

# **Fach- und Computerlabor: Wasserbau**

## **Untersuchungen zum Geschiebetransport im Vogelbach**

Alessandro Agazzi, Silas Menberg, René Kaufmann

4. Juni 2010





Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Diese Arbeit wurde an der ETH Zürich im Rahmen des Kurses „Fach- & Computerlabor“ geschrieben.

**Betreuung:**

Dr. Dieter Rickenmann

**Autoren:**

Alessandro Agazzi - aagazzi@student.ethz.ch

René Kaufmann - krene@student.ethz.ch

Silas Menberg - menbergs@student.ethz.ch

**Titelbild:**

Gerinne des Vogelbachs bei Alpthal, SZ

Foto: Alessandro Agazzi, Panorama Vogelbach

Abschnitt 5, Bachbett kaum sichtbar

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Fach- und Computerlabors in der Vertiefungsrichtung Wasserbau wird ein Abschnitt des Vogelbachs im Alpthal (Kt. Schwyz) genauer untersucht, im Speziellen in Bezug auf Geschiebetransport während drei Hochwasserereignissen. Dafür wurden im September 09 Feldaufnahmen im Vogelbach gemacht, wobei u.a. Querprofile, die Bachbett-Morphologie und die Kornverteilung der Sohle (Linienproben) erhoben wurden. Die Bachbettsohle im oberen Teil des Abschnitts ist von einer durchgehenden, offen anstehenden Felsplatte geprägt. Im unteren Teil finden sich vorwiegend Step-Pool-Sequenzen mit teilweise beträchtlichen Ansammlungen an mobilisierbarem Geschiebe. Die Feinanteile der Linienproben werden mit der Fullerkurve ergänzt, woraus ein  $d_m$  von 5 cm resultiert. Das Querprofil des mittleren Sohlgefälles wird als Dreiecks-, dasjenige mit dem minimalen Sohlgefälle als Trapezprofil angenähert.

Für die Geschiebetransportberechnungen werden als Grundlage die Abflüsse von drei Hochwasserereignissen (16.11.2002, 22./23.8.2005 und 5.8.2006) gewählt und mit Geophon-Messungen verglichen. Die Berechnungen basieren im Wesentlichen auf vier unterschiedlichen Ansätzen nach Rickenmann, Wong & Parker, Aguirre-Pe und Wilcock & Crowe, wobei jeweils mit dem mittleren und minimalen Sohlgefälle gerechnet wird.

Alle verwendeten Ansätze geben den groben Verlauf des Geschiebetransports gut wieder, jedoch variieren sie über mehrere Grössenordnungen. Im Vergleich zu den Geophon-Messungen liegt der Ansatz nach Wilcock & Crowe am nächsten. Die Resultate liegen im unteren Bereich der minimalen Geophon-Messungen, wodurch aber eher tiefe Geschiebetransportraten resultieren. Rickenmann und Rickenmann mit Formverlusten liegen jeweils leicht über den maximalen Geophon-Messungen. Diese Tatsache ist nicht weiter verwunderlich, da diese Beziehung mit Daten aus dem betrachteten Gebiet kalibriert wurde. Aguirre-Pe überschätzt den Geschiebetransport stark, wodurch im Extremfall neben dem Geschiebe fast kein Wasserabfluss mehr vorhanden ist.

Die spezifischen Geschiebetransportraten für das mittlere Sohlgefälle liegen im Allgemeinen über denjenigen für das minimale Sohlgefälle. Daraus kann geschlossen werden, dass das Sohlgefälle einen wesentlichen Einfluss auf die Geschiebetransportrate hat.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Geschiebetransportberechnungen sehr unterschiedliche Resultate mit einer Variation über mehrere Grössenordnungen liefern können. Am besten wählt man – unter Beachtung der Gültigkeitsbereiche des Sohlgefälles – sowohl verschiedene Ansätze als auch solche, die anhand von Daten in morphologisch ähnlichen Gebieten kalibriert wurden.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Projektperimeter . . . . .	1
<b>2. Grundlagendaten &amp; Morphologie</b>	<b>3</b>
2.1. Querprofile . . . . .	3
2.2. Anteil an groben Blöcken . . . . .	4
2.3. Bachbettstruktur: Sohlgefälle und Stufen . . . . .	4
2.4. Verfügbares Geschiebe im Bachbett . . . . .	6
2.5. Linienprobe . . . . .	6
2.6. Hochwasserereignisse . . . . .	8
<b>3. Berechnungen zur Hydraulik und Fließgeschwindigkeit</b>	<b>9</b>
3.1. Ansatz von Smart & Jäggi . . . . .	9
3.2. Ansatz von Rickenmann . . . . .	9
3.3. Ergebnisse . . . . .	10
3.4. Diskussion . . . . .	11
<b>4. Berechnungen zum Geschiebetransport</b>	<b>12</b>
4.1. Ansatz von Rickenmann . . . . .	12
4.2. Ansatz von Meyer-Peter & Müller (Wong & Parker) . . . . .	13
4.3. Ansatz von Aguirre-Pe . . . . .	14
4.4. Ansatz von Wilcock & Crowe . . . . .	15
4.5. Ergebnisse . . . . .	16
4.5.1. Vergleich der Ansätze . . . . .	18
4.5.2. Vergleich mit den Geophon-Messungen . . . . .	18
4.6. Diskussion . . . . .	19
4.6.1. Vergleich der Ansätze . . . . .	19
4.6.2. Vergleich mit den Geophon-Messungen . . . . .	19
4.6.3. Einfluss von Bettstrukturen . . . . .	20
<b>5. Schlussfolgerung</b>	<b>21</b>
<b>A. Linienprobe</b>	<b>II</b>
<b>B. Geschiebetransport</b>	<b>III</b>
B.1. Hochwasser 2005 . . . . .	III
B.2. Hochwasser 2006 . . . . .	V
<b>C. Excel-Dateien</b>	<b>VII</b>
C.1. Datengrundlage . . . . .	VII
C.2. Datenaufbereitung . . . . .	VII
C.3. Auswertung, Berechnung . . . . .	VIII

## Abbildungsverzeichnis

1.1. Einzugsgebiet des Vogelbachs . . . . .	2
1.2. Übersicht der Teilabschnitte und der Messstation im Vogelbach . . . . .	2
2.1. Querprofile, mittleres Querprofil und Querprofil aus einem LiDAR- basiertem DEM (Zustand 2002) für den Bachabschnitt 5. . . . .	3
2.2. Ersatzprofil der Gerinnegeometrie für das mittlere Sohlgefälle (links) und das minimale Sohlgefälle (rechts) . . . . .	3
2.3. Bachbettstrukturen für den Abschnitt 5 . . . . .	5
2.4. Längenprofil für den Abschnitt 5 . . . . .	5
2.5. Kornverteilungskurve für den Abschnitt 5. Die Feianteile werden mit einer Fuller-Kurve mit $d_{max} = 9\text{ cm}$ angenähert. . . . .	7
2.6. Abflüsse dreier Hochwasserereignisse reduziert auf das Einzugsgebiet von Abschnitt 5 im Vogelbach . . . . .	8
3.1. Schlüsselkurve nach Ansatz von Smart & Jäggi (1983) (oben) sowie nach Rickenmann (unten) für mittleres und minimales Sohlgefälle . . . . .	10
3.2. Vergleich der Schlüsselkurven für das mittlere und minimale Sohlgefälle nach den Ansätzen von Smart & Jäggi sowie Rickenmann . . . . .	11
4.1. Neigungswinkel des Energiegefälles . . . . .	15
4.2. Abfluss $Q$ und Geschiebetransportrate $Q_b$ für das mittlere Sohlgefälle im Dreiecksprofil für das Hochwasser von 2002 . . . . .	17
4.3. Abfluss $Q$ und Geschiebetransportrate $Q_b$ für das minimale Sohlgefälle im Trapezprofil für das Hochwasser von 2002 . . . . .	17
B.1. Abfluss $Q$ und Geschiebetransportrate $Q_b$ für das mittlere Sohlgefälle im Dreiecksprofil für das Hochwasser von 2005 . . . . .	III
B.2. Abfluss $Q$ und Geschiebetransportrate $Q_b$ für das minimale Sohlgefälle im Trapezprofil für das Hochwasser von 2005 . . . . .	IV
B.3. Abfluss $Q$ und Geschiebetransportrate $Q_b$ für das mittlere Sohlgefälle im Dreiecksprofil für das Hochwasser von 2006 . . . . .	V
B.4. Abfluss $Q$ und Geschiebetransportrate $Q_b$ für das minimale Sohlgefälle im Trapezprofil für das Hochwasser von 2006 . . . . .	VI

## Tabellenverzeichnis

2.1. Relativer Flächenanteil der groben Blöcke im Abschnitt 5 über eine Länge von 20 m für $D_B \leq 1$ m resp. $D_B > 1$ m über den ganzen Abschnitt . .	4
2.2. Höhendifferenzen und Sohlgefälle im Abschnitt 5 . . . . .	6
4.1. Geschiebevolumen der einzelnen Berechnungsansätze für das mittlere, dreiecksförmige Querprofil mit $J_m$ und das trapezförmige Querprofil mit $J_{min}$ . Angaben in $m^3$ . . . . .	18
A.1. Linienprobe bei den Profilen 5.0, 5.1, 5.2 und 5.3 . . . . .	II





# 1. Einleitung

Werden bei Hochwasser grosse Mengen an Geschiebe mobilisiert, so hat dies sowohl für den Bach oder Fluss wie auch seine nahe Umgebung Konsequenzen. In der Nähe von Siedlungsgebieten kann ein Hochwasser zu grossen Schäden führen. Strassen und Infrastrukturanlagen werden mit Geröll und Schlamm zerstört.

Bei einem Hochwasserereignis wird die Flussmorphologie stark verändert. Durch den Geschiebetransport werden im Oberlauf des Baches Geröll, Baumstämme etc. mobilisiert und weiter unten wieder deponiert. Durch diesen Prozess wird der Bachlauf neu gestaltet. Im Normalfall führen Wildbäche wenig Wasser, bei starken Niederschlägen und Gewittern nimmt die Wassermenge sprunghaft zu.

## 1.1. Projektperimeter

In dieser Arbeit werden Untersuchungen zum Geschiebetransport im Vogelwaldbach (nachfolgend „Vogelbach“) durchgeführt. Abbildung 1.1 zeigt das Einzugsgebiet des Vogelbachs. Dieser liegt in der Nähe von Alpthal im Kanton Schwyz und entwässert in die Alp. Das Einzugsgebiet des Vogelbachs hat eine Fläche von  $1.58 \text{ km}^2$ .

Das Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 1.2 zu sehen. Die Messstation für Abfluss und Geschiebe an der Stelle 1.0 befindet sich auf einer Höhe von 1053 m.ü.M. Die Geschiebefracht wird mittels Geophonen ermittelt. Die Untersuchungen in dieser Arbeit beziehen sich auf den Teilabschnitt zwischen den Markierungen 5-0 und 6-0 (vgl. Rechteck in Abb. 1.2). Dieser Bereich liegt rund 300 m oberhalb der Abfluss- und Geschiebemesstation. Der Teilabschnitt hat eine Länge von rund 65 m und liegt auf einer Höhe zwischen 1092 und 1103 m.ü.M.

Das gesamte Einzugsgebiet hat eine Fläche von  $1.58 \text{ km}^2$ , das Teileinzugsgebiet des betrachteten Abschnitts 5 beträgt  $1.33 \text{ km}^2$ .

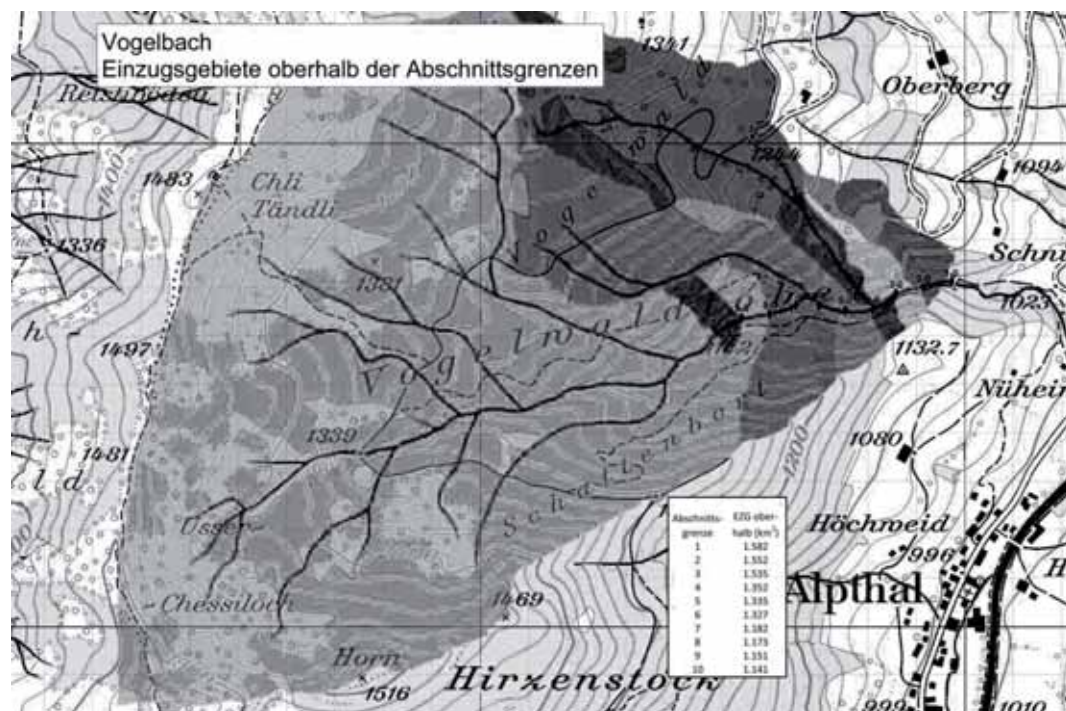


Abbildung 1.1: Einzugsgebiet des Vogelbachs

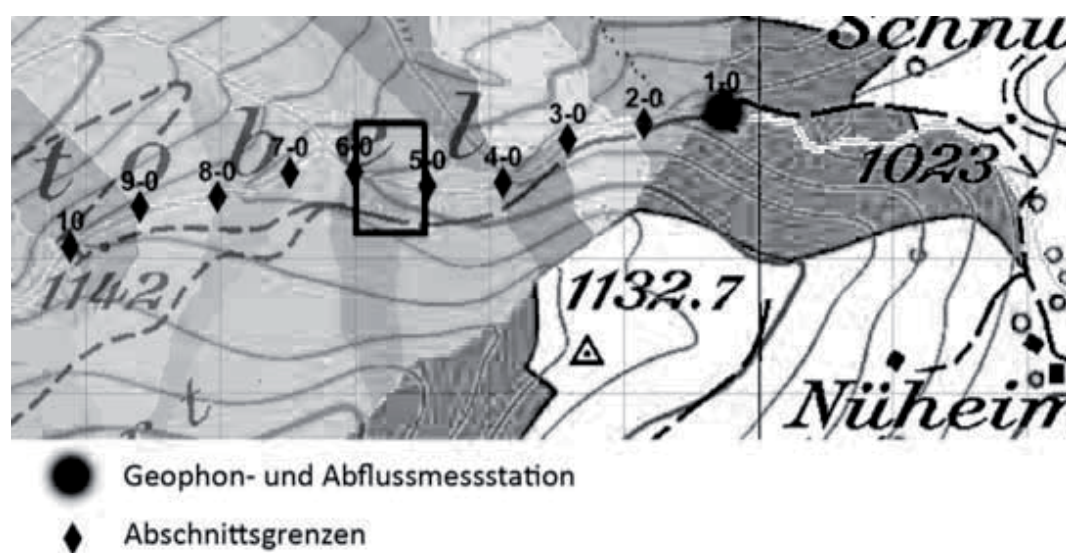
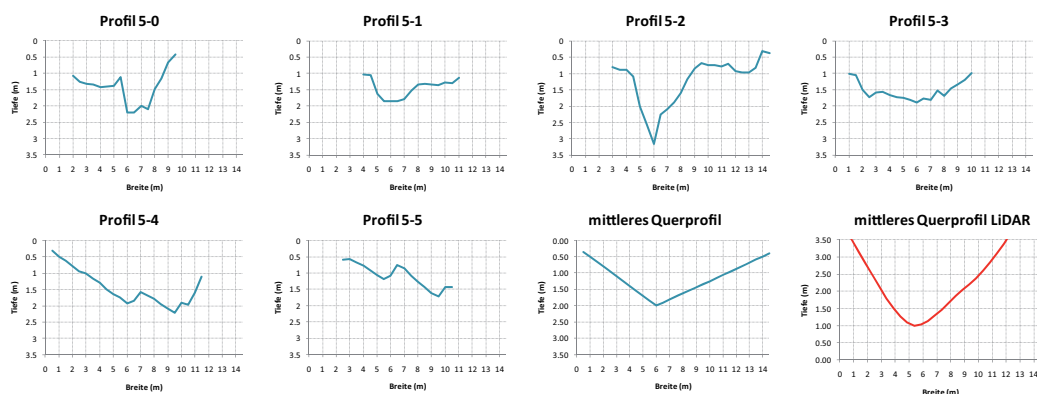


Abbildung 1.2: Übersicht der Teilabschnitte und der Messtation im Vogelbach

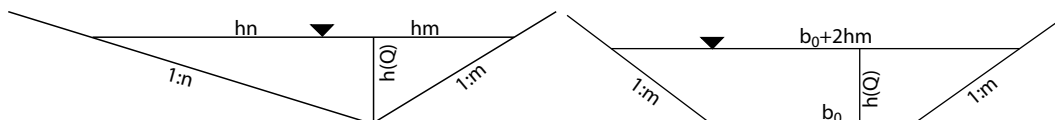
## 2. Grundlagendaten & Morphologie

### 2.1. Querprofile

In Intervallen von rund 10 m werden sechs Querprofile aufgenommen, wobei die Abstände der jeweiligen Stützpunkte im Uferbereich 1–2 m, im Bachbett ca. 0.5 m betragen. Die Profile werden anschliessend, zentriert nach wasserführendem Teilgerinne, übereinander gelegt und gemittelt. Dieses gemittelte Profil dient als Grundlage für ein geometrisch einfaches Ersatzprofil. Es zeigte sich, dass ein Dreiecksprofil die gemessenen Querprofile ausreichend zu beschreiben vermag und repräsentativ für den Abschnitt 5 ist (vgl. Abb. 2.1). Für die Böschungsneigungen werden folgende Werte festgelegt:  $n = 3.33$  und  $m = 5.31$ . Das Dreiecksprofil wird für das mittlere Sohlgefälle benutzt. Für das minimale Sohlgefälle wird ein symmetrisches Trapezprofil mit einer Steigung von  $m = 3.26$  und einer Sohlbreite von  $b_0 = 4$  m gewählt (vgl. Abb. 2.2).



**Abbildung 2.1:** Querprofile, mittleres Querprofil und Querprofil aus einem LiDAR-basiertem DEM (Zustand 2002) für den Bachabschnitt 5.



**Abbildung 2.2:** Ersatzprofil der Gerinnegeometrie für das mittlere Sohlgefälle (links) und das minimale Sohlgefälle (rechts)

Das mittlere Querprofil und das LiDAR-basierte Querprofil stimmen recht gut überein, beispielsweise haben sie ähnliche Böschungsneigungen. Das LiDAR-basierte Querprofil weist eine grössere maximale Abflusstiefe auf, welche jene des mittleren Profils um etwa 1 m übersteigt. Die Ursache dieser Differenz liegt darin, dass das Bezugsniveau für die Stützpunkte nicht so hoch gewählt wird.

Die  $h$ - $Q$ -Beziehung (vgl. Gl. (2.1)) für die Geschiebetransportberechnungen im Dreiecksprofil wurde anhand der Gleichungen (2.3) bis (2.4) vorgenommen.

$$h(Q) = a \cdot Q^b \quad (2.1)$$

$$A(h) = 0.5 \cdot h^2 \cdot (n + m) \quad (2.2)$$

$$Lu(h) = h \cdot (\sqrt{1 + n^2} + \sqrt{1 + m^2}) \quad (2.3)$$

$$R_{hy}(h) = \frac{A(h)}{Lu(h)} = 0.5 \cdot h \cdot \frac{n + m}{\sqrt{1 + n^2} + \sqrt{1 + m^2}} \quad (2.4)$$

$a$  und  $b$  sind Parameter der  $h$ - $Q$  Beziehung (vgl. Abb. 3.1, sowie Gl. (3.3) und (3.4)).  $h$  ist Abflusstiefe (m),  $Q$  der Abfluss ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $n, m$  die Böschungsneigung (-),  $A$  die durchflossene Fläche ( $\text{m}^2$ ) und  $Lu$  der benetzte Umfang (m).

## 2.2. Anteil an groben Blöcken

Der relative Flächenanteil der groben Blöcke mit einer Kantenlänge über 0.5 m wird nach Pagliara und Chiavaccini 2006 gemäss Gleichung (2.5) bestimmt.

$$\Gamma = \frac{N_B \cdot \pi \cdot D_B^2}{4 \cdot W \cdot L} \quad (2.5)$$

Dabei ist  $\Gamma$  die Block-Konzentration,  $N_B$  die Anzahl Blöcke,  $D_B$  der mittlere Blockdurchmesser (m) und  $W$  die Bachbreite (m) und  $L$  die Bachlänge (m). Für die Bachbreite wird 5 m gewählt. Die Blöcke sind in zwei Klassen aufgeteilt: Blöcke mit einer Kantenlänge über 1 m werden über den ganzen Abschnitt gezählt, Blöcke zwischen 0.5 m und 1 m nur über rund 20 m. Tabelle 2.1 listet die Resultate auf. Wie für einen Wildbach erwartet, machen die kleineren Blöcke einen beträchtlichen Teil der bedeckten Bachbettfläche aus.

**Tabelle 2.1:** Relativer Flächenanteil der groben Blöcke im Abschnitt 5 über eine Länge von 20 m für  $D_B \leq 1$  m resp.  $D_B > 1$  m über den ganzen Abschnitt

$D_B$ m	betrachtete Länge m	Anzahl Blöcke -	rel. Flächenanteil %
0.5–1	20	62	27
> 1	66	22	5

## 2.3. Bachbettstruktur: Sohlgefälle und Stufen

Die Abbildungen 2.3 und 2.4 zeigen die Bachbettstrukturen im Abschnitt 5 in Situation und Längenprofil. Vor allem im unteren Bereich hat es viele Step-Pool-Sequenzen mit grösseren Ansammlungen von Geschiebe und Schwemmholz. Im oberen Bereich fliesst der Bach über eine Felsplatte und weist dort zum Zeitpunkt der Vermessung weder Sedimenttransport noch -ablagerungen auf.

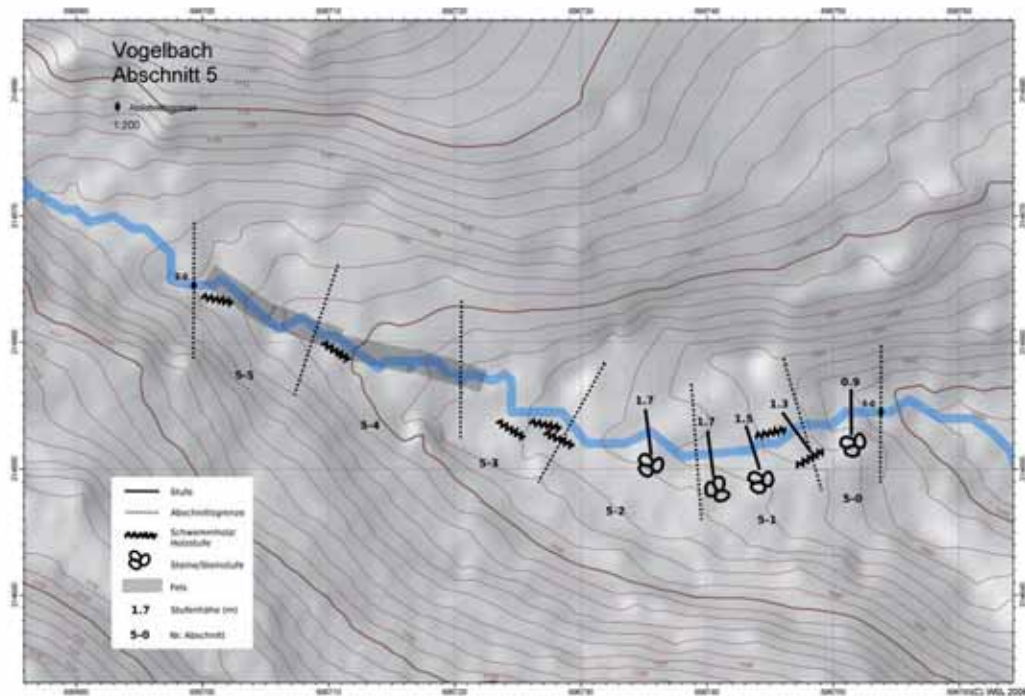


Abbildung 2.3: Bachbettstrukturen für den Abschnitt 5

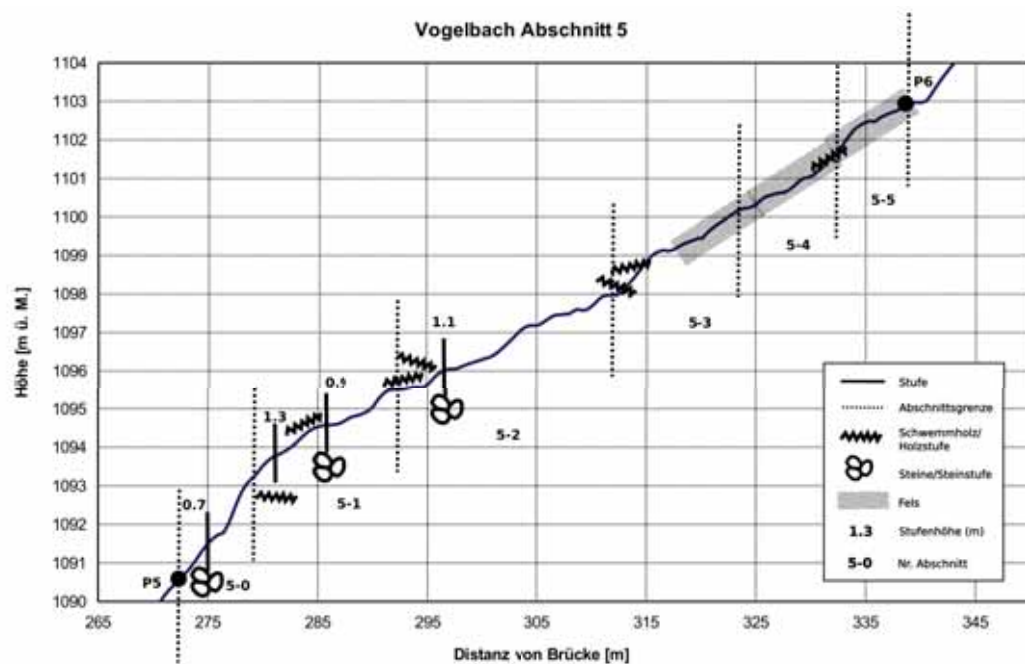


Abbildung 2.4: Längenprofil für den Abschnitt 5

Tabelle 2.2 listet einige Kennwerte für Höhendifferenzen und Sohlgefälle im betrachteten Abschnitt 5 auf. Wichtig für die folgenden Berechnungen ist das mittlere Sohlgefälle  $J_s = 19\%$ . Für das minimale Sohlgefälle wird ein rund 10 m langer Abschnitt im unteren Teil gewählt. Der Abstand dieses Abschnitts liegt zwischen 285 m und 295 m von der Brücke.



**Tabelle 2.2:** Höhendifferenzen und Sohlgefälle im Abschnitt 5

Totale Höhendifferenz des gesamten Abschnitts	12.3 m
Horizontale Länge des gesamten Abschnitts	65.8 m
Mittleres Sohlgefälle über den gesamten Abschnitt	19 %
Totale Höhendifferenz aller Stufen	4 m
Mittlere Höhendifferenz pro Stufe	1 m
Nettosohlgefälle zwischen 2 Stufen	16 %
Minimales Sohlgefälle zwischen 2 Stufen	11 %

## 2.4. Verfügbares Geschiebe im Bachbett

Der Bachabschnitt 5 wird in fünf ähnliche Teile unterteilt, um damit das verfügbare Geschiebe abzuschätzen, welches im Bachbett gespeichert ist und bei einem Hochwasser mobilisiert werden kann. Die Abschnitte reichen jeweils von Stufe zu Stufe, wobei der oberste bei der Felsplatte (vgl. Abb. 2.3) aufhört. Auf den Felsplatten im Bachbett ist kein Geschiebe abgelagert. Für jeden Abschnitt wird die mittlere Höhe der Alluvionsschicht abgeschätzt und mit der entsprechenden Fläche multipliziert. Aufsummiert über alle Abschnitte wird ein verfügbares Geschiebevolumen von rund 200 m<sup>3</sup> geschätzt.

## 2.5. Linienprobe

Für die Kornverteilung werden vier Linienproben im betrachteten Abschnitt erhoben, die nach Fehr, gemäss Bezzola FS 2010 ausgewertet werden. Bei der Linienprobe werden alle Körner entlang einer 1 m langen Geraden gewählt, deren b-Achse grösser als 1 cm ist. Diese Körner werden anschliessend in verschiedene Grössenklassen (Kornfraktionen) aufgeteilt und eine Häufigkeitsverteilung erstellt. Für die weiteren Berechnungen ist eine Gewichtsverteilung nötig. Dafür ist eine Umrechnung nötig, die auch Auskunft über die Kornverteilung der Unterschicht gibt.

Im oberen Bereich des Teilabschnittes fliesst der Bach direkt auf Fels, wodurch wenig bis kein Geschiebe mobilisiert werden kann. Die Aufnahmen sind daher nahe den unteren Abschnitten (5-0 bis 5-3) gemacht worden.

In einem ersten Schritt wird mittels Gleichung (2.6) die Verteilung nach Anzahl in eine Verteilung nach Gewicht umgerechnet,

$$\Delta p_i = \frac{\Delta q_i \cdot d_{mi}^{0.8}}{\sum_i^N \Delta q_i \cdot d_{mi}^{0.8}} \quad (2.6)$$

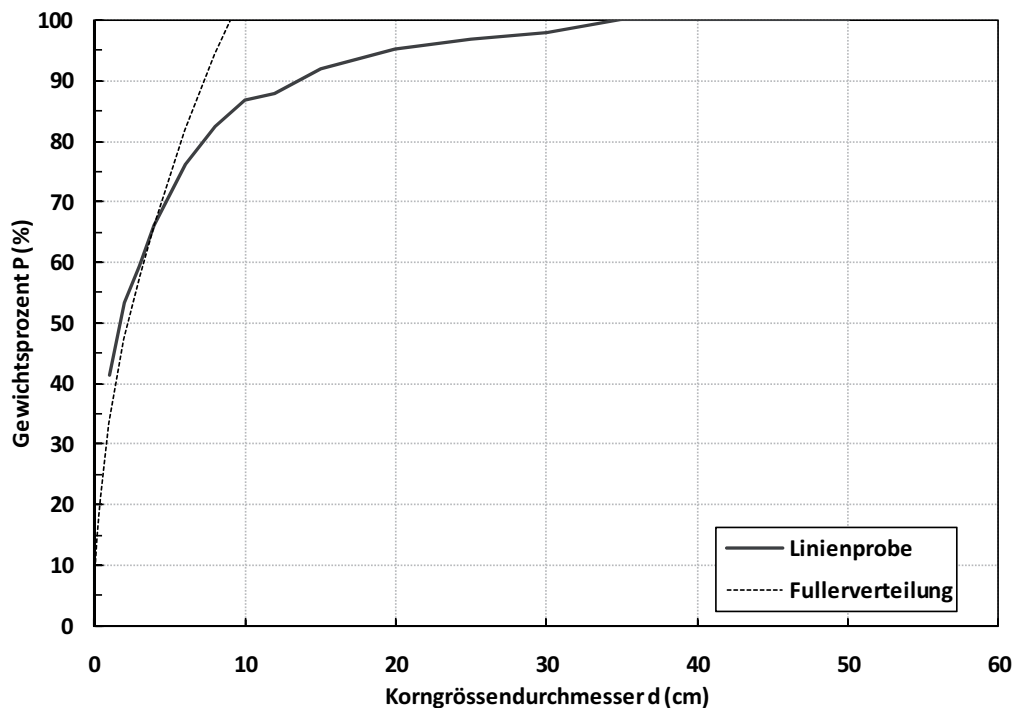
wobei  $\Delta p_i$  Gewichtsanteil der Kornfraktion  $i$ ,  $\Delta q_i$  Anzahl Körner der Fraktion  $i$  dividiert durch Gesamtanzahl und  $d_{mi}$  das arithmetische Mittel des Korndurchmessers der Fraktion  $i$  ist.

Bei der obigen Umrechnung wird der feine Anteil unterschätzt resp. 25 % der Feinanteile werden nicht erfasst ( $d < 1$  cm), weshalb mit folgender Gleichung (2.7) die oben ermittelte Summenhäufigkeit korrigiert wird.

$$p_{iC} = 0.25 + 0.75 \cdot \sum_i^N \Delta p_i \quad (2.7)$$

$p_{iC}$  entspricht der korrigierten Summenhäufigkeit der Fraktion  $i$ , wobei  $N$  die Anzahl der Kornfraktion ist.

Jene Kornverteilungskurve, welche erst bei 42 % beginnt, wird bei den Feinanteilen mit einer Fullerkurve ergänzt. Der dafür benötigte Parameter des grössten mittleren Korndurchmessers ist auf  $\bar{d}_{max} = 9$  cm festgelegt. Abbildung 2.5 zeigt die daraus resultierende Kornverteilungskurve.



**Abbildung 2.5:** Kornverteilungskurve für den Abschnitt 5. Die Feinanteile werden mit einer Fuller-Kurve mit  $d_{max} = 9$  cm angenähert.

Zur Bestimmung des mittleren massgebenden Korndurchmessers  $D_m$  wird die Beziehung von Bunte und Abt 2001 (vgl. Gl. (2.8)) verwendet.

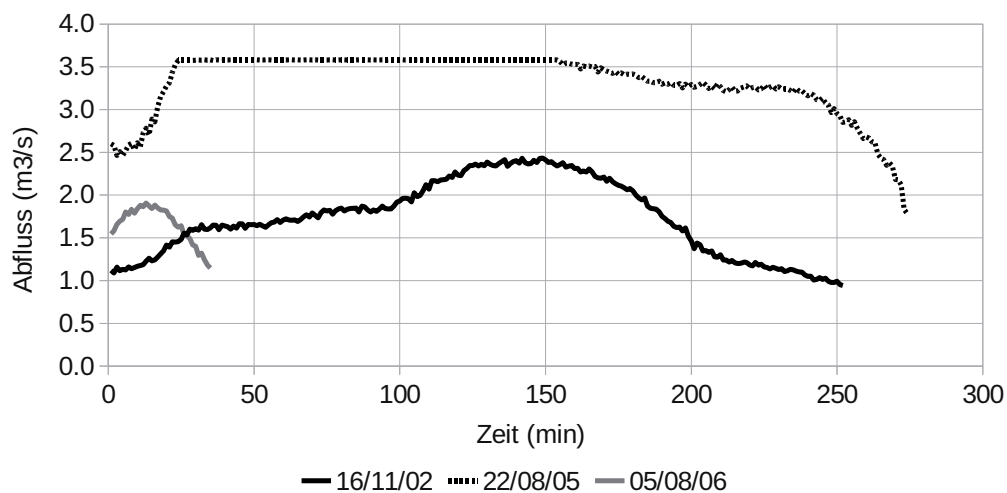
$$D_m = 10^{\left(0.01 \cdot \sum_{i=1}^k (\log D_{ci} \cdot m_{\%i})\right)} \quad (2.8)$$

$D_m$  (mm) ist der mittlere massgebende Korndurchmesser der Fraktion  $i$  und  $m_{\%i}$  die Gewichtsprocente der Fraktion  $i$ . Daraus wird ein  $D_m$  von 5 cm bestimmt. Für die nachfolgenden Geschiebetransportrechnungen ist dieser Korndurchmesser (geometrisches Mittel) repräsentativer als  $d_m$  resp.  $d_{50} = 2.5$  cm aus obiger Kornverteilungskurve.

## 2.6. Hochwasserereignisse

Die folgenden Berechnungen für Hydraulik, Fließgeschwindigkeit und Geschiebetransport beziehen sich auf die drei Hochwasserereignisse vom 16. November 2002, 22. August 2005 und 5. August 2006, die im Vogelbach beobachtet wurden. Der Abfluss wird am Gebietsauslass bei der Station 1.0 (vgl. Abb. 1.2) gemessen. Für den Abschnitt 5 müssen die Abflüsse korrigiert werden. Dabei werden sie mit dem Faktor 0.84 reduziert, welcher dem Anteil der Einzugsgebiete von Abschnitt 5 ( $1.33 \text{ km}^2$ ) dividiert durch das gesamte Gebiet des Vogelbachs ( $1.58 \text{ km}^2$ ) entspricht.

Abbildung 2.6 zeigt die drei verwendeten Hochwasserereignisse im Vogelbach. Die Ereignisse 2002 und 2005 dauern fast gleich lang. 2005 wird der maximal messbare Pegelstand an der Messstation überschritten, weshalb Abflüsse über  $3.6 \text{ m}^3/\text{s}$  nicht mehr registriert resp. aufgeführt sind. Das Hochwasserereignis vom Sommer 2006 ist das kürzeste mit einem maximalen Abfluss bei rund  $1.9 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Abbildung 2.6:** Abflüsse dreier Hochwasserereignisse reduziert auf das Einzugsgebiet von Abschnitt 5 im Vogelbach



## 3. Berechnungen zur Hydraulik und Fließgeschwindigkeit

Für die Hochwasserereignisse im Vogelbach sind für den betrachteten Gerinneabschnitt die reduzierten Abflüsse in eine mittlere Abflusstiefe auf Basis der erhobenen Daten zur Gerinnegeometrie und der Kornverteilung umzurechnen. Die hydraulischen Berechnungen erfolgen mittels den Ansätzen von Smart & Jäggi 1983 sowie von Rickenmann 1996.

### 3.1. Ansatz von Smart & Jäggi

Die mittlere Fließgeschwindigkeit  $U_m$  wird mit dem Ansatz von Smart & Jäggi<sup>1</sup> (vgl. Gl. (3.1)) ermittelt. Der Wandeinfluss wird vereinfacht über den hydraulischen Radius berücksichtigt.

$$U_m = \sqrt{1 - e^{-0.05 \cdot \frac{R_{hy}}{d_{90} \cdot \sqrt{J}}}} \left( 2.5 \cdot \ln \frac{10.9 \cdot R_{hy}}{(1.5 - 2.0) \cdot d_{90}} \right) \sqrt{g \cdot R_{hy} \cdot J} \quad (3.1)$$

Dabei ist  $R_{hy}$  der hydraulische Radius (m),  $d_{90}$  der 90%-ige Korndurchmesser (m) und  $J$  das Längsgefälle (-).

Die Berechnungen werden sowohl für das mittlere Sohlgefälle und die mittlere Querschnittsform als auch für das minimale Sohlgefälle und die dazugehörige Querschnittsform durchgeführt.

### 3.2. Ansatz von Rickenmann 1996

Für Fließgeschwindigkeit  $U_m$  nach Rickenmann 1996 wird Gleichung (3.2) verwendet.

$$U_m = \frac{0.37 \cdot g^{0.33} \cdot Q^{0.34} \cdot J^{0.20}}{d_{90}^{0.35}} \quad (3.2)$$

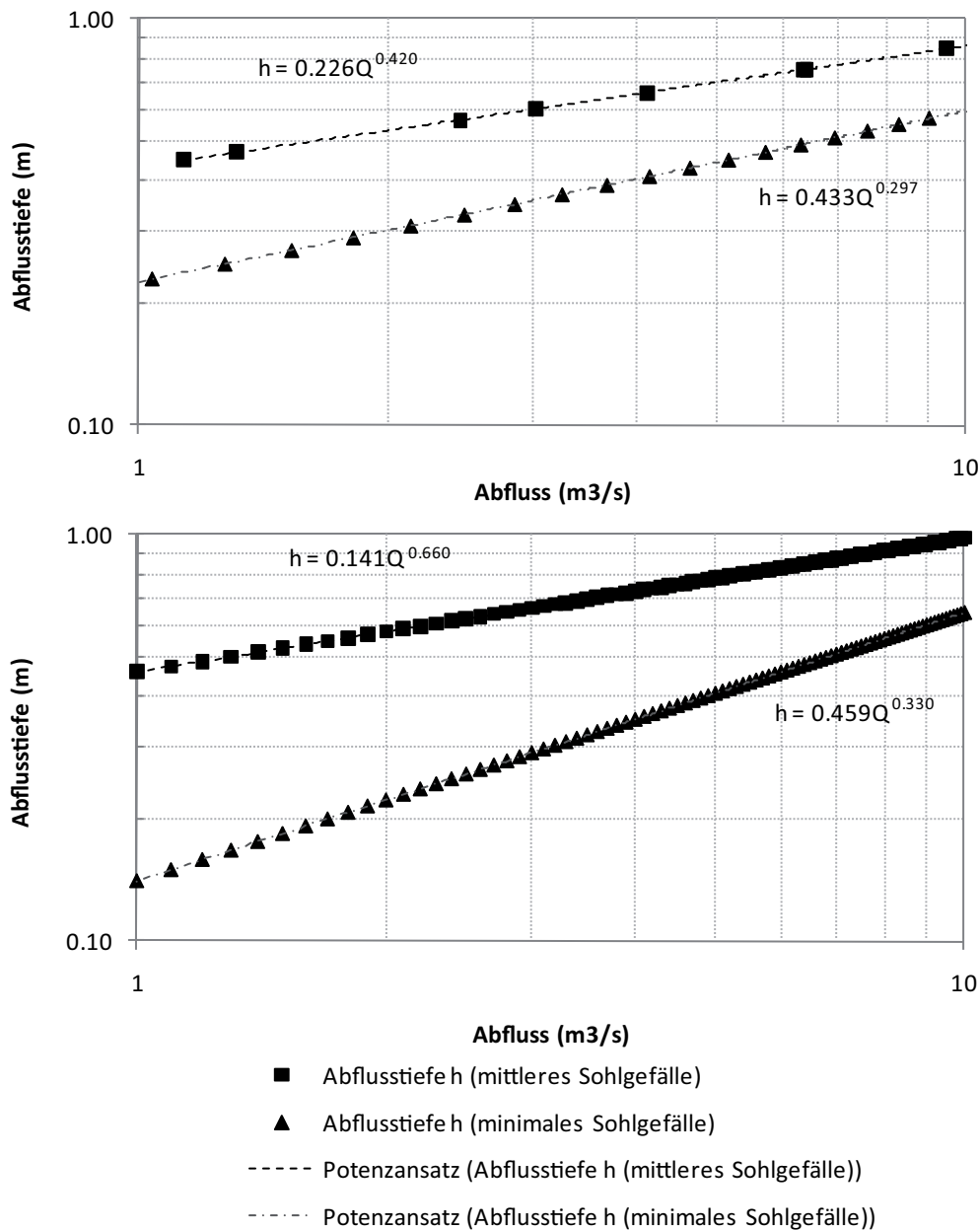
Dabei ist  $Q$  die Abflussmenge ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) und  $J$  das Sohlgefälle (-). Der Gültigkeitsbereich der Gleichung (3.2) liegt bei  $J > 0.6 \%$ .

Der Ansatz nach Rickenmann wird sowohl für das mittlere Sohlgefälle und die mittlere Querschnittsform als auch für das minimale Sohlgefälle mit der dazugehörigen Querschnittsform berechnet. Diese Resultate dienen nur zum Vergleich mit dem Ansatz von Smart & Jäggi und werden nicht für weitere Berechnungen verwendet.

<sup>1</sup>Bezzola FS 2010, Seite 4-28, Gleichung 4.68

### 3.3. Ergebnisse

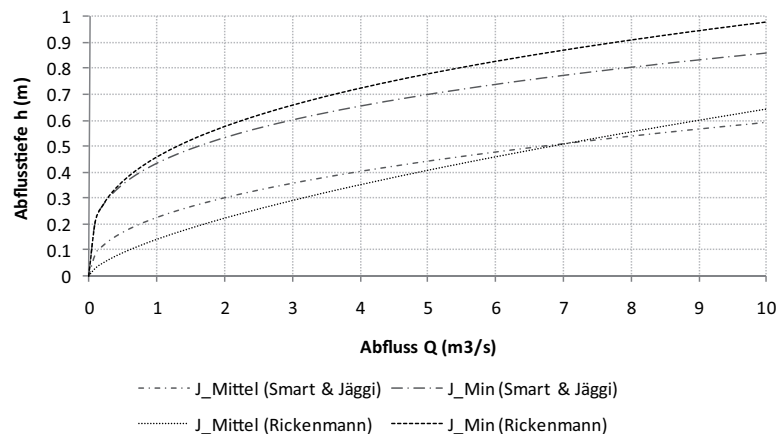
Die Ergebnisse aus den Fließberechnungen werden als Schlüsselkurven für den Fall des mittleren und des minimalen Sohlgefälles dargestellt, wobei die Abflusstiefe  $h$  vom Abfluss  $Q$  abhängt. Abbildung 3.1 zeigt die Schlüsselkurven nach den Ansätzen von Smart & Jäggi und Rickenmann.



**Abbildung 3.1:** Schlüsselkurve nach Ansatz von Smart & Jäggi (1983) (oben) sowie nach Rickenmann (unten) für mittleres und minimales Sohlgefälle

### 3.4. Diskussion

In Abbildung 3.2 werden die Schlüsselkurve nach Smart & Jäggi sowie nach Rickenmann verglichen.



**Abbildung 3.2:** Vergleich der Schlüsselkurven für das mittlere und minimale Sohlgefälle nach den Ansätzen von Smart & Jäggi sowie Rickenmann

Beim mittleren Sohlgefälle sind die Abflusstiefen für Abflüsse  $Q < 7 \text{ m}^3/\text{s}$  nach dem Ansatz von Smart & Jäggi höher als nach dem Ansatz von Rickenmann. Bei Abflüssen über  $7 \text{ m}^3/\text{s}$  sind die Abflusstiefen mit dem Ansatz von Rickenmann höher als jene nach Smart & Jäggi. Bei einer kleinen Zunahme der Abflüsse zwischen  $Q = 0 - 1 \text{ m}^3/\text{s}$  nimmt nach Smart & Jäggi die Abflusstiefe stärker zu als nach Rickenmann.

Für das minimale Sohlgefälle zeigen die Ansätze von Smart & Jäggi sowie von Rickenmann für kleine Abflüsse für den Bereich  $Q = 0 - 1 \text{ m}^3/\text{s}$  ähnliche Resultate. Für Abflüsse mit  $Q > 1 \text{ m}^3/\text{s}$  ist die Abflusstiefe nach dem Ansatz von Smart & Jäggi geringer als nach Rickenmann.

Demzufolge erwartet Rickenmann für grössere Abflüsse eine höhere Abflusstiefe als Smart & Jäggi. Die Abflusstiefe nimmt ab, wenn das Sohlgefälle steiler wird, was den Erwartungen entspricht. Wird das Sohlgefälle steiler, ist die Zunahme der Abflusstiefe mit steigendem Abfluss nach Rickenmann geringer und konstanter als nach Smart & Jäggi. Bei Smart & Jäggi nimmt die Abflusstiefe bei kleinen Abflüssen stark zu, bei grösseren Abflüssen nimmt sie langsamer zu.

Die Wahl des hydraulischen Modells hat einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der Geschiebetransportberechnungen. Geschiebetransporte finden bei hohen Abflüssen statt. Für das mittlere Sohlgefälle sind die Abweichungen der beiden Modelle für diese Abflüsse gering. Beim geringem Sohlgefälle sind die Unsicherheiten zwischen den Modellen für die geschiebeführenden Abflüsse am grössten.

Im folgenden werden für die Geschiebetransportberechnungen die beiden  $h$ - $Q$ -Relationen aus Abbildung 3.1 (vgl. Gl. (3.3) und (3.4)) verwendet

$$h = 0.226 \cdot Q^{0.420} \quad \text{mittleres Sohlgefälle} \quad (3.3)$$

$$h = 0.433 \cdot Q^{0.297} \quad \text{minimales Sohlgefälle} \quad (3.4)$$

## 4. Berechnungen zum Geschiebetransport

Für die Berechnungen des Geschiebetransports werden vier unterschiedliche Ansätze verwendet und miteinander verglichen. Die vier Transportgleichungen werden sowohl mit dem mittlerem Sohlgefälle  $J_m$  und mittlerem Querprofil als auch mit dem minimalen Sohlgefälle  $J_{min}$  und dem entsprechenden Querprofil (vgl. Kap. 2.1) berechnet.

Als Grundlage stehen die drei Hochwasserereignisse der Jahre 2002, 2005 und 2006 zur Verfügung, deren Abfluss gemäss dem Anteil des Einzugsgebietes (vgl. Kap. 2.6) reduziert wurde.

An der Abflussmessstation wird der Geschiebedurchgang mit Geophonen gemessen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass nur diejenigen Körner registriert werden resp. einen Impuls auslösen, welche die Platte über den Geophonen berühren. Ein Teil des Geschiebes wird nicht erfasst, womit die Messresultate mit Sorgfalt zu verwenden sind. Eine weitere Unsicherheitsquelle liegt in der Umrechnung der Geophonimpulsdaten zur Geschiebetransportrate.

Für die Berechnung der Sohlenbreite werden die Gleichungen (4.1) und (4.2) verwendet, wobei beim minimalen Sohlgefälle die Breite  $b_o = 4\text{ m}$  gewählt wird.  $h$  wird aus der Pegel-Abfluss-Relation mittels Gleichungen (3.3) und (3.4) bestimmt.

$$b_{s,J_m} = 2/3 \cdot (m + n) \cdot h \quad (4.1)$$

$$b_{s,J_{min}} = b_o + m \cdot h \quad (4.2)$$

Die totale Geschiebefracht  $Q_b$  eines Ereignisses berechnet sich nach Gleichung (4.4).

$$Q_{tot} = \sum Q_b \cdot \delta t \quad (4.3)$$

$$= \sum q_b \cdot b_s \cdot \Delta t \quad (4.4)$$

$Q_{tot}$  ist das Geschiebevolumen ( $\text{m}^3$ ),  $Q_b$  die Geschiebetransportrate ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $q_b$  der spezifische Geschiebetransportrate ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $h$  die Abflusstiefe (m) und  $\Delta t$  (s) das Zeitintervall der Messung.

### 4.1. Ansatz von Rickenmann

Der Ansatz für die spezifische Geschiebetransportrate  $q_b$  (vgl. Gl. (4.5)) nach Rickenmann 2001 basiert auf der Differenzbildung zwischen spezifischem Abfluss  $q$  und dem spezifischen, kritischen Abfluss  $q_c$  (vgl. Gl. (4.6)), multipliziert mit dem Sohlgefälle  $J$ .

$$q_b = 1.5 \cdot (q - q_c) \cdot J^{1.5} \quad (4.5)$$

$$q_c = 0.005 \cdot (s - 1)^{1.67} \cdot g^{0.5} \cdot d_{50}^{1.5} \cdot J^{-1.12} \quad (4.6)$$

wobei  $q_b$  die spezifische, volumetrische Geschieberate ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $J$  das Sohlgefälle,  $s = 2.65$  das Verhältnis von Sediment- zu Fluidichte und  $d_{50}$  der mittlere Korndurchmesser (m) sind. Dieser Ansatz ist nur für Gerinne bis zu einem Sohlgefälle von 17% gültig. Das mittlere Sohlgefälle des betrachteten Abschnitts 5 liegt mit 19% knapp ausserhalb des Gültigkeitsbereiches.

Für das mittlere Querprofil mit dem mittleren Sohlgefälle werden zusätzlich die Formverluste nach Rickenmann u. a. 2006 berücksichtigt. Dabei wird ein reduziertes Sohlgefälle  $S_{red}$  gemäss Gleichung (4.7) berechnet. Das hat eine Reduktion des Geschiebetransports zur Folge.  $J_{red}$  wird in Gleichung (4.5) eingesetzt.

$$J_{red} = J s \cdot \left( \frac{n_r}{n} \right)^{1.5} \quad (4.7)$$

$$\frac{n_r}{n} = \frac{0.133 \cdot Q^{0.19}}{g^{0.096} \cdot J^{0.19} \cdot d_{90}^{0.47}} \quad (4.8)$$

Die spezifischen Geschiebetransportraten  $q_b$  werden am Schluss mit der jeweiligen Breite (vgl. Gl. (4.1) und (4.2)) multipliziert.

## 4.2. Ansatz von Meyer-Peter & Müller (Wong & Parker)

Wong und Parker 2006 modifizierten die Gleichung von Meyer-Peter & Müller, indem sie einen Korrekturfaktor für die Bettraugigkeit entfernten. Die Gleichung (4.9) (Gültigkeitsbereich:  $J \leq 0.02$ ) ist ebenfalls eine Differenzbildung, in diesem Fall zwischen der dimensionslosen Sohlenschubspannung  $\tau^*$  und der kritischen Schubspannung  $\tau_c$ .

$$q^* = 3.97 \cdot (\tau_b^* - \tau_c)^{1.5} \quad (4.9)$$

Gleichung (4.9) wird kombiniert mit dem Ansatz für die kritische Schubspannung  $\tau_c$  nach Lamb u. a. 2008 gemäss Gleichung (4.10)

$$\tau_c = 0.15 \cdot J^{0.25} \quad (4.10)$$

Weiter werden mit diesem Ansatz folgende Gleichungen verwendet:

$$u_b^* = \sqrt{g \cdot R_{hy} \cdot J} \quad (4.11)$$

$$\tau_b = \rho \cdot u_b^{*2} \quad (4.12)$$

$$\tau_b^* = \frac{\tau_b}{\rho \cdot (s-1) \cdot g \cdot D_m} \quad (4.13)$$

$$q_b = q^* \cdot \sqrt{(s-1) \cdot g \cdot D_m} \cdot D_m \quad (4.14)$$

Der Ansatz von Meyer-Peter & Müller erfordert mehr Eingabewerte als der Ansatz nach Rickenmann 2001. Zudem ist eine genaue Kenntnis der Bachbettgeometrie erforderlich, weshalb zuerst eine Pegel-Abfluss-Relation berechnet wird. Beim verwendeten Potenzansatz wird nur der Bereich mit einem Abfluss  $Q = 1 - 10 \text{ m}^3/\text{s}$  verwendet (vgl. Abb. 3.1), da für den Vogelbach in diesem Bereich des Abflusses mit Geschiebe gerechnet werden

muss. Die spezifische Geschiebetransportrate  $q_b$  wird wieder mit der jeweiligen Breite multipliziert (vgl. Gl. (4.1) und (4.2)).

### 4.3. Ansatz von Aguirre-Pe

Der Ansatz von Aguirre-Pe u. a. 2003 versucht den Geschiebetransport vorauszusagen, ohne auf den Shieldsparameter und die Reynoldszahl der Partikel zurückzugreifen. Das Transportmodell basiert auf einer partikeldichteabhängigen Froudezahl  $Fr_\star$ , dem inneren Reibungswinkel  $\Phi^\star$  und dem massgebenden Korndurchmesser  $D_m$ . Gemäss dem Autor soll das Modell besonders für steile und rauhe Gerinne treffende Resultate liefern können. Der Gültigkeitsbereich wird mit  $J \leq 0.1$  angegeben.

Die spezifische Geschiebetransportrate  $q_b$  berechnet sich dabei nach Gleichung (4.15)

$$q_b = \Phi^\star \cdot D_m \cdot \sqrt{g \cdot (s-1) \cdot D_m} \quad (4.15)$$

wobei  $D_m$  der massgebende Korndurchmesser (m),  $s = 2.65$  und  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  sind.

Die Parameter der Gleichung (4.16) sind der Transportparameter nach Einstein  $\Phi^\star$ , der Chézy-Koeffizient  $C_\star$  und das Sohlgefälle  $J$

$$\Phi^\star = 1.5 \cdot \sqrt{J} \cdot \frac{Fr_\star^6}{C_\star^4} \quad (4.16)$$

Der Chézy-Koeffizient  $C_\star$  (vgl. Gl. (4.17)) ist abhängig vom Abfluss  $Q$  bzw. der h-Q - Beziehung und dem Sohlgefälle  $J$ .

$$C_\star = \frac{v}{u_\star} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot R_{hy} \cdot J}} \quad (4.17)$$

mit  $v$  als die mittlere Fließgeschwindigkeit (m/s) und  $u_\star$  als mittlere Schubspannungsgeschwindigkeit (m/s). Die Froudezahl (vgl. Gl. (4.18)) ist abhängig von der Partikeldichte:

$$Fr_\star = \frac{v}{\sqrt{g \cdot (s-1) \cdot D_m \cdot f_\theta}} \quad (4.18)$$

Die Froudezahl selbst wird mittels Reibungskorrektur (Gl. (4.19)) modifiziert und an das aktuelle Sohlgefälle und die Kornstruktur (innerem Reibungswinkel) angepasst

$$f_\theta = \sqrt{\cos \theta \cdot (\tan \phi - \tan \theta)} \quad (4.19)$$

mit  $\theta$  als Winkel des Energiegefälles und  $\phi$  als inneren Reibungswinkel. Gemäss Bezzola FS 2010 beträgt der innere Reibungswinkel  $\phi = 39^\circ$ . Aus geometrischen Überlegungen (vgl. Abb. 4.1) für den Neigungswinkel  $\Phi$  folgt, dass

$$f_\theta = (1 + J^2)^{-1/4} \cdot \sqrt{\tan \phi - J} \quad (4.20)$$

mit  $\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1+J^2}}$  und  $\tan \theta = \frac{J}{1}$ .

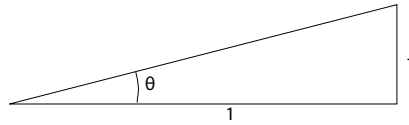


Abbildung 4.1: Neigungswinkel des Energiegefälles

#### 4.4. Ansatz von Wilcock & Crowe

Das Modell von Wilcock und Crowe 2003 berechnet die Geschiebetransportrate  $Q_b$  als Summe aller einzeln transportierten Fraktionen. Dadurch kann dem Umstand Rechnung getragen werden, dass der Transportbeginn der jeweiligen Fraktionen bei unterschiedlichen Abflussgeschwindigkeiten stattfindet. Der Gültigkeitsbereich wird vom Autor nicht angegeben.

Die spezifische Geschiebetransportrate  $q_b$  berechnet sich als Summe der einzelnen Geschiebefraktionen gemäss Gleichung (4.21)

$$q_b = \sum_{i=1}^n q_{b,i} \quad (4.21)$$

Die jeweilige Geschiebetransportrate  $q_{b,i}$  der Fraktion  $i$  berechnet sich durch die Gleichung (4.22)

$$q_{b,i} = \frac{W_i^* \cdot F_i \cdot u_*^3}{(s-1) \cdot g} \quad (4.22)$$

wobei die Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_* = \sqrt{g \cdot R_{hy} \cdot J}$  (m/s),  $s = 2.65$ ,  $F_i$  der Anteil der Fraktion  $i$  der Korngrößenverteilung an der Sohlenoberfläche und  $W_i^*$  die Transportfunktion sind.

Das Modell nutzt dabei eine Transportfunktion  $W_i^*$  (vgl. Gl. (4.23)), welche abhängig von der Schubspannungsrate  $\Phi_i$  im Bachbett ist.

$$W_i^* = \begin{cases} 0.022 \cdot \Phi_i^{7.5} & , \Phi_i < 1.35 \\ 14 \cdot \left(1 - \frac{0.894}{\sqrt{\Phi_i}}\right)^{4.5} & , \Phi_i \geq 1.35 \end{cases} \quad (4.23)$$

wobei  $\Phi_i = \frac{\tau_{R,m}}{\tau_{R,i}}$

Die mittlere Schubspannung  $\tau_{R,m}$  berechnet sich mit Gleichung (4.24)

$$\tau_{R,m} = \tau_{R,m}^* \cdot (s-1) \cdot \rho_w \cdot g \cdot d_{m,o} \quad (4.24)$$

$$\tau_{R,m}^* = 0.021 + 0.015 \cdot e^{-20 \cdot F_s} \quad (4.25)$$

mit dem mittlerem Korndurchmesser der Bettoberfläche  $d_{m,o}$  (m) und dem Anteil der Sandfraktion  $F_s = 0.15$ .

Die Schubspannung  $\tau_{R,i}$  der Fraktion  $i$  ist abhängig von der mittleren Schubspannung  $\tau_{R,m}$ . Diese wird an die entsprechende Korngrösse der Fraktion gemäss Gleichung (4.26) angepasst.

$$\tau_{R,i} = \Psi_i^x \cdot \tau_{R,m} \quad (4.26)$$

$$\Psi_i = \frac{d_i}{D_m} \quad (4.27)$$

$$x = \begin{cases} 0.12 & , \Psi_i < 1 \\ \frac{0.67}{1+e^{1.5-\Psi_i}} & , 1 < \Psi_i < 3 \\ 0.67 & , \geq 3 \end{cases} \quad (4.28)$$

mit der Korngrösse  $d_i$  (m) der Fraktion  $i$  und der massgebenden Korngrösse  $D_m$  (m).

Beim Geophon wird nicht jede Fraktion als Geschiebe gezählt, da sich die kleineren Fraktionen bei hohen Fließgeschwindigkeiten in Schwebelage befinden. Die Sinkgeschwindigkeit  $v_s$  der einzelnen Körner wird nach Wu und Wang 2006 mittels Gleichung (4.29) berechnet. Der Übergang von rollend zu schwebend wird bei einem Verhältnis von  $\frac{v_s}{u_*} > 0.8$  angenommen.

$$v_s = \frac{M \cdot \nu}{N \cdot d_i} \cdot \left[ \sqrt{\frac{1}{4} + \left( \frac{4 \cdot N \cdot D_*^3}{3 \cdot M^2} \right)^{1/n}} + \frac{1}{2} \right]^n \quad (4.29)$$

$$M = 53.5 \cdot e^{-0.65 \cdot S_f} \quad (4.30)$$

$$N = 5.65 \cdot e^{-2.5 \cdot S_f} \quad (4.31)$$

$$n = 0.7 + 0.9 \cdot S_f \quad (4.32)$$

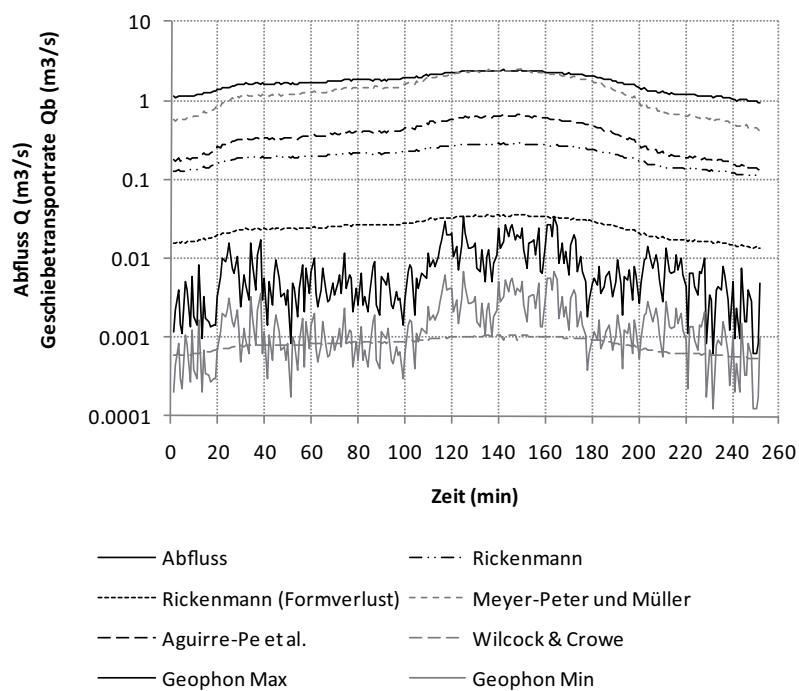
$$D_* = d_i \cdot \sqrt[3]{(s-1) \cdot \frac{g}{\nu^2}} \quad (4.33)$$

Dabei nimmt der Formfaktor nach Corey (vgl. Bezzola FS 2010) den Wert  $S_f = 0.7$  an. Die kinematische Viskosität von Wasser beträgt  $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

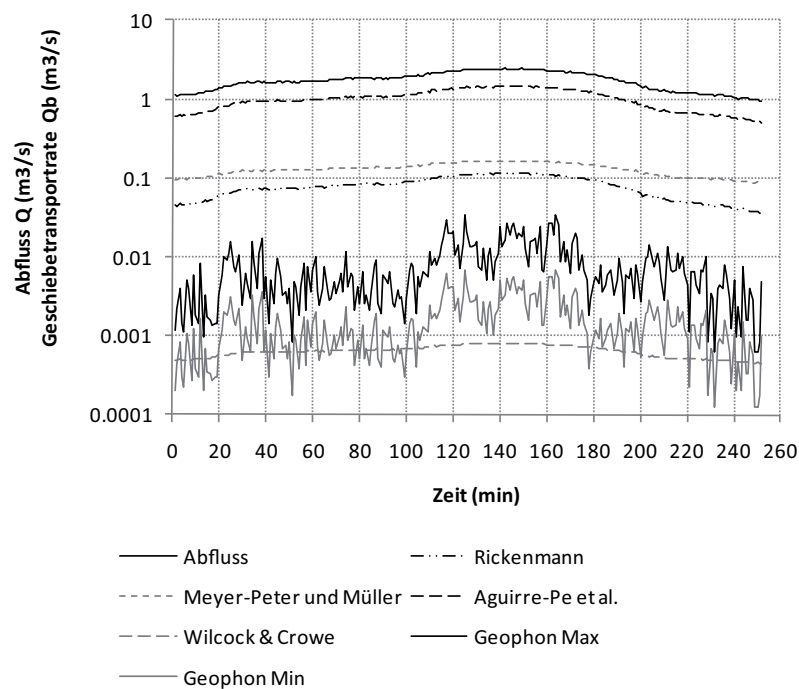
## 4.5. Ergebnisse

Im folgenden werden für das Hochwassereignis 2002 die verschiedenen Ansätze zur Berechnung der Geschiebefracht miteinander verglichen (vgl. Abb. 4.2 und 4.3). Die Abbildungen der Geschiebefrachten für die Hochwassereignisse 2005 und 2006 sind im Anhang aufgeführt.





**Abbildung 4.2:** Abfluss  $Q$  und Geschiebetransportrate  $Q_b$  für das mittlere Sohlgefälle im Dreiecksprofil für das Hochwasser von 2002



**Abbildung 4.3:** Abfluss  $Q$  und Geschiebetransportrate  $Q_b$  für das minimale Sohlgefälle im Trapezprofil für das Hochwasser von 2002

### 4.5.1. Vergleich der Ansätze

Tabelle 4.1 vergleicht das totale Geschiebevolumen der drei Hochwasserereignisse der Jahre 2002, 2005 und 2006 im betrachteten Abschnitt 5. Die Modelle zeigen Abweichungen über mehrere Zehnerpotenzen. Der Ansatz nach Wilcock & Crowe liegt an der unteren Grenze der Geophon-Messung und liefert vergleichsweise geringe Geschiebevolumina.

**Tabelle 4.1:** Geschiebevolumen der einzelnen Berechnungsansätze für das mittlere, dreiecksförmige Querprofil mit  $J_m$  und das trapezförmige Querprofil mit  $J_{min}$ . Angaben in  $m^3$

	HW 2002		HW 2005		HW 2006	
Abfluss	26'175		54'716		3'532	
Geophon Max	118		1'851		11	
Geophon Min	24		380		2	
Sohlgefälle	$J_m$	$J_{min}$	$J_m$	$J_{min}$	$J_m$	$J_{min}$
Rickenmann	3'067	1'179	6'552	2'702	413	157
Rickenmann (Formverlust)	379		1'078		50	
Meyer-Peter & Müller	20'801	1'958	73'085	3'350	2'582	270
Aguirre-Pe et al.	5'765	15'252	18'509	34'464	728	2'037
Wilcock & Crowe	12	10	20	16	2	1

### 4.5.2. Vergleich mit den Geophon-Messungen

Die Ganglinien des gemessenen Abflusses  $Q$  und der modellierten Geschiebetransporte  $Q_b$  verlaufen annähernd parallel. Hingegen zeigen die Geophonmessungen starke Schwankungen, welche durch den stossweisen Transport des Geschiebes entstehen. Gegenüber dem Geschiebe hat Wasser einen regelmässigeren Abfluss.

#### Mittleres Sohlgefälle

Für das mittlere Sohlgefälle mit Dreiecksprofil zeigen die Modelle von Wilcock & Crowe und Rickenmann mit Formverluste gute Resultate. Während das Modell von Wilcock & Crowe die minimalen Geschiebefrachten der Geophonmessung annähert oder etwas unterschätzt, überschätzt das Modell von Rickenmann mit Formverluste die maximalen Geschiebefrachten der Geophonmessungen. Die Differenz der minimalen und maximalen Geophonmessung beträgt rund eine Grössenordnung, zwischen den Modellen von Wilcock & Crowe und Rickenmann betragen die Differenzen etwas mehr als eine Grössenordnung.

Die Modelle von Aguirre-Pe und Rickenmann (ohne Formverluste) liefern ähnliche Resultate. Im Vergleich zu den Geophonmessungen liegen diese Modellresultate rund zwei Grössenordnungen über den maximalen Geophonmessungen.

Das Modell von Meyer-Peter & Müller liefert einen Geschiebeabfluss, der knapp drei Grössenordnungen grösser ist als die maximalen Geophonmessungen.

## Minimales Sohlgefälle

Beim minimalen Sohlgefälle und dem Trapezprofil nähert das Modell von Wilcock & Crowe die minimalen Geschiebefrachten der Geophonmessung gut an. Die Modelle von Rickenmann und Meyer-Peter & Müller zeigen ähnliche Resultate, die rund zwei Größenordnungen über den Geophonmessungen liegen. Das Modell von Aguirre-Pe liegt rund drei Größenordnung über den maximalen Geophonmessungen und erreicht die Größenordnung des Reinwasserabflusses  $Q$ .

## 4.6. Diskussion

Grundsätzlich zeigen alle Ansätze einen ähnlichen Verlauf des Geschiebetransports, was daran liegt, dass alle abhängig vom Abfluss  $Q$  resp. der  $h$ - $Q$ -Beziehung sind. Die  $h$ - $Q$ -Beziehung beim minimalen Sohlgefälle ist gemäss Kapitel 3.4 mit einer Unsicherheit behaftet.

Steigt der Abfluss, nimmt tendenziell auch der Geschiebetransport zu, was auf die höhere Schubspannung zurückgeführt werden kann. Das Hochwasserereignis 2005 wird nicht weiter berücksichtigt aufgrund der Tatsache, dass der maximal messbare Abfluss überschritten wurde und so keine aussagekräftigen Daten für die Modellierung zur Verfügung standen.

### 4.6.1. Vergleich der Ansätze

Im Vergleich zum Wasserabfluss wird das Geschiebevolumen der Modelle teilweise massiv überschätzt. Beim Modell nach Meyer-Peter & Müller für das mittlere Sohlgefälle stellen die Feststoffe mit rund 75% des Volumens den grössten Teil des Abflusses dar. Für das Modell nach Aguirre-Pe ist ein ähnliches Verhalten zu beobachten, jedoch nur beim minimalen Sohlgefälle.

### 4.6.2. Vergleich mit den Geophon-Messungen

Die Geophon-Messungen werden für die weiteren Betrachtungen als Referenzwert verwendet. Diese sind analog zur Abflussreduktion (vgl. Kap. 2.6) reduziert worden, wodurch sie mit einer Unschärfe behaftet sind. Die vorgenommene Korrektur zeigt kaum eine Auswirkung. Die Differenz der durch die Geophone ermittelten minimalen und maximalen Geschiebefrachten sind auf unterschiedliche Kalibrationen in ähnlichen Wildbächen zurückzuführen.

Eine Differenz der Geschiebefracht von einer Zehnerpotenz zwischen zwei Modellen kann als gut gewertet werden. Von den berechneten Ansätzen liegen die Ergebnisse von Wilcock & Crowe und Rickenmann innerhalb dieses Bereiches. Meyer-Peter & Müller und Aguirre-Pe liefern weit grössere Geschiebetransportraten. Diese Geschiebeabflüsse sind fast so gross wie der Wasserabfluss. Gemäss dieser Modelle besteht der Abfluss des Wildbaches fast zu 100% aus Geschiebe.

Für den untersuchten Abschnitt im Vogelbach liefern für das mittlere Sohlgefälle auch die Modelle von Rickenmann (ohne Formverlust) und Aguirre-Pe vergleichbare Resultate. Für das minimale Sohlgefälle sind die Modelle von Meyer-Peter & Müller und Rickenmann sehr ähnlich.

### 4.6.3. Einfluss von Bettstrukturen

Die Bettstrukturen üben durch eine Veränderung des Sohlgefälles und der Sohlenschubspannung (höhere Rauigkeit erhöht den Fließwiderstand) einen wesentlichen Einfluss auf den Geschiebetransport aus.

Beim Ansatz nach Rickenmann mit Formverlusten wird mit einem reduzierten Sohlgefälle ( $J_{red} = 0.04$ ) gerechnet, welches aufgrund der groben Bachkomponenten berücksichtigt wird. Dabei zeigt sich, dass im Dreiecksprofil die Geschiebefracht um rund eine Zehnerpotenz kleiner wird als ohne Formverluste und somit sehr gut mit der maximalen Geophon-Messung korreliert. Damit liegen Rickenmann mit reduziertem Sohlgefälle beim Dreiecksprofil und Rickenmann ohne Formverluste beim minimalen Sohlgefälle nahe beieinander (Faktor 3–5). Jedoch ist zu beachten, dass das reduzierte Sohlgefälle um einen Faktor 2.75 kleiner ist als das minimale resp. um 4.75 als das mittlere Sohlgefälle.

Beim Vergleich der beiden unterschiedlichen Querprofile (Dreieck und Trapez) und Sohlgefälle ( $J_{min}$  und  $J_m$ ) sind die Unterschiede kleiner als ursprünglich erwartet. Nach den Modellrechnungen weist das minimale Sohlgefälle tendenziell eine kleinere Geschiebefracht auf als das mittlere Sohlgefälle, was auf geringere Schubspannungen zurückzuführen ist. Das Modell von Aguirre-Pe bildet hier die Ausnahme; die Geschiebefracht für das minimale Sohlgefälle ist grösser als beim mittleren Sohlgefälle.

Wird der Formwiderstand nach Pagliara und Chiavaccini 2006 abgeschätzt, resultieren daraus Strickler-Beiwerte zwischen 3–5  $m^{1/3}/s$ . Diese Werte sind für einen Wildbach eher tief<sup>1</sup>. Zusammenfassend sollte der Formwiderstand dennoch berücksichtigt werden, weil in Wildbächen die Grobkomponenten einen grossen Einfluss auf Abfluss und somit Geschiebetransport haben.

---

<sup>1</sup>Vorlesungsnotiz Hang- und Wildbachverbau von A. Böll: Strickler-Beiwert für Wildbäche  $\sim 20 m^{1/3}/s$

## 5. Schlussfolgerung

Der Geschiebetransport in einem Wildbach lässt sich nur sehr grob abschätzen. Einerseits liegt das daran, dass die Bachbettgeometrie nach einem Hochwasserereignis komplett neue Abmessungen aufweisen kann, womit sich das Abflussverhalten und die Randbedingungen verändern; andererseits gehen die verwendeten Gleichungen von einer Limitierung der Transportkapazität aus, die nicht immer erreicht wird. Der Geschiebetransport wird zusätzlich durch Schwemmholz und grosse Blöcke behindert. Die Bachbettgeometrie lässt sich zudem nur ungenügend beschreiben.

Für die Bestimmung des Geschiebetransports lohnt es sich sowohl die Grundlagendaten des Bachbetts und der Hydrologie sorgfältig zu erheben wie auch verschiedene Ansätze (unter Berücksichtigung des Gültigkeitsbereichs bezüglich Sohlgefälle) vergleichend zu verwenden, um damit eine Grössenordnung des Geschiebetransports zu erhalten. Wenn möglich sollten die Ansätze in einem morphologisch ähnlichem Gebiet kalibriert worden sein.



## Literatur

- Aguirre-Pe, Julian u. a. (2003). „Particle Densimetric Froude Number for Estimating Sediment Transport“. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 129, S. 428–437.
- Bezzola, Gian Reto (FS 2010). *Vorlesungsmanuskript Flussbau*. ETH Zürich.
- Bunte und Abt (2001). *Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring*. Chapter 2. USDA Forest Service.
- Lamb, Michael P. u. a. (2008). „Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope?“ In: *Journal of Geophysical Research* 113, F02008. DOI: 10.1029/2007JF000831.
- Pagliara, Stefano und Pietro Chiavaccini (Juni 2006). „Flow Resistance of Rock Chutes with Protruding Boulders“. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 132, S. 545–552.
- Rickenmann, D. und B. W. McArdell (2007a). „Calibration of piezoelectric bedload impact sensors in the Pitzbach mountain stream“. In: *Geodinamica Acta* 21, S. 53–52.
- (2007b). „Continuous measurement of sediment transport in the Erlenbach stream using piezoelectric bedload impact sensors“. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 32, S. 1362–1378.
- Rickenmann, D. u. a. (2006). *SETRAC - A sediment routing model for steep torrent channels*. Hrsg. von Leal & Cardoso (eds) Ferreira Alves. River Flow 2006. Taylor & Francis Group, London, S. 843–852.
- Rickenmann, Dieter (1996). „Fließgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen“. In: *wasser, energie, luft - eau, énergie, air* 88. Jahrgang. Heft 11/12, S. 298–304.
- (Dez. 2001). „Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams“. In: *Water Resources Research* 37.12, S. 3295–3305.
- Wilcock, Peter R. und Joanna C. Crowe (2003). „Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment“. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 129, S. 120–128.
- Wong, Mugel und Gary Parker (2006). „Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database“. In: *Jour* 132, S. 1159–1168.
- Wu, Weiming und Sam S. Y. Wang (2006). „Formulas for Sediment Porosity and Settling Velocity“. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 132, S. 858–862.

## A. Linienprobe

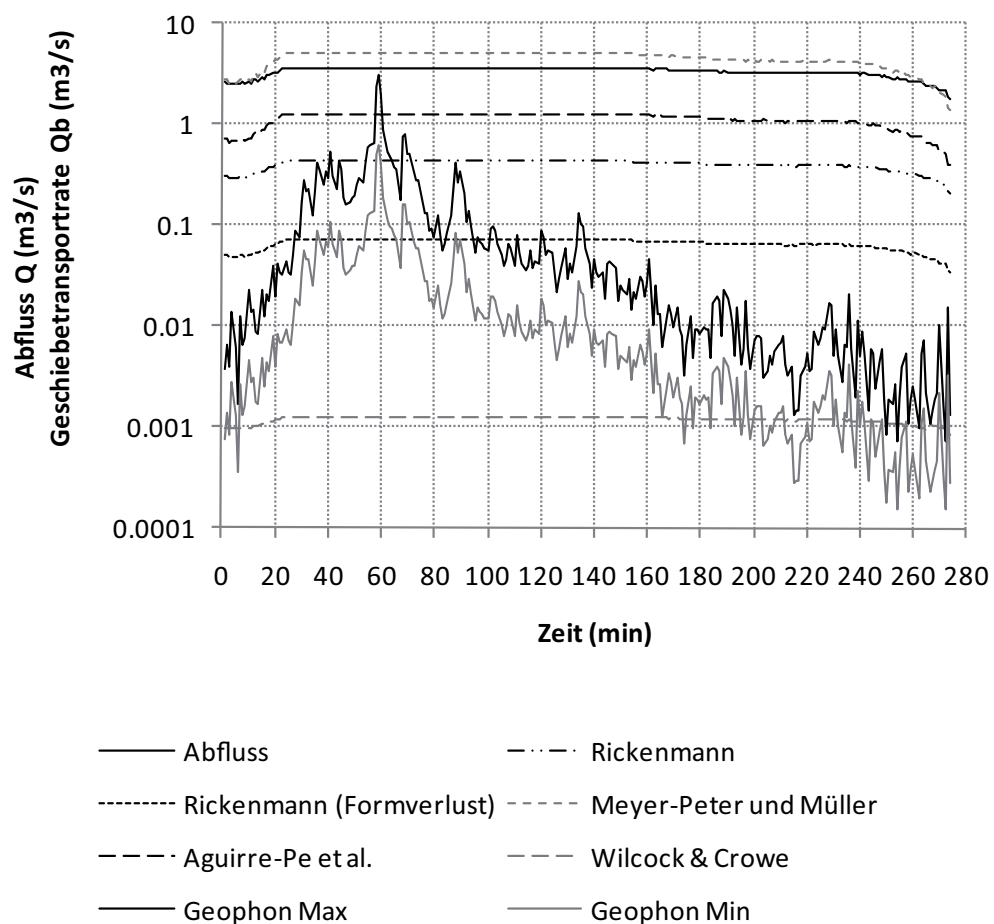
**Tabelle A.1:** Linienprobe bei den Profilen 5.0, 5.1, 5.2 und 5.3

Standort	5.0		5.1		5.2		5.3	
Fraktionen [cm]	n	D %	n	D %	n	D %	n	D %
<1	102	56.7	80	44.7	80	55.9	50	42.7
1-2	24	13.3	44	24.6	22	15.4	41	35.0
2-3	11	6.1	10	5.6	9	6.3	15	12.8
3-4	13	7.2	9	5.0	7	4.9	8	6.8
4-5	13	7.2	15	8.4	11	7.7	3	2.6
5-8	7	3.9	7	3.9	6	4.2		0.0
8-10	2	1.1	8	4.5	2	1.4		0.0
10-12	2	1.1		0.0		0.0		0.0
12-15	4	2.2	2	1.1	2	1.4		0.0
15-20	1	0.6	3	1.7	1	0.7		0.0
20-25		0.0	1	0.6	1	0.7		0.0
25-30		0.0		0.0	1	0.7		0.0
30-35	1	0.6		0.0	1	0.7		0.0
35-40		0.0		0.0		0.0		0.0
40-50		0.0		0.0		0.0		0.0
50-60		0.0		0.0		0.0		0.0
60-80		0.0		0.0		0.0		0.0
80-100		0.0		0.0		0.0		0.0
100-120		0.0		0.0		0.0		0.0
120-150		0.0		0.0		0.0		0.0
150-200		0.0		0.0		0.0		0.0
>200		0.0		0.0		0.0		0.0
<b>Summe</b>	180	100	179	100	143	100	117	100
d_max	35		25		35		6	

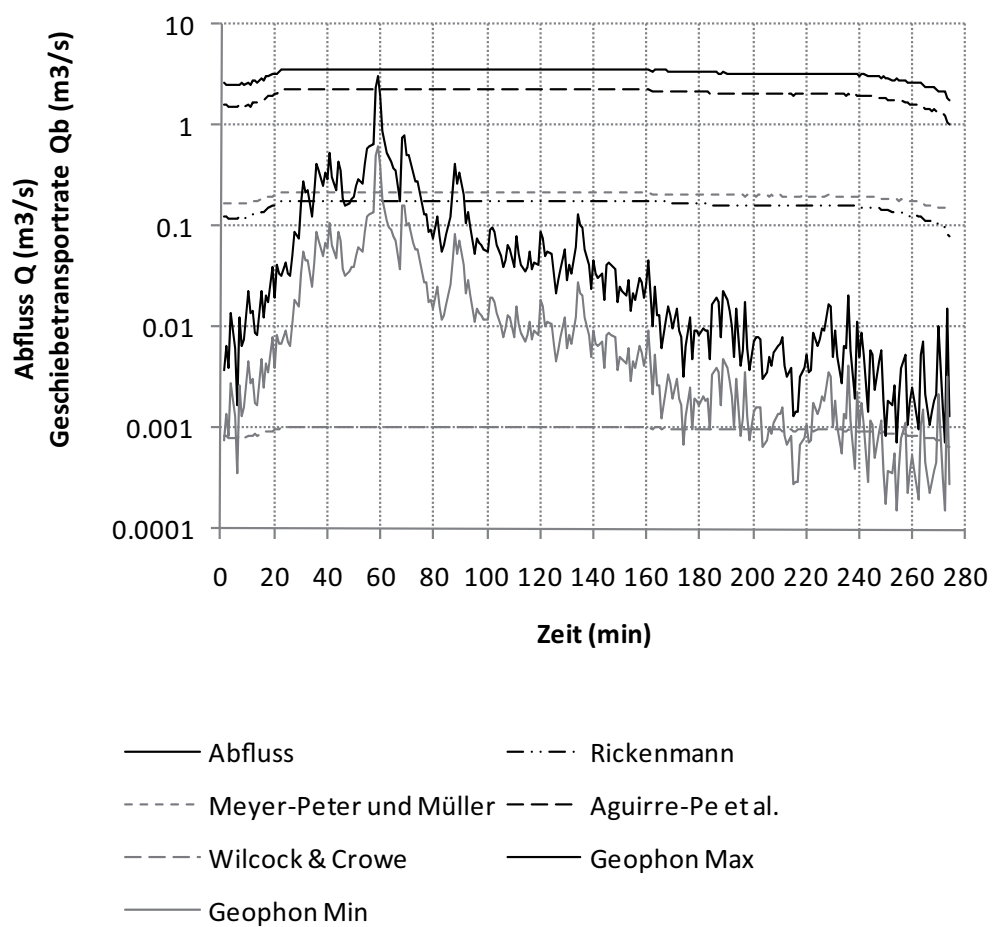


## B. Geschiebetransport

### B.1. Hochwasser 2005

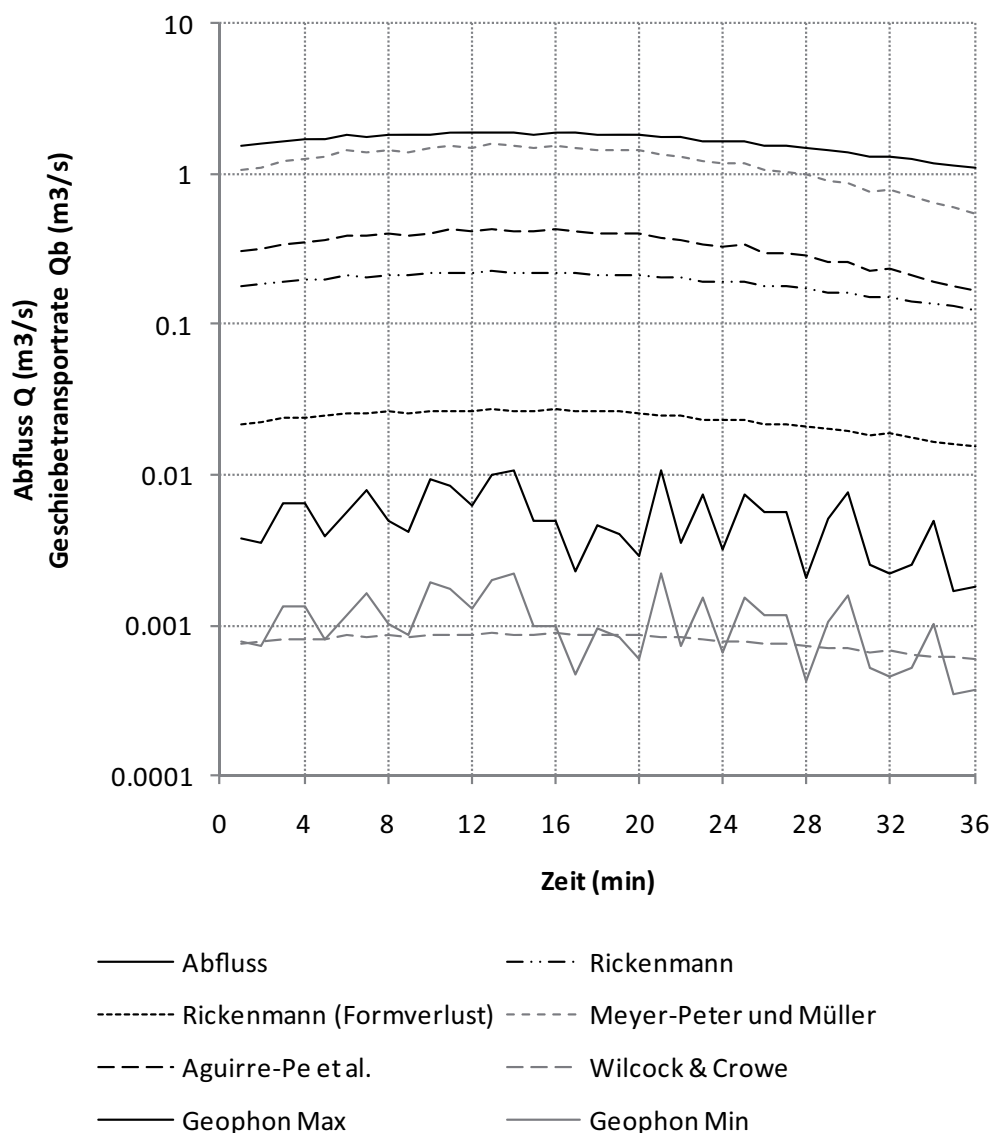


**Abbildung B.1:** Abfluss  $Q$  und Geschiebetransportrate  $Q_b$  für das mittlere Sohlgefälle im Dreiecksprofil für das Hochwasser von 2005

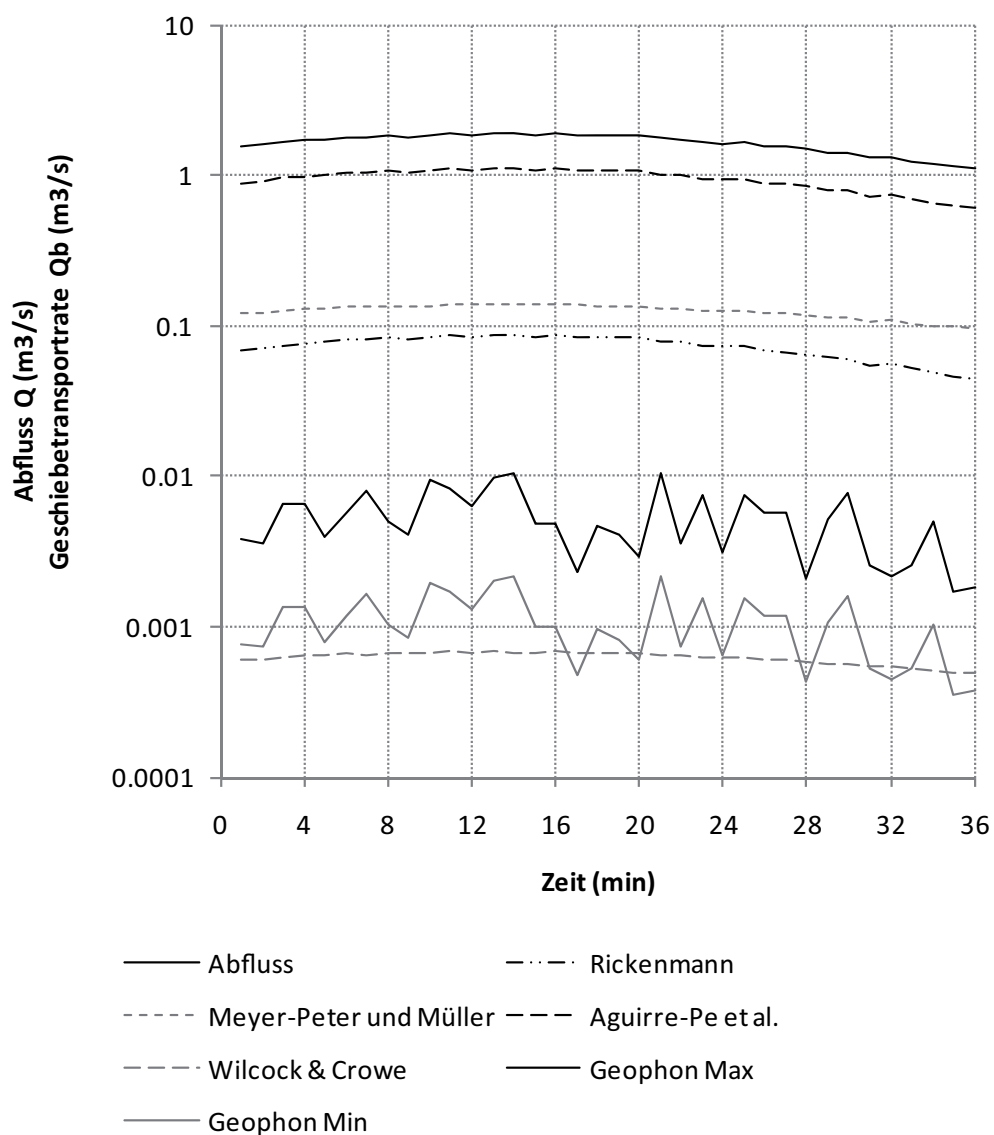


**Abbildung B.2:** Abfluss  $Q$  und Geschiebetransportrate  $Q_b$  für das minimale Sohlgefälle im Trapezprofil für das Hochwasser von 2005

### B.2. Hochwasser 2006



**Abbildung B.3:** Abfluss  $Q$  und Geschiebetransportrate  $Q_b$  für das mittlere Sohlgefälle im Dreiecksprofil für das Hochwasser von 2006



**Abbildung B.4:** Abfluss  $Q$  und Geschiebetransportrate  $Q_b$  für das minimale Sohlgefälle im Trapezprofil für das Hochwasser von 2006

## **C. Excel-Dateien**

### **C.1. Datengrundlage**

#### **420\_Querprofile\_vogelbach.xls**

Messdaten der Querprofile nach LiDAR (grossräumige Profile)

#### **420\_MessungenVogelbach\_Profil.xls**

Eigene Messdaten der Querprofile (detaillierte Profile)

#### **420b\_Linienprobe\_bearbeitung.xls**

Aufnahme und Bearbeitung der Linienproben (nach Schema Rickenmann)

#### **440\_EreignisseVogelbach.xls**

Die Daten (Abfluss und Geophon-Impulse) der Messstation 1.0

#### **900\_abschnittsgrenzen\_xyz\_koordinaten.xls**

Positionen der Abschnittsgrenzen

#### **900\_Längenprofile\_vogelbach.xls**

Längenprofil über alle Abschnitte

### **C.2. Datenaufbereitung**

#### **440\_Reduzierte\_Messdaten.xls**

Die Messdaten, reduziert auf den Abschnitt 5.0

#### **auswertungen\_ale.xls**

Berechnung der H-Q-Beziehungen nach Smart & Jäggi

**451b\_Fliessgeschwindigkeit.xls**

Berechnung der H-Q-Beziehungen nach Rickenmann und Vergleich zu Smart & Jäggi

**C.3. Auswertung, Berechnung****geschiebe\_rickenmann.xls**

Modellierung der Geschiebetransportraten nach Rickenmann ohne und mit Formverlust

**geschiebe\_mpm.xls**

Modellierung der Geschiebetransportraten nach Meyer-Peter & Müller

**Wilcock.xls**

Modellierung der Geschiebetransportraten nach Wilcock & Crowe

**Aguirre-pe.xls**

Modellierung der Geschiebetransportraten nach Aguirre-Pe et al

**geophone.xlsx**

Berechnung der spezifischen Geschiebetransportraten aus den Geophonmessungen

**Geschiebe\_Zusammenstellung2.xls**

Zusammenstellung aller Modelle und Vergleich