. *Schweizerische Zeitschrift Für Forstwesen*, 167(3), 128–135. <https://doi.org/10.3188/szf.2016.0128>
- Kan, C. (1995). *Die höchsten in der Schweiz beobachteten Abflussmengen bis 1990*. Universität Bern.
- Köchli, D., & Waldner, P. (2005). August-Hochwasser 2005: Schwemmholz war überwiegend frisch. *Informationsblatt Forschungsbereich Wald*, 21, 1–8.
- Lacombe, G., Douangsavanh, S., Vogel, R. M., McCartney, M., Chemin, Y., Rebelo, L., & Sotoukee, T. (2014). Journal of Hydrology : Regional Studies Multivariate power-law models for streamflow prediction in the Mekong Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2, 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.08.002>
- Lange, D., & Bezzola, G. R. (2006). *Schwemmholz. Probleme und Lösungsansätze. Mitteilungen 188*. (H. E. Minor (ed.); Mitteilung). Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETHZ.
- Losey, S., & Wehrli, A. (2013). *Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald*.
- Melton, M. A. (1965). The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in Southern Arizona. *The Journal of Geology*, 73(1), 1–38. <http://www.jstor.org/stable/30066379>
- MeteoSwiss. (2019). *Daily Precipitation (final analysis): RhiresD*. [https://www.meteoswiss.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publikationen/produkt/raeumliche-daten-niederschlag/doc/ProdDoc\\_RhiresD.pdf](https://www.meteoswiss.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publikationen/produkt/raeumliche-daten-niederschlag/doc/ProdDoc_RhiresD.pdf)
- Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Naef, F. (1993). Der Abflusskoeffizient: einfach und praktisch? In *Zürcher Geographische Schriften* (Vol. 53). Verlag Geographisches Institut ETH Zürich.
- Rickenmann, D. (1997). Schwemmholz und Hochwasser. *Wasser, Energie, Luft*, 89, 115-119 (in

German).

- Rickenmann, D. (2014). Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen. In *WSL Berichte* (Vol. 9).
- Rickenmann, D., & Koschni, A. (2010). Sediment loads due to fluvial transport and debris flows during the 2005 flood events in Switzerland. *Hydrological Processes*, 24(8), 993–1007. <https://doi.org/10.1002/hyp.7536>
- Rickli, C., & Forster, F. (1997). Einfluss verschiedener Standortseigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. *Schweizerische Zeitschrift Für Forstwesen*, 148(5), 367–385.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48, 9–26.
- Scheidl, C., & Rickenmann, D. (2010). Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(2), 157–173. <https://doi.org/10.1002/esp.1897>
- Smith, L. I. (2002). *A tutorial on Principal Components Analysis*.
- Steeb, N., Badoux, A., Rickli, C., & Rickenmann, D. (2019). *Detailbericht zum Forschungsprojekt WoodFlow: Empirischer GIS-Ansatz*.
- 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.10.011>
- StorMe. (2006). *Erhebungsformulare zur Dokumentation von Naturereignissen (STORME 2.0)*. Bern, 7 pp. (in German) (p. 7). Bundesamt für Umwelt (BAFU).
- Symonds, M. R. E., & Moussalli, A. (2011). A brief guide to model selection, multimodel inference and model averaging in behavioural ecology using Akaike's information criterion. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 65(1), 13–21. <https://doi.org/10.1007/s00265-010-1037-6>
- Uchiogi, T., Shima, J., Tajima, H., & Ishikawa, Y. (1996). Design Methods for Wood-Debris Entrapment. *Proceedings of the INTERPRAEVENT Conference, Vol. 5*, 279–288.
- Wagenmakers, E.-J., & Farrell, S. (2004). AIC model selection using Akaike weights. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11(1), 192–196. <https://doi.org/10.3758/BF03206482>
- 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*.
- Weingartner, R. (1999). Regionalhydrologische Analysen - Grundlagen und Anwendungen. In *Beiträge zur Hydrologie der Schweiz* (Issue 37).
- Wilford, D., Sakals, M., & Innes, J. (2005). Forest management on fans: Hydrogeomorphic hazards and general prescriptions. In *Land Management Handbook 57*. B.C. Ministry of Forests, 42 pp. <http://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/Lmh/Lmh57.htm>
- WSL. (2016). *Schweizerisches Landesforstinventar LFI. Daten der Erhebungen 2004/06 (LFI3) und 2009/13 (LFI4)*. Markus Huber 06.06.2016. Eidg. Forschungsanstalt WSL.

## 6 Anhang

### A. Scatterplots der Schätzformeln

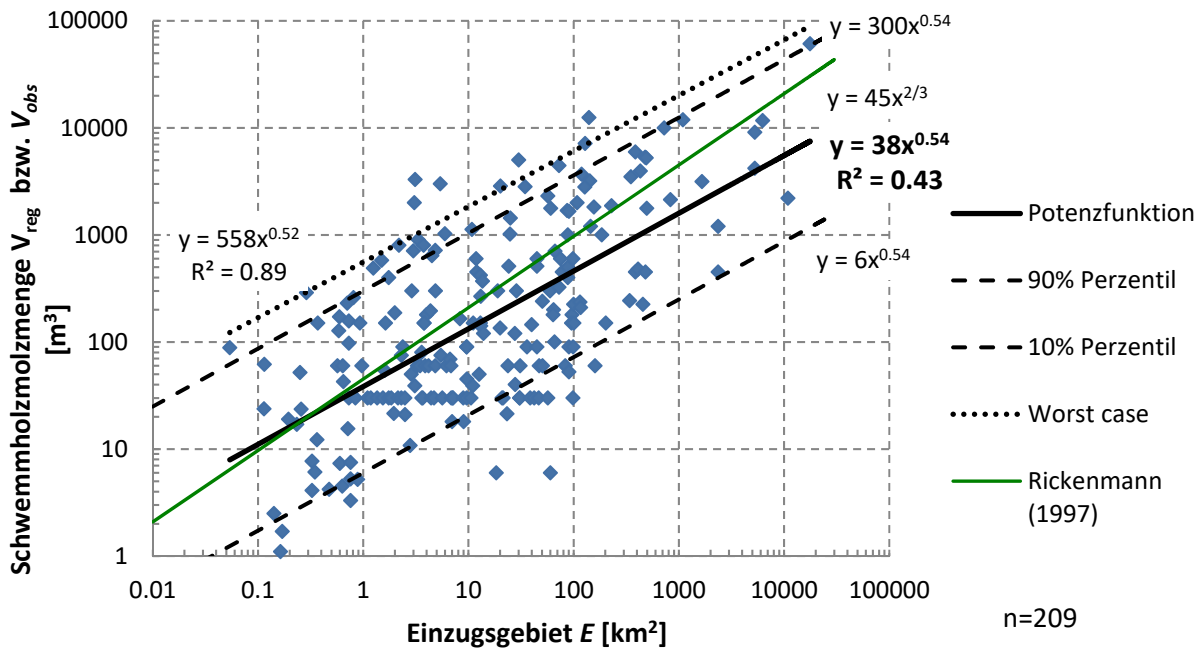


Abbildung 35: Gleichung (1) – Schwemmhölmengen  $V_{obs}$  versus Einzugsgebietsfläche.

Im Vergleich zur älteren Schätzformel nach Rickenmann (1997) hat die neue Gleichung (1) in Abbildung 35 einen kleineren Exponenten, d.h. die Regression ist weniger steil. Die Formel von Rickenmann (1997) liegt jedoch innerhalb der Umhüllenden (10%- bzw. 90%-Perzentil).

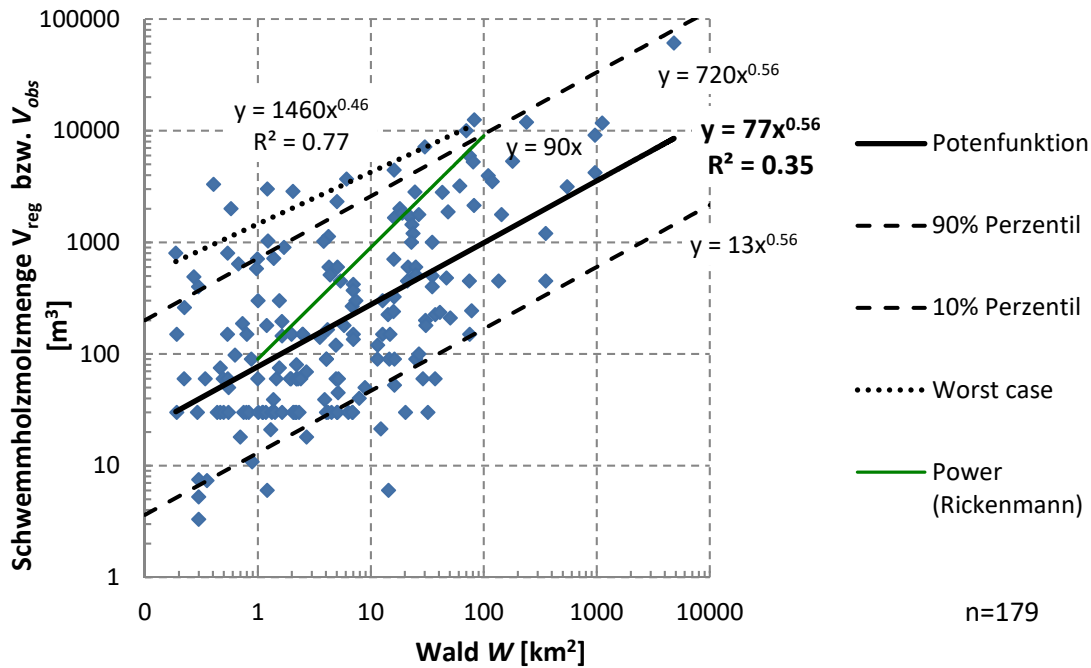


Abbildung 36: Gleichung (2) – Schwemmholzmengen  $V_{obs}$  versus Waldfläche.

Die auf der Waldfläche basierenden Schätzformel nach Rickenmann (1997) (gültig bis  $W \leq 100$ ) ist beinahe doppelt so steil wie die neu berechnete Gleichung (2) mit grösserer Datengrundlage (Abbildung 36). Dies liegt daran, dass die ältere Formel in diesem Fall das Schwemmholzpotenzial beschreibt. Das Schwemmholzpotenzial wird von Rickenmann (1997) beschrieben als die Menge des potenziell mobilisierbaren Totholzes, das in den Gerinnen oder in bachnahen Zonen herumliegt. Im Gegensatz dazu beschreiben die hier neu präsentierten Schätzformeln die effektive Schwemmholzfracht anhand von eingetragenen oder abgelagerten Holzmassen. Man sieht in der Grafik, dass diverse Datenpunkte oberhalb der Rickenmann-Formel liegen. Dies weil neben Totholz auch Frischholz (Rekrutierung lebender Bäume) berücksichtigt wird und Rekrutierungsprozesse auch ausserhalb der gewässernahen Zone (z.B. durch Rutschungen) integriert sind.

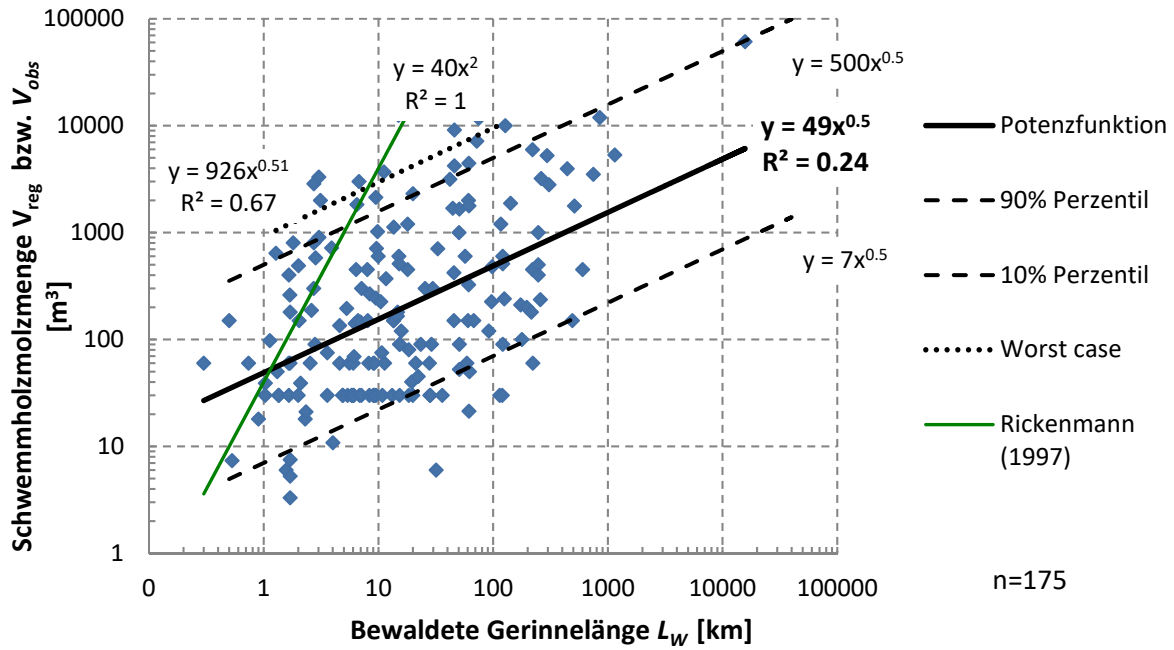


Abbildung 37: Gleichung (3) – Schwemmh Holzmenge  $V_{obs}$  versus bewaldete Gerinnelänge.

In diesem Fall ist die Schätzformel zur bewaldeten Gerinnelänge nach Rickenmann (1997) (gültig bis  $L_w < 20$ ) viermal so steil wie die neu berechnete Formel mit grösserer Datengrundlage (Abbildung 37). Dies liegt wiederum daran, dass es sich bei der Rickenmann-Gleichung um das Totholzpotenzial handelt.

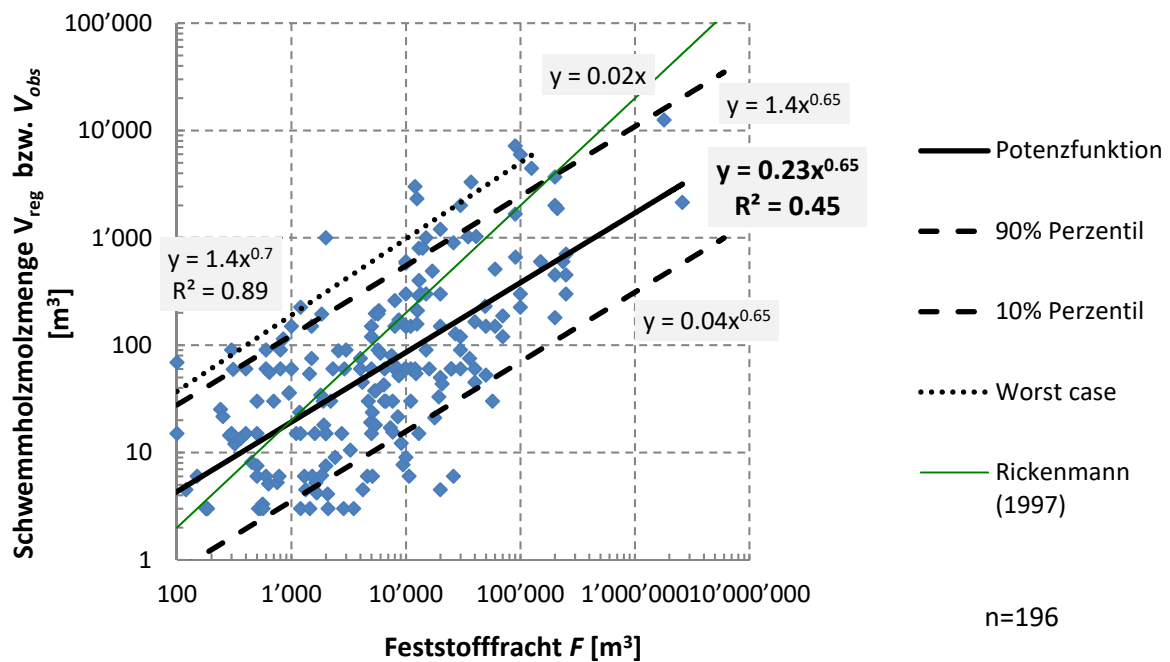


Abbildung 38: Gleichung (5) – Schwemmh Holzmenge  $V_{obs}$  versus Feststofffracht.

Im Vergleich zur älteren Schätzformel nach Rickenmann (1997) hat die neue Gleichung auf Basis der Feststofffracht einen kleineren Exponenten, d.h. die Regression ist weniger steil (Abbildung 38). Rickenmanns Formel liegt jedoch wiederum innerhalb der Umhüllenden (10%- bzw. 90%-Perzentil).

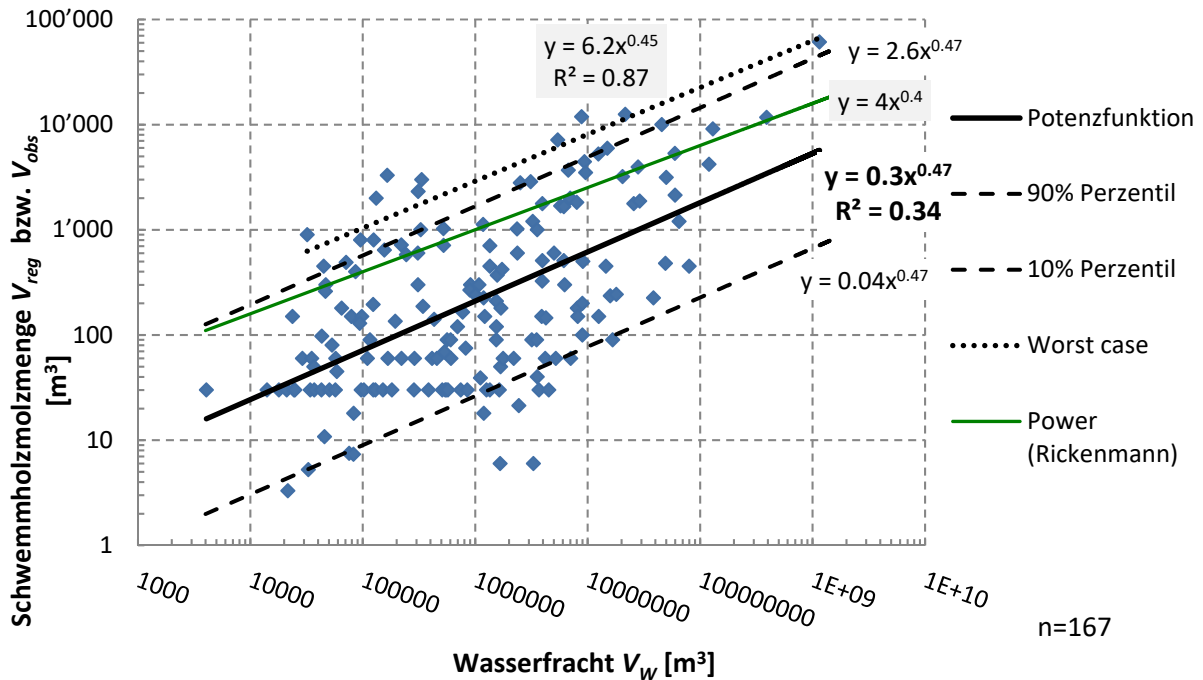


Abbildung 39: Gleichung (6) – Schwemmholzmenge  $V_{obs}$  versus Wasserfracht.

In Bezug auf die Wasserfracht liegt die frühere Schätzformel nach Rickenmann (1997) klar über der neuen allgemeinen Trendlinie und beschreibt eher das 90%-Perzentil (Abbildung 39). Dies legt vor allem daran, dass die Datengrundlage bei Rickenmann (1997) relativ klein ist ( $n = 18$ ) und meist nur grosse Ereignisse bzgl. Schwemmholzfrachten beinhaltet.

Die restlichen Schätzformeln (Gl. 4, 7, 8, 9, 10; siehe Tabelle 1) wurden das erste Mal aufgestellt, d.h. gibt es keinen Vergleich zu früheren Gleichungen.

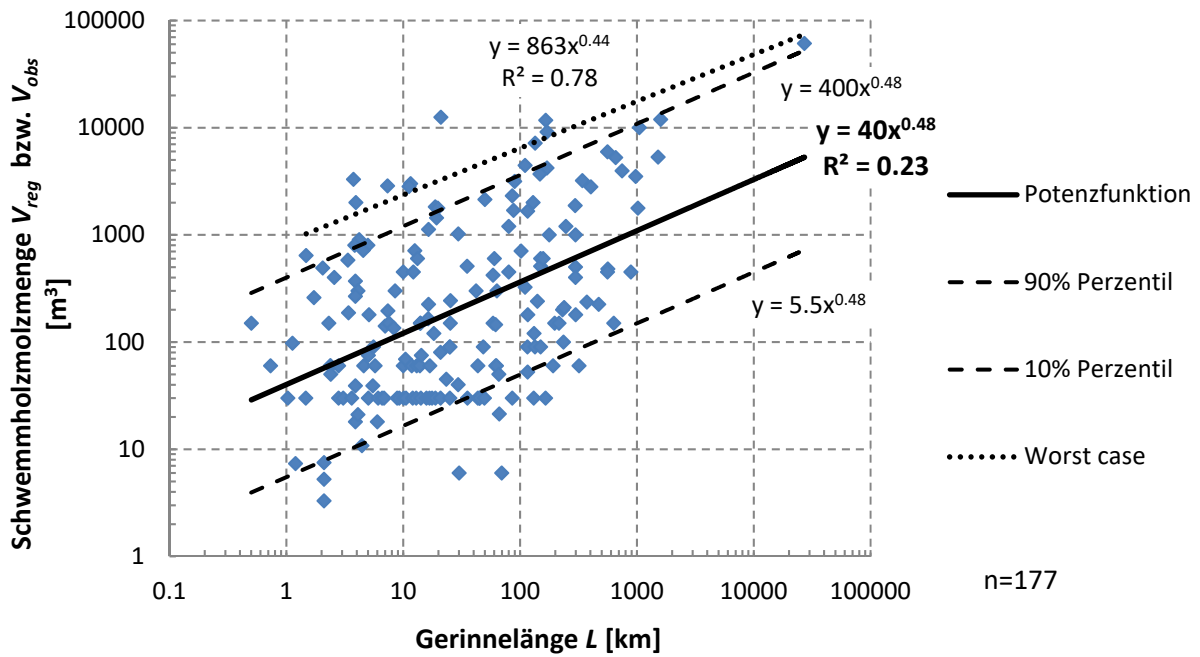


Abbildung 40: Gleichung (4) – Schwemmh Holzmenge  $V_{obs}$  versus Gerinnelänge.

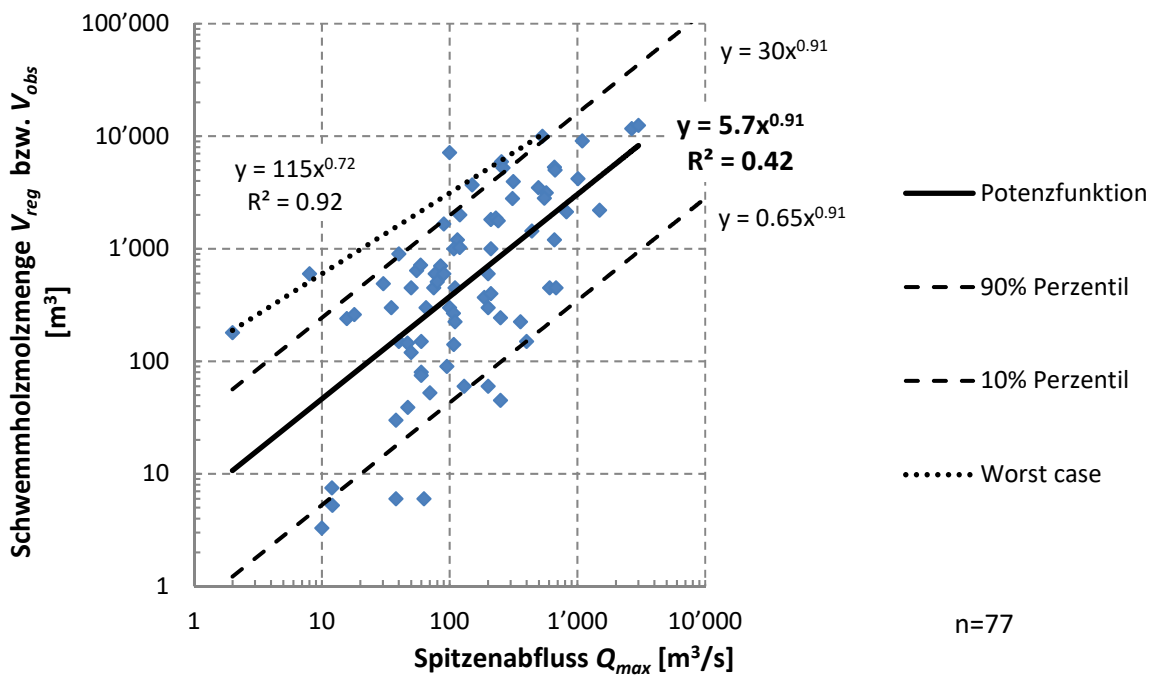


Abbildung 41: Gleichung (7) – Schwemmh Holzmenge  $V_{obs}$  versus Spitzenabfluss.

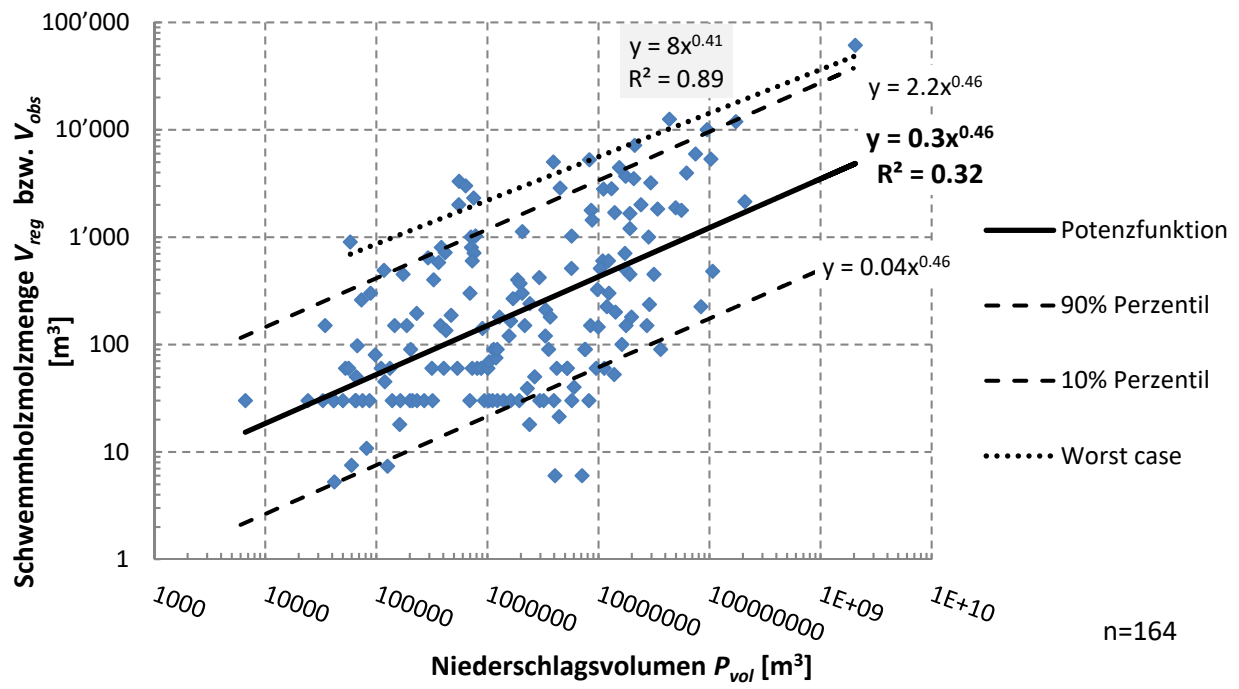


Abbildung 42: Gleichung (8) – Schwemmhölmengen  $V_{obs}$  versus Niederschlagsvolumen.

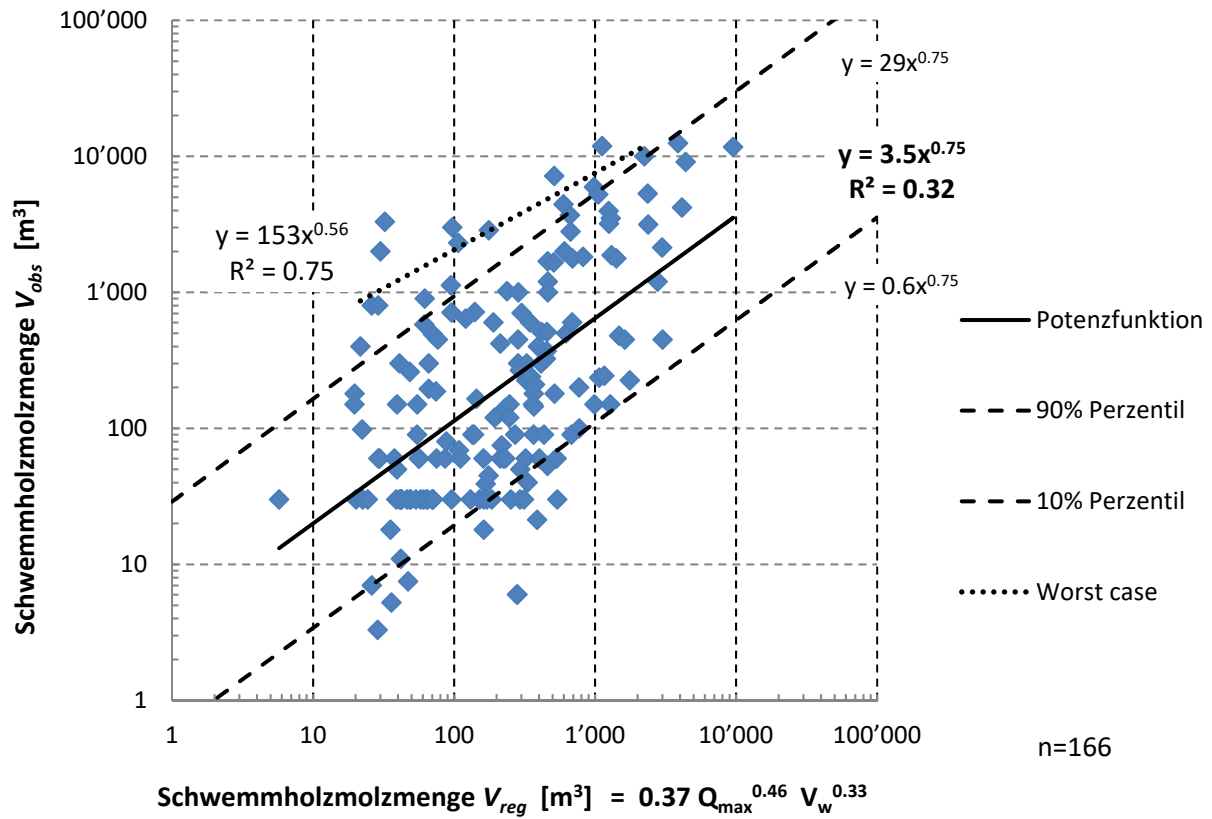


Abbildung 43: Gleichung (9) – Schwemmholzmengen  $V_{obs}$  versus Spitzenabfluss und Wasserfracht.

Umrechnung:

**90%-Perzentil**

$$y = 29 * 0.37^{0.75} * Qp^{0.45*0.75} * Vw^{0.33*0.75}$$

$$y = 14 * Qmax^{0.34} * Vw^{0.25}$$

**10%-Perzentil**

$$y = 0.6 * 0.37^{0.75} * Qp^{0.46*0.75} * Vw^{0.33*0.75}$$

$$y = 0.3 * Qmax^{0.34} * Vw^{0.25}$$

**Worst Case**

$$y = 153 * 0.37^{0.56} * Qp^{0.46*0.56} * Vw^{0.33*0.56}$$

$$y = 88 * Qmax^{0.26} * Vw^{0.18}$$

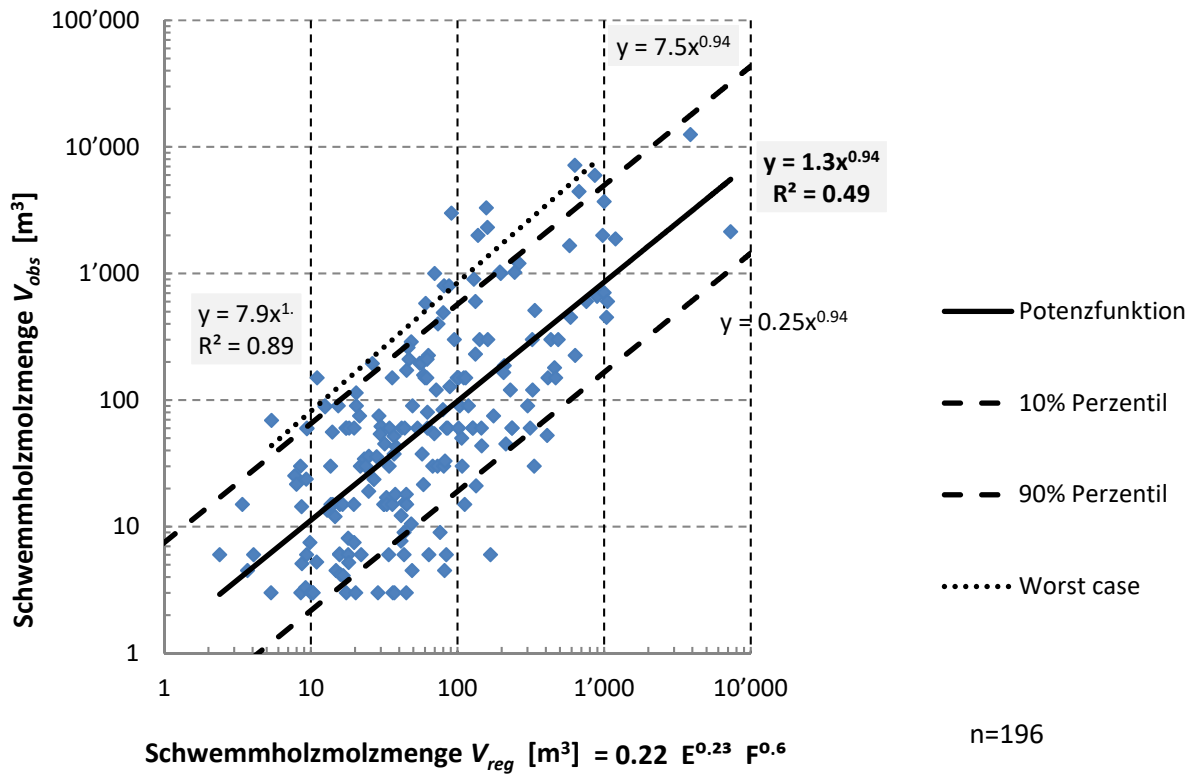


Abbildung 44: Gleichung (10) – Schwemmholzmengen  $V_{obs}$  versus Einzugsgebietsgrösse und Feststofffracht.

Umrechnung:

**90%-Perzentil**

$$y = 7.5 * 0.22^{0.9} * E^{0.23*0.9} * F^{0.6*0.9}$$

$$y = 1.9 * E^{0.2} * F^{0.54}$$

**10%-Perzentil**

$$y = 0.25 * 0.22^{0.9} * E^{0.23*0.9} * F^{0.6*0.9}$$

$$y = 0.06 * E^{0.2} * F^{0.54}$$

**Worst Case**

$$y = 7.9 * 0.22^1 * E^{0.23*1} * F^{0.6*1}$$

$$y = 1.76 * E^{0.23} * F^{0.6}$$

## B. Weitere statistische Auswertungen zur Anpassungsgüte der zehn Schätzformeln:

		Faktor		Exponent		Gütemasse (vgl. Kap. 2.6.6)												
		exakt	sim- pel	exakt	simpel	R2	R2_adj	NSE	RMSNE	NRMSD mean	NRMSD range	RMSD mean	Absolute Differenzen  Vobs-Vreg  mean	Überschätzung (Vobs-Vreg < 0) mean	Unterschätzung (Vobs-Vreg > 0) mean	Verhältnis (Vreg/Vobs) mean	AIC	n
Einzugsgebiet E	Gleichung	38.32	38	0.539	0.54	0.43	0.43	0.43	2.28	0.30	0.14	0.66	978	198	1877	1.19	-168	209
	90% Perzentil		300															
	10% Perzentil		6															
	Worst Case	557.7	558	0.518	0.52	0.89												
	Rickenmann		45	0.667				0.35	2.27	0.33	0.15	0.71	1039	746	1553	1.84		59
Wald W	Gleichung	76.95	77	0.555	0.56	0.35	0.34	0.35	0.41	0.29	0.15	0.66	1080	172	2177	1.28	-147.1	179
	90% Perzentil		720															
	10% Perzentil		13															
	Worst Case	1460.2	1460	0.464	0.46	0.77												
	Rickenmann	90		1				-0.12	0.52	0.37	0.20	0.86	5276	6882	892.953	3.15		30
Bewaldete Gerinnelänge L <sub>w</sub>	Gleichung	48.95	49	0.500	0.5	0.24	0.23	0.24	0.44	0.31	0.17	0.71	1178	174	2399	1.2	-117.3	175
	90% Perzentil		500															
	10% Perzentil		7															
	Worst Case		925		0.5	0.67												
	Rickenmann	40		2				-6.41	1.17	0.96	0.52	2.21	1'161'977	1'307'138	745	48.4		30
Gerinnelänge L	Gleichung	40.18	40	0.478	0.48	0.23	0.23	0.23	0.45	0.31	0.17	0.71	1189	174	2391	1.23	-116.3	177
	90% Perzentil		400															
	10% Perzentil		5.5															
	Worst Case	863.1	860	0.437	0.44	0.78												

	Faktor	Exponent		Gütemasse (vgl. Kap. 2.6.6)														
		exakt	sim- pel	exakt	simpel	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	NSE	RMSNE	NRMSD mean	NRMSD range	RMSD mean	Absolute Differenzen  Vobs-Vreg  mean	Überschätzung (Vobs-Vreg < 0) mean	Unterschätzung (Vobs-Vreg > 0) mean	Verhältnis (Vreg/Vobs) mean	AIC	n
Wasserfracht V <sub>w</sub>	Gleichung	0.327	0.3	0.468	0.47	0.34	0.34	0.34	0.44	0.29	0.16	0.67	1180	195	2252	1.13	-131.6	167
	90% Perzentil		2.6															
	10% Perzentil		0.04															
	Worst Case	6.189	6.2	0.445	0.45	0.87												
	Rickenmann	4		0.4				-0.35	0.74	0.41	0.22	0.96	1397	1001	2948	5.36		18
Feststofffracht F	Gleichung	0.218	0.2	0.649	0.65	0.45	0.45	0.45	0.60	0.34	0.17	0.60	325	68	614	1.17	-195.2	196
	90% Perzentil		1.4															
	10% Perzentil		0.04															
	Worst Case	1.387	1.4	0.71	0.7	0.89												
	Rickenmann	0.02		1				0.20	0.72	0.41	0.20	0.72	816	1016	420	2.13		34
Abflussspitze Q <sub>max</sub>	Gleichung	5.697	5.7	0.909	0.91	0.42	0.41	0.42	0.50	0.23	0.17	0.62	1119	438	1658	0.73	-69.08	77
	90% Perzentil		30															
	10% Perzentil		0.65															
	Worst Case	114.5	115	0.718	0.72	0.92												
	Niederschlag P <sub>vol</sub>	0.277	0.3	0.456	0.46	0.32	0.32	0.32	0.41	0.29	0.16	0.66	1113	178	2119	1.12	-133.3	164
Q <sub>max</sub> + V <sub>w</sub>	Gleichung	0.370	0.4		0.46   0.33	0.32	0.32	0.32	0.43	0.29	0.18	0.66	998	17	1029	1.23	-133.8	166
	90% Perzentil		14		0.35   0.25													
	10% Perzentil		0.3		0.35   0.25													
	Worst Case	87.67	88		0.26   0.19	0.75												
	E + F	Gleichung	0.220	0.2		0.23   0.6	0.49	0.48	0.48	0.59	0.33	0.16	0.58	309	198	436	1.07	-208.6
90% Perzentil			1.8		0.22   0.56													
10% Perzentil			0.06		0.22   0.56													
Worst Case		1.74	1.7		0.23   0.61	0.89												

## Legende

Gütemasse nach Moriasi et al. (2007):

- $R^2$  = Bestimmtheitsmass
- $R^2_{adj}$  = adjustiertes Bestimmtheitsmass
- NSE = Nash-Sutcliff Efficiency
- NRMSD = Normalized root mean standard deviation
- RMSD = Root-mean square deviation
- RMSNE = Root-mean square normalized error
- AIC = Akaike Information Criterion
- $n$  = Anzahl Datenpunkte

### C. Akaike weights

Die Auswertung des globalen Regressionsmodells mit allen logarithmierten Variablenkombinationen anhand der Akaike weights  $w_{AIC}$  zeigt, dass die Schwemmh Holzmenge am besten durch die Feststofffracht, Einzugsgebietsgrösse und Abflussspitze erklärt werden kann ( $w_{AIC,F} = 0.7$ ,  $w_{AIC,E} = 0.6$ ,  $w_{AIC,Qmax} = 0.35$ ; Abbildung 45).

Bei die Auswertung des globalen Regressionsmodells mit multiplen Regression zeigt sich kein klarer Trend in den Akaike weights ab.

Model Nr.	(Intercept)	E	F	L	Lw	M	Pvol	Qmax	Vw	W	df	logLik	AICc	delta	weight	
4		1		1							4	-22.3926	54.1646	0.0000	0.0465	
68		1		1					1		5	-21.4835	55.1098	0.9452	0.0290	
7			1		1						4	-22.9306	55.2405	1.0759	0.0271	
132		1		1						1	5	-21.5829	55.3087	1.1441	0.0262	
2		1									3	-24.3424	55.4847	1.3202	0.0240	
19				1			1				4	-23.2014	55.7822	1.6176	0.0207	
66		1							1		4	-23.2812	55.9418	1.7772	0.0191	
259				1							1	4	-23.4691	56.3175	2.1529	0.0158
Sum of Akaike weights		0.600	0.699	0.282	0.227	0.280	0.265	0.354	0.289	0.267						

Abbildung 45: Auswahl der besten Variablenkombinationen aus dem globalen Regressionsmodell anhand der Akaike weights.

## D. Modellierte versus beobachtete Schwemmholzmenge:

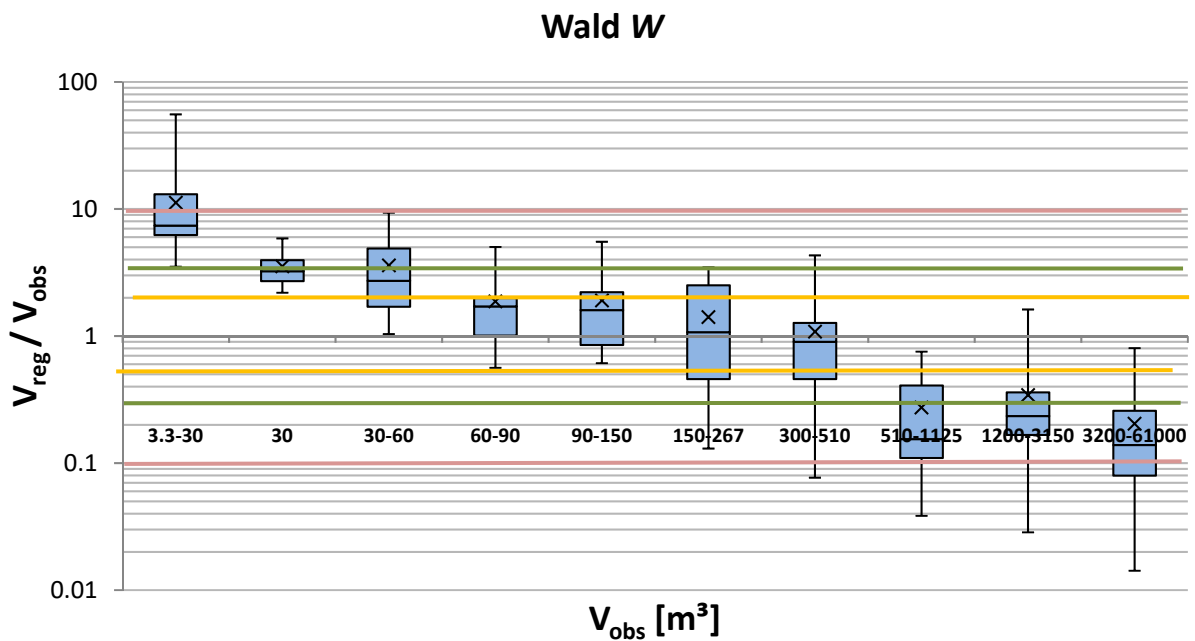


Abbildung 46: Boxplots der Verhältniszerte  $r = V_{reg}/V_{obs}$  am Beispiel von Gleichung (2) – Waldfläche –, aufgetragen gegen die beobachtete Schwemmholzmenge  $V_{obs}$  (X-Achse). Der schwarze Strich innerhalb der blauen Kästen zeigt den Median, das schwarze Kreuz den jeweiligen Mittelwert.

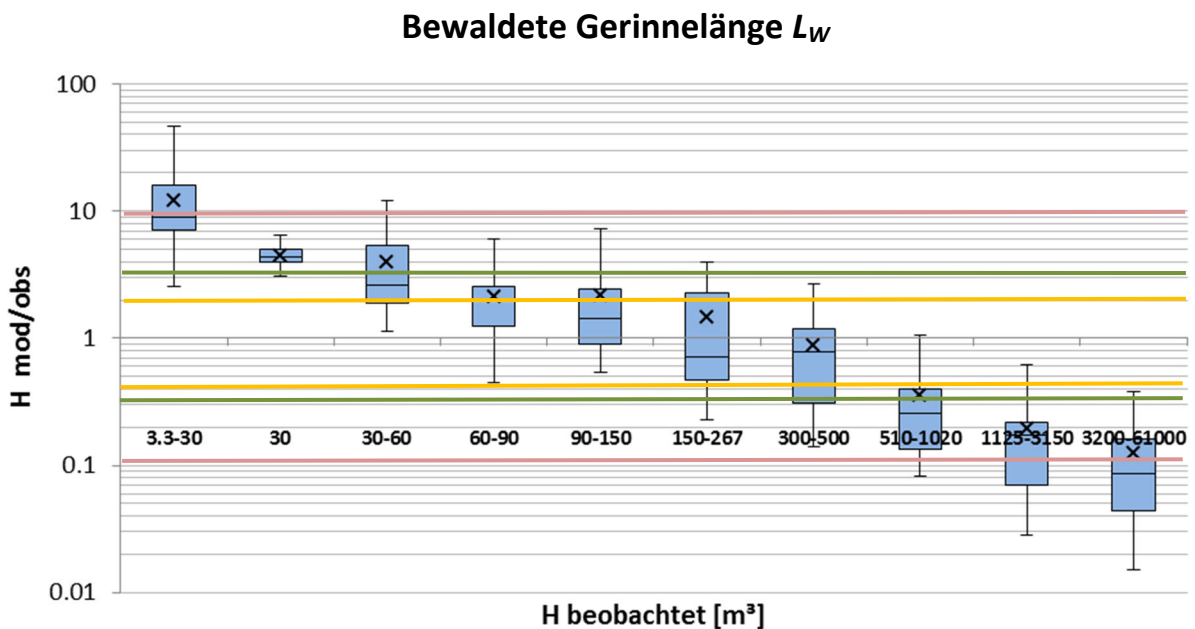


Abbildung 47: Boxplots der Verhältniszerte  $r = V_{reg}/V_{obs}$  am Beispiel von Gleichung (3) – bewaldete Gerinnelänge –, aufgetragen gegen die beobachtete Schwemmholzmenge  $V_{obs}$  (X-Achse). Der schwarze Strich innerhalb der blauen Kästen zeigt den Median, das schwarze Kreuz den jeweiligen Mittelwert.

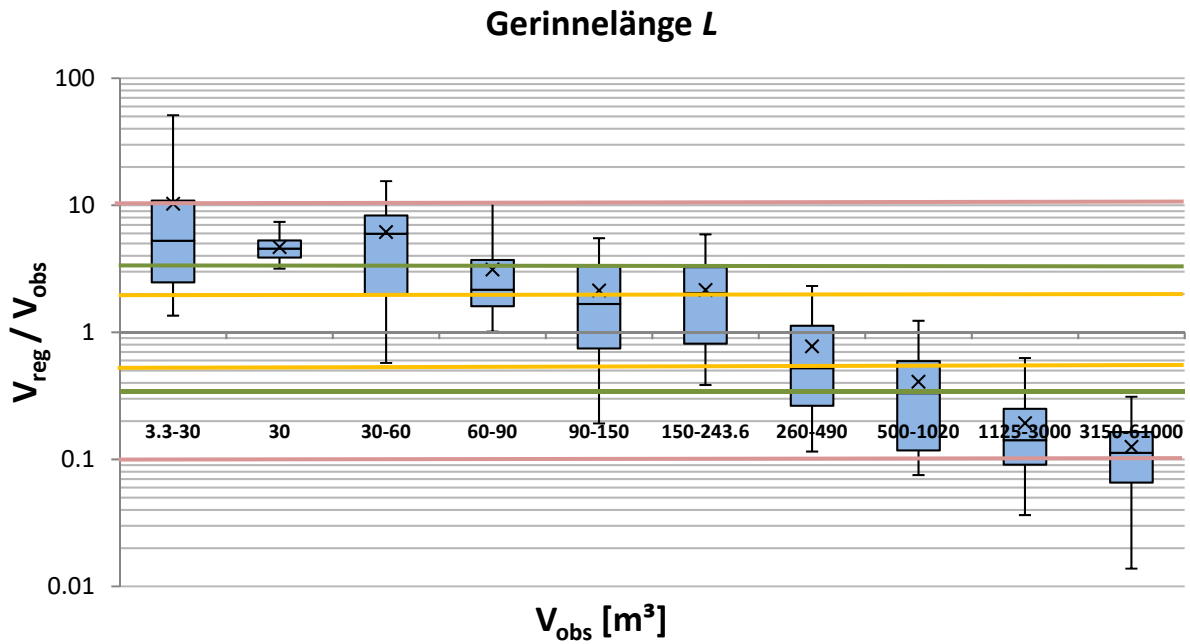


Abbildung 48: Boxplots der Verhältniszerte  $r = V_{reg}/V_{obs}$  am Beispiel von Gleichung (4) – Gerinnelänge –, aufgetragen gegen die beobachtete Schwemmholzmenge  $V_{obs}$  (X-Achse). Der schwarze Strich innerhalb der blauen Kästen zeigt den Median, das schwarze Kreuz den jeweiligen Mittelwert.

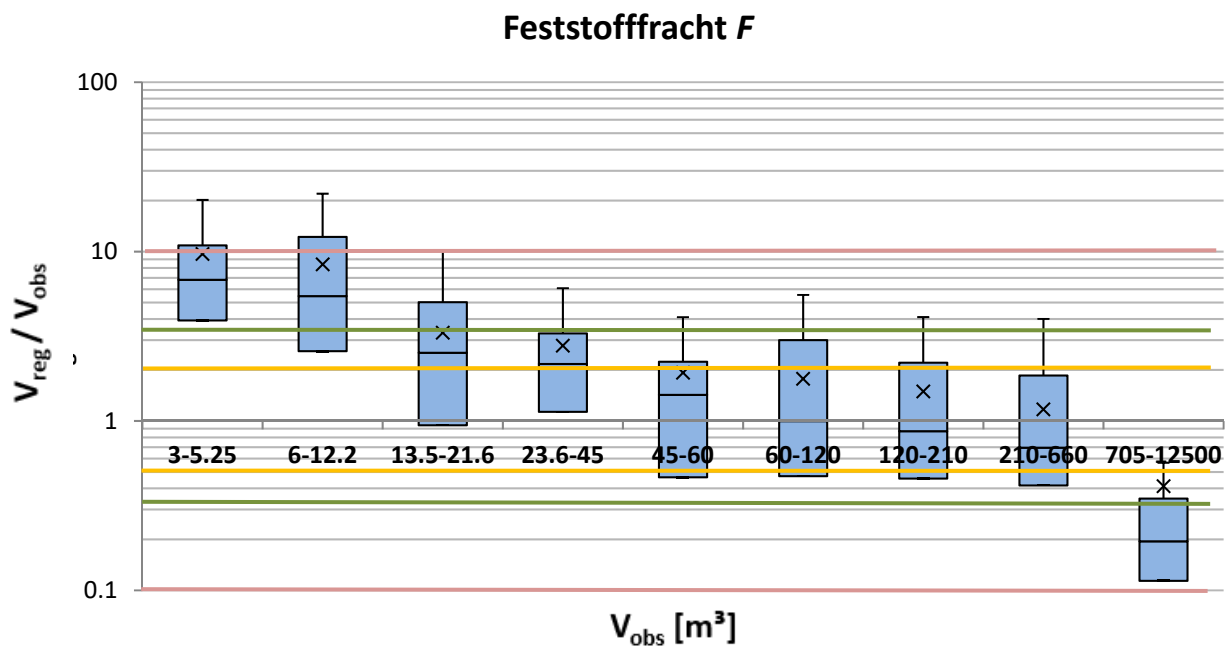


Abbildung 49: Boxplots der Verhältniszerte  $r = V_{reg}/V_{obs}$  am Beispiel von Gleichung (5) – Feststofffracht –, aufgetragen gegen die beobachtete Schwemmholzmenge  $V_{obs}$  (X-Achse). Der schwarze Strich innerhalb der blauen Kästen zeigt den Median, das schwarze Kreuz den jeweiligen Mittelwert.

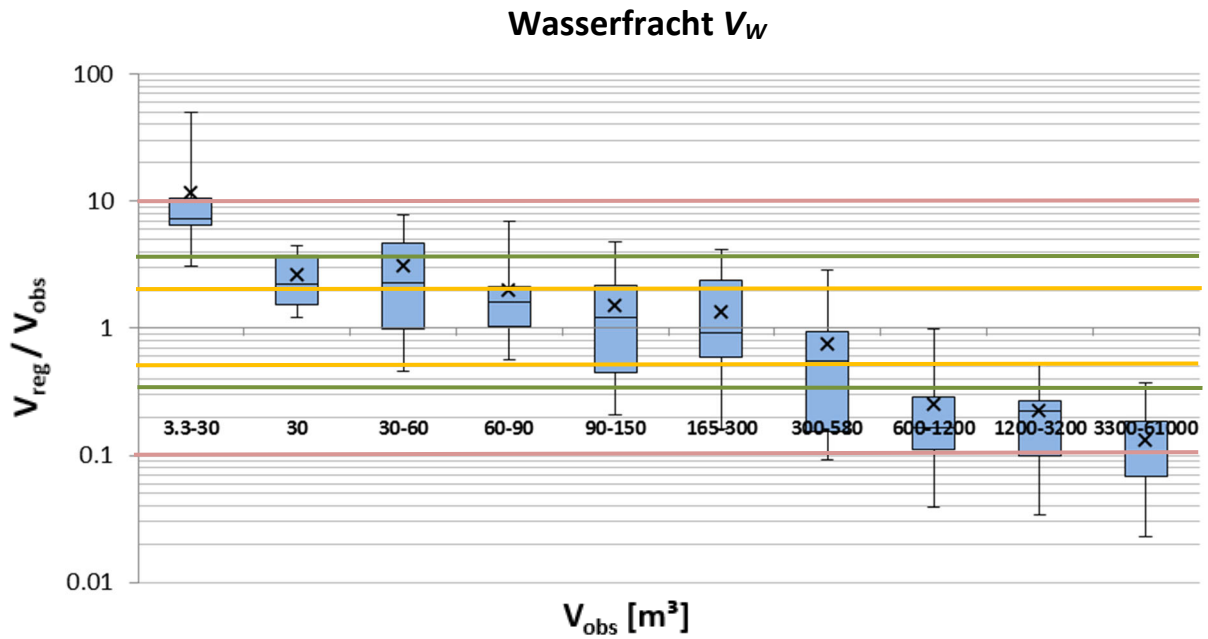


Abbildung 50: Boxplots der Verhältniszerte  $r = V_{reg}/V_{obs}$  am Beispiel von Gleichung (6) – Wasserfracht –, aufgetragen gegen die beobachtete Schwemmholzmenge  $V_{obs}$  (X-Achse). Der schwarze Strich innerhalb der blauen Kästen zeigt den Median, das schwarze Kreuz den jeweiligen Mittelwert.

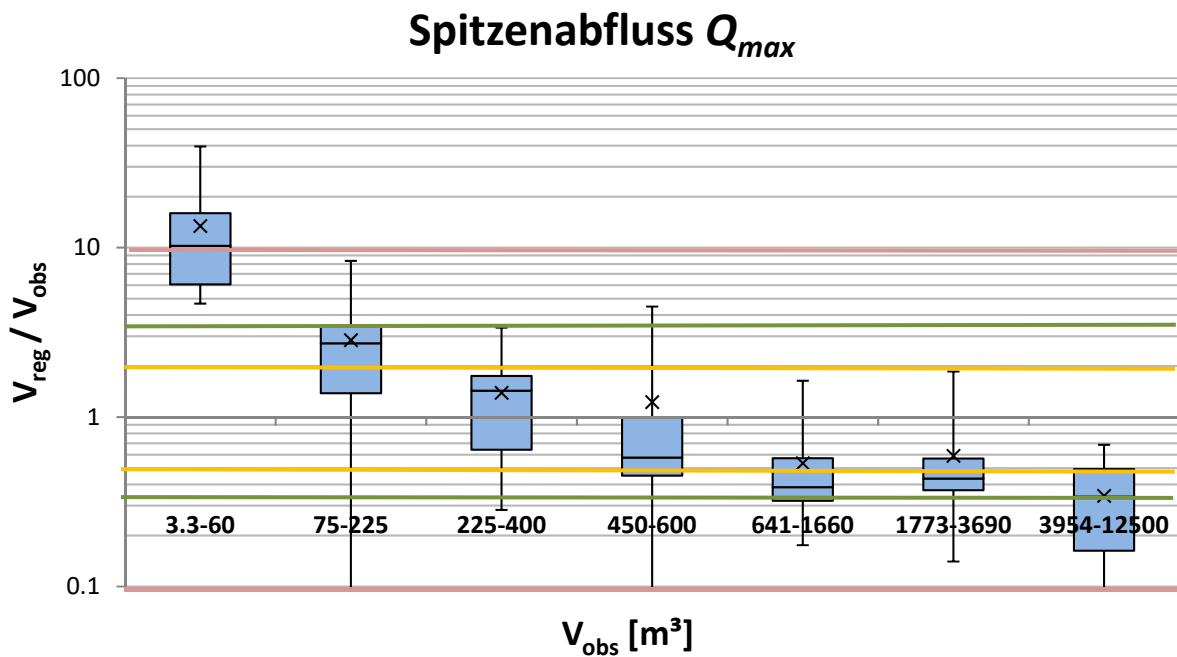


Abbildung 51: Boxplots der Verhältniszerte  $r = V_{reg}/V_{obs}$  am Beispiel von Gleichung (7) – Spitzenabfluss –, aufgetragen gegen die beobachtete Schwemmholzmenge  $V_{obs}$  (X-Achse). Der schwarze Strich innerhalb der blauen Kästen zeigt den Median, das schwarze Kreuz den jeweiligen Mittelwert.

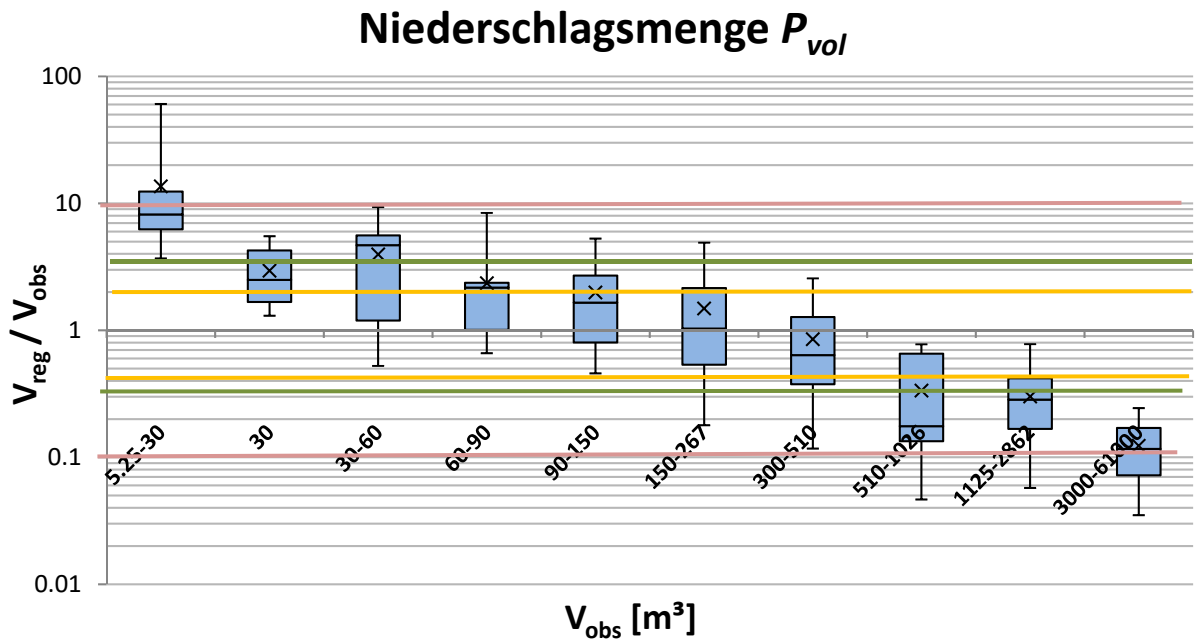


Abbildung 52: Boxplots der Verhältniszerte  $r = V_{reg}/V_{obs}$  am Beispiel von Gleichung (8) – Niederschlagsvolumen –, aufgetragen gegen die beobachtete Schwemmh Holzmenge  $V_{obs}$  (X-Achse). Der schwarze Strich innerhalb der blauen Kästen zeigt den Median, das schwarze Kreuz den jeweiligen Mittelwert.

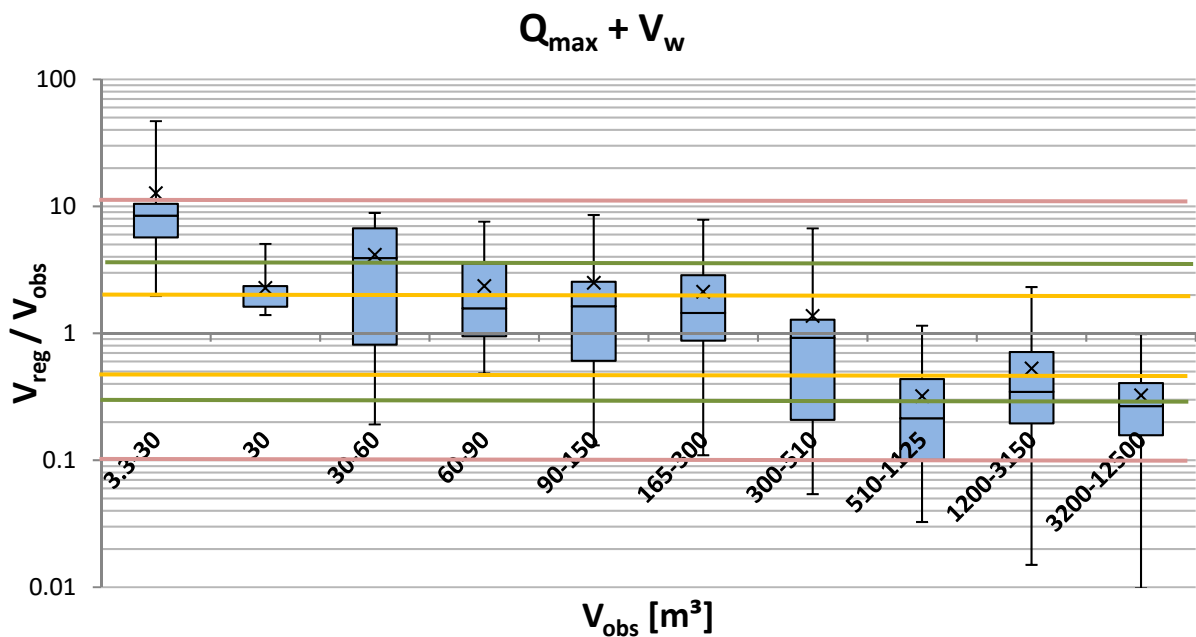


Abbildung 53: Boxplots der Verhältniszerte  $r = V_{reg}/V_{obs}$  am Beispiel von Gleichung (9) – Spitzenabfluss und Wasserfracht –, aufgetragen gegen die beobachtete Schwemmh Holzmenge  $V_{obs}$  (X-Achse). Der schwarze Strich innerhalb der blauen Kästen zeigt den Median, das schwarze Kreuz den jeweiligen Mittelwert.

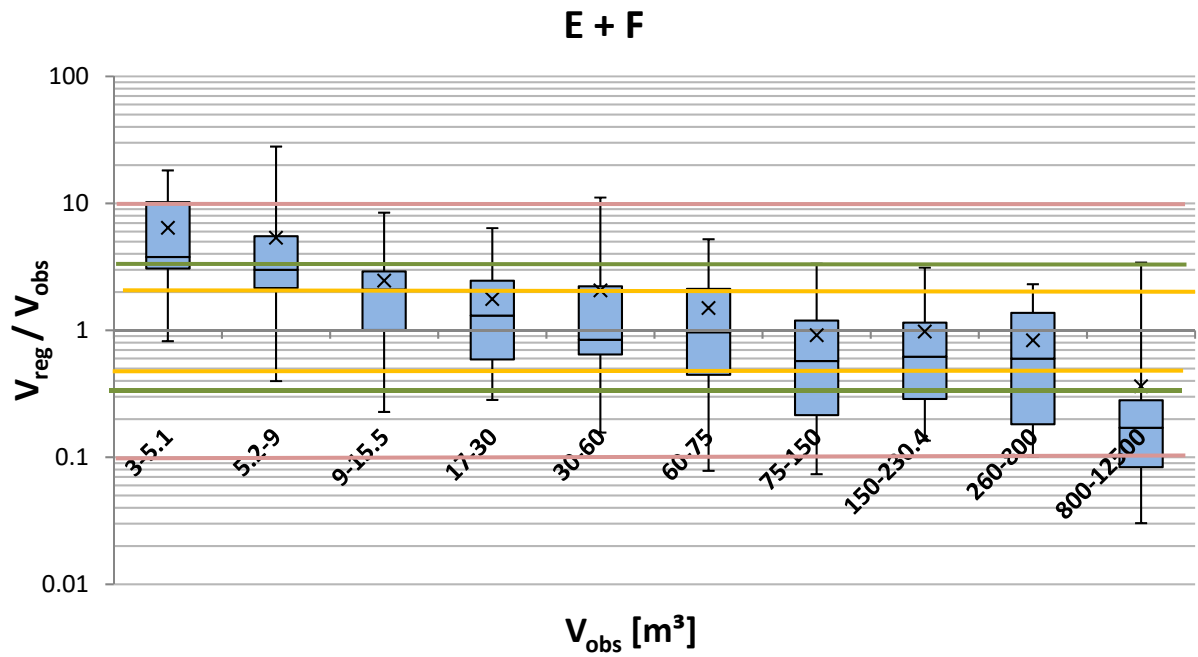


Abbildung 54: Boxplots der Verhältniszerte  $r = V_{\text{reg}}/V_{\text{obs}}$  am Beispiel von Gleichung (10) – Einzugsgebietsgröße und Feststofffracht –, aufgetragen gegen die beobachtete Schwemmholzmenge  $V_{\text{obs}}$  (X-Achse). Der schwarze Strich innerhalb der blauen Kästen zeigt den Median, das schwarze Kreuz den jeweiligen Mittelwert.

## E. Verschiedene Varianten für die multiple Regression mit $Q_{max}$ und $V_w$

Für Gleichung (9) wurden verschiedene Varianten getestet (Abbildung 55). Die ursprüngliche Gleichung mit allen Werten, inklusive den rekonstruierten Abflusswerten mit der GIUB'96 Methode ist:

$$(9.1) \quad V_{reg} = 0.93 Q_{max}^{0.23} V_w^{0.32} \quad R^2 = 0.33; n = 166$$

Die GIUB'96 Methode schätzt den 100-jährlichen Abfluss aufgrund der Einzugsgebietsgrösse und regionspezifischen Parametern. Dies sind für die Anwendung auf die schwemmholzspezifischen Ereignisse unserer Datenbank jedoch sehr ungenaue Abflusswerte.

Wird die multiple Regression ohne GIUB'96 Werte berechnet, ergibt sich folgende Gleichung:

$$(9.2) \quad V_{reg} = 1.57 Q_{max}^{0.74} V_w^{0.13} \quad R^2 = 0.42; n = 59$$

Angewendet auf alle Ereignisse in der Datenbank mit Angaben zu Abfluss und Wasserfracht ( $n = 166$ ) ergibt sich mit Gleichung (9.2) ein Bestimmtheitsmass von  $R^2 = 0.29$ . Man sieht, dass mit der Gleichung (9.2) der Einfluss von  $V_w$  aufgrund des kleinen Exponenten (0.13) gering ist.

Vertauscht man nun die Achsen (d.h. y-Achse = beobachtete Werte; x-Achse = modellierte Werte) und berechnet die Formel neu ergibt sich:

$$(9.3) \quad V_{reg}'' = 7.16 Q_{max}^{0.53} V_w^{0.09} \quad R^2 = 0.29; n = 166$$

Auch hier bleibt der Einfluss von  $V_w$  aufgrund des kleinen Exponenten gering.

Zwei weitere Varianten von Gleichung (9) wurden wie folgt berechnet: Aus der Grundgesamtheit wurde eine fundierte Auswahl getroffen und die Schwemmholmenge separat für  $V_w$  und  $Q_{max}$  berechnet. Die resultierende Regression wurde dann wiederum in das Verhältnis zur beobachteten Schwemmholmenge gesetzt (d.h.  $V_{reg}/V_w$ <sup>33</sup> bzw.  $V_{reg}/Q_{max}$ <sup>89</sup>) und gegen die andere Variable geplottet, um deren Exponenten zu eruieren. Daraus ergeben sich folgende Gleichungen:

$$(9.4) \quad V_{reg2} = 0.37 Q_{max}^{0.46} V_w^{0.33} \quad R^2 = 0.32; n = 166$$

$$(9.5) \quad V_{reg3} = 1.96 Q_{max}^{0.89} V_w^{0.07} \quad R^2 = 0.28; n = 166$$

In Gleichung (9.5) ist der Einfluss von  $V_w$  aufgrund des kleinen Exponenten wiederum marginal. In Gleichung (9.4) hingegen ist der Exponent beider Variablen und damit deren Einfluss ähnlich gross. Zudem ist das Bestimmtheitsmass in Gleichung (9.4) leicht besser und die Regression näher an der 1:1 Linie zwischen beobachteten und modellierten Werten (Abbildung 55). Darum wurde Gleichung (9.4) als beste Variante ausgewählt und in den Ergebnissen präsentiert.

Würde man die Gleichung nur mit den gut dokumentierten Werten aus den Ereignisanalysen aufstellen (d.h. ohne die mit viel Unsicherheiten rekonstruierten Schätzungen von  $V_w$  und  $Q_{max}$ ), so würde die Gleichung wie folgt aussehen:

$$(9.6) \quad V_{reg4} = 0.83 Q_{max}^{0.59} V_w^{0.26} \quad R^2 = 0.58; n = 44$$

Dass Bestimmtheitsmass würde sich damit beinahe verdoppeln, hingegen wäre die Datengrundlage stark verkleinert ( $n=44$  anstatt  $n=166$ ), was die Aussagekraft der Formel einschränkt.

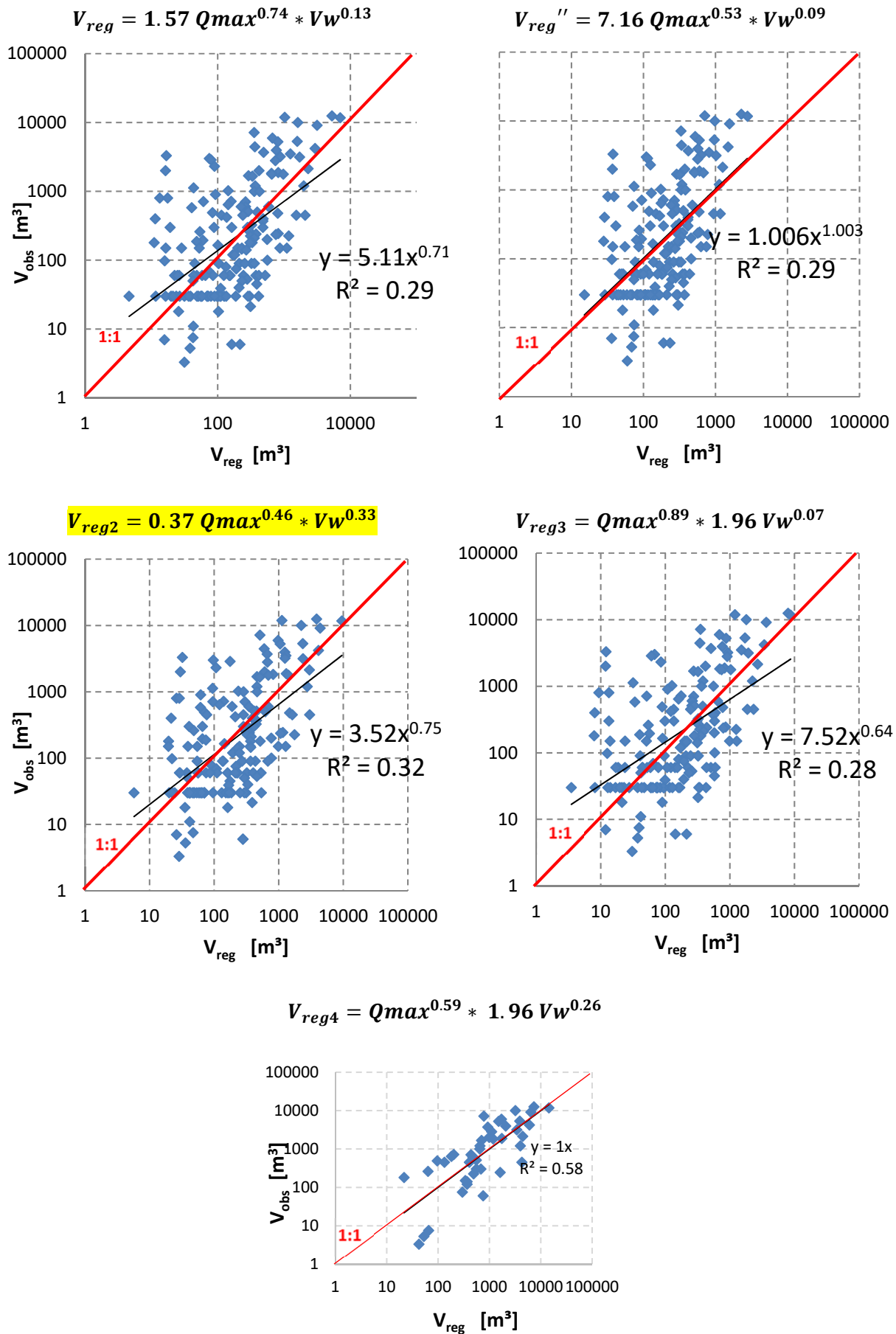


Abbildung 55: Beobachtete vs. modellierte Werte für die verschiedenen Varianten von Gleichung (9).

Als weitere Auswertung wurde das Verhältnis ( $r$ ) der modellierten Schwemmholzmenge  $V_{reg}$  und der beobachteten Schwemmholzmenge  $V_{obs}$  in Relation gesetzt zu  $V_{obs}$ ,  $Q_{max}$  und  $V_w$ , um einen allfälligen Trend zwischen diesen Variablen zu erkennen (Abbildung 56). Es zeigt sich, dass kleinere Schwemmholz mengen  $< 100 \text{ fm}^3$  eher überschätzt werden, hingegen grössere Schwemmholz mengen  $> 1000 \text{ fm}^3$  tendenziell unterschätzt werden (siehe auch Anhang D).

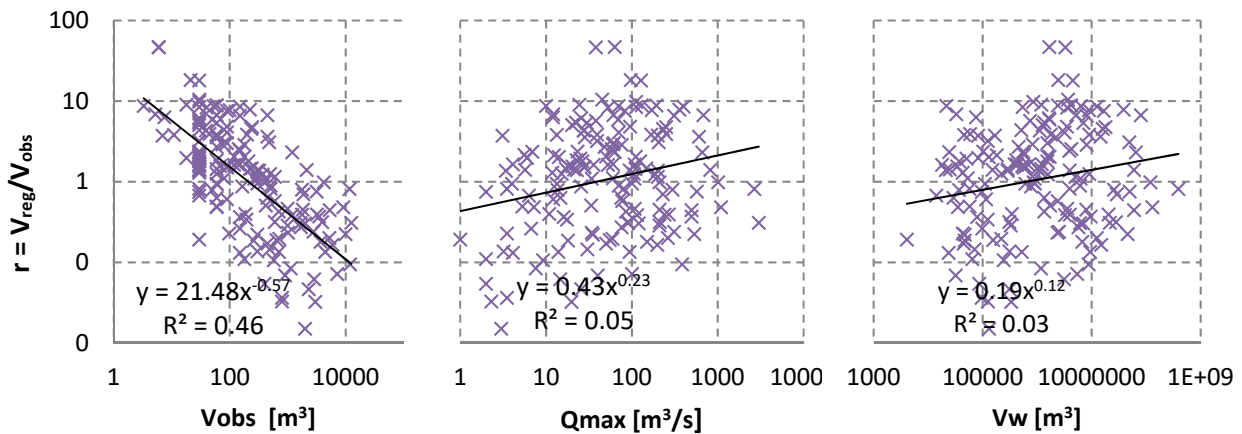


Abbildung 56: Verhältnis  $r = V_{reg} / V_{obs}$  gegenüber den Variablen der Gleichung.

Verschiedene Varianten wie oben beschrieben wurden auch mit Gleichung (10) (Kombination von Einzugsgebietsgrösse und Feststofffracht) ausprobiert. Hierbei zeigte sich, dass die ursprüngliche Formel ( $V_{reg} = 0.2 E^{0.23} F^{0.6}$ ) ohne Achsenumkehrung am geeignetsten ist.