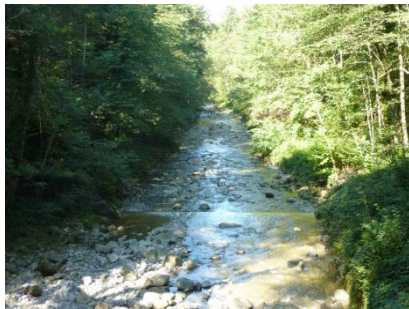


*Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)*

---

# **Abschätzung der mittleren jährlichen Geschiebelieferung in Vorfluter**



## **Praxishilfe**

Projekt A-691.1, V2.0

Juli 2014

## Impressum

### Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)  
Abteilungen Wasser, Gefahrenprävention, Hydrologie  
3003 Bern

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

### Auftragnehmer, Autoren

#### Methode Tal- und Gebirgsflüsse

Hunziker, Zarn & Partner AG  
Ingenieurbüro für Fluss- und Wasserbau  
Schachenallee 29  
5000 Aarau

Unter Mitarbeit von  
Dr. Roni Hunziker  
Dr. Andreas Niedermayr  
Andrea Irniger

Kontaktperson: Dr. Roni Hunziker  
Tel.: 062 - 823 94 61  
Mail: roni.hunziker@hzp.ch

#### Methode steile Gebirgsbäche

Dr. Christoph Lehmann  
Hydrologie – Wasserbau  
Moosstrasse 8a  
3322 Urtenen – Schönbühl

belop gmbh  
Dr. Eva Gertsch  
Monika Fässler, Marco von Glutz  
Ingenieure und Naturgefahrenfachleute  
Tulpenweg 2  
CH-6060 Sarnen

Kontaktperson: Dr. Christoph Lehmann  
Tel.: 031 - 859 46 81  
Mail: hydrologie@solnet.ch

### Projektleitung

Georg Heim, Bundesamt für Umwelt, ab 1.7.2013 GEOTEST AG, E-Mail: georg.heim@geotest.ch  
Manuel Nitsche, Abteilung Wasser, Bundesamt für Umwelt, E-Mail: manuel.nitsche@bafu.admin.ch

### Begleitgruppe

Manuel Epprecht, Abteilung Gefahrenprävention, Bundesamt für Umwelt, Ittigen  
Dr. Alessandro Grasso, Abteilung Hydrologie, Bundesamt für Umwelt, Ittigen  
PD Dr. Martin Jäggi, Flussbau und Flussmorphologie, Ebmatingen  
Manfred Kummer, Abteilung Wasser, Bundesamt für Umwelt, Ittigen  
Dr. Christian Marti, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Zürich  
Prof. Dr. Dieter Rickenmann, Eidg. Forschungsinstitut für Wald, Schnee, Landschaft WSL, Birmensdorf  
Prof. Dr. Manfred Spreafico, Abteilung Hydrologie, Bundesamt für Umwelt, Ittigen  
Dr. Markus Zimmermann, NDR Consulting GmbH, Thun

### Hinweis

Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

**Gliederung des Berichtes**

**Teil 1 Einleitung (Kapitel 1)**

**Teil 2 Anwendung der Methoden (Kapitel 2 – 4)**

**Teil 3 Erläuterungen zu den Methoden (Kapitel 5 – 7)**

**Literaturverzeichnis**

**Abkürzungsverzeichnis**

**Datentabellen**

## Inhalt

1	Einleitung .....	1
1.1	Relevanz der Praxishilfe für die Sanierung des Geschiebehaushalts .....	1
1.2	Ziele und Zielgruppen .....	2
1.3	Genauigkeit der Methoden .....	2
2	Vorbereitung.....	3
2.1	Wahl der Berechnungsmethode .....	3
2.2	Definition der relevanten Gerinne eines Einzugsgebiets.....	3
3	Methode für Tal- und Gebirgsflüsse .....	4
3.1	Einführung.....	4
3.2	Abflussdauerkurve.....	5
3.3	Berechnung der Geschiebefrachten .....	10
4	Methode der steilen Gebirgsbäche .....	20
4.1	Übersicht über das Vorgehen.....	20
4.2	Erhebung der Geschiebefrachten.....	22
4.3	Verluste auf dem Kegel oder auf einer Flachstrecke .....	28
4.4	Bilanzierung bis Vorfluter .....	30
4.5	Berechnung der mittleren jährlichen Geschiebefracht in den Vorfluter .....	30
4.6	Kontrolle des Ergebnisses .....	30
5	Erläuterungen zur Bestimmung der Abflussdauerkurve .....	32
5.1	Funktion.....	32
5.2	Auswertung von Messstationen zur Ermittlung der Parameter A bis D .....	33
5.3	Absolute mittlere Dauerlinien.....	44
5.4	Genauigkeit.....	44
6	Erläuterungen zur Methode für Tal- und Gebirgsflüsse.....	46
6.1	Entwicklung der Methode.....	46
6.2	Diskussion der Methode.....	48
6.3	Anwendungsbeispiel.....	52
7	Erläuterungen zur Methode der steilen Gebirgsbäche .....	59
7.1	Entwicklung der Methode.....	59
7.2	Diskussion der Methode.....	61
7.3	Anwendungsbeispiel.....	62

# Teil 1 Einleitung

## 1 Einleitung

### 1.1 Relevanz der Praxishilfe für die Sanierung des Geschiebehaushalts

Kraftwerke, Kiesentnahmen, Gewässerverbauungen und andere Anlagen beeinflussen den Geschiebehaushalt in vielen Schweizer Fliessgewässern. Dadurch können die einheimische Tier- und Pflanzenwelt, der Grundwasserhaushalt und der Hochwasserschutz wesentlich beeinträchtigt werden.

**Gewässerschutzgesetz:** Durch das revidierte Gewässerschutzgesetz (GSchG) werden die Inhaber dieser Anlagen bei bestehender Beeinträchtigung verpflichtet, den Geschiebehaushalt zu sanieren. Die Kantone sind verantwortlich, die wesentlichen Beeinträchtigungen der Geschiebeführung und die verursachenden Anlagen zu definieren. Sie werden dabei vom Bund durch die Vollzugshilfe „Renaturierung der Gewässer“ mit dem Modul „Strategische Planung Sanierung Geschiebehaushalt“ unterstützt.

**Wasserbaugesetz:** Anlagenbedingte Veränderungen der Geschiebeführung können Erosions- und Auflandungsprozesse hervorrufen und damit Hochwasserschutzdefizite generieren oder diese verschärfen. Das Bundesgesetz über den Wasserbau (WBG) bezweckt den Schutz von Menschen und erheblichen Sachwerten vor schädlichen Auswirkungen des Wassers, insbesondere vor Überschwemmungen.

Um die erwähnte Beeinträchtigung des Geschiebehaushaltes und den Einfluss auf den Hochwasserschutz zu beurteilen, müssen die Geschiebeeinträge der Seitenbäche in die Vorfluter abgeschätzt werden. Es existieren etablierte feld- und schreibtisch-basierte Methoden zur Abschätzung des Geschiebepotenzials in Einzugsgebieten und zur Ermittlung ereignisbezogener Geschiebefrachten am Kegelhals. Für die Abschätzung der mittleren jährlichen Geschiebelieferung in einen Vorfluter, welche zur Erfüllung der Forderungen der Wasserbau- und der Gewässerschutzverordnung bekannt sein muss, existieren aber keine entsprechenden Methoden.

Das BAFU (Abteilungen Wasser, Gefahrenprävention und Hydrologie) hat aus diesem Grund zusammen mit privaten Ingenieurbüros, Forschungsvertretern und kantonalen Fachkräften die vorliegende Praxishilfe entwickelt. Diese zeigt zwei Methoden zur Bestimmung der mittleren jährlichen Geschiebefrachten auf.

**Methoden der Praxishilfe:** Die Methode der Tal- und Gebirgsflüsse ermöglicht Geschiebeabschätzungen mittels der Berechnung der Transportkapazität für Gerinnegefälle bis maximal 10 %.

Die Methode der steilen Gebirgsbäche ermittelt die Geschiebelieferung in Vorfluter für Gerinne steiler als 10 % Gefälle anhand von Ereignisfrachten und der Umrechnung in mittlere jährliche Frachten.

## **1.2 Ziele und Zielgruppen**

Die Praxishilfe stellt eine wichtige Grundlage für die Massnahmenplanung zur Sanierung des Geschiebehaushaltes dar. Sie umfasst eine Anleitung, um mittels Auswertung verfügbarer Geodaten und einer punktuellen Geländebegehung mit verhältnismässigem Aufwand die Grössenordnung von mittleren jährlichen Geschiebelieferungen in Vorfluter abschätzen zu können. Die Resultate sollen zudem zur Plausibilisierung von Geschiebehaushaltsstudien herangezogen werden können.

Die Praxishilfe zeigt alle notwendigen Schritte zur Felderhebung und zur Berechnung der Geschiebefrachten auf. Die Interpretation der Ergebnisse verlangt aber fundierte Kenntnisse auf dem Gebiet des Geschiebetransportes. Von daher richtet sich die Praxishilfe an Fachkräfte mit entsprechenden Kenntnissen.

## **1.3 Genauigkeit der Methoden**

### **1.3.1 Genauigkeit der Methode Tal- und Gebirgsflüsse**

Die Untersuchungen zeigten, dass mit der Methode die Referenzwerte gut reproduziert werden können, wobei zu berücksichtigen ist, dass bei Geschiebefrachtberechnungen immer von einer grossen Bandbreite ausgegangen werden muss und dass auch die Referenzwerte keine absolut wahren Werte darstellen. Mit der Methode wurden mehrheitlich Abweichungen zu den Referenzwerten mit Faktor  $< 3$  erreicht.

Um die Genauigkeit der in einem Seitenbach berechneten Geschiebefracht zu erhöhen, muss diese mit den berechneten oder beobachteten Frachten in anderen Seitenbächen verglichen werden. Die berechneten Frachten müssen zudem auf den Geschiebehaushalt im Vorfluter abgestimmt werden. Insgesamt kann so in einem iterativen Prozess ein plausibles Bild des Geschiebehaushalts des Gesamteinzugsgebietes entworfen werden. Wenn immer möglich, müssen die berechneten Frachten anhand von Sohlenveränderungen oder Kiesentnahmen verifiziert werden.

### **1.3.2 Genauigkeit der Methode steile Gebirgsbäche**

Die Methodik wurde von Fachkräften der beiden verfassenden Büros getestet und die Ergebnisse mit bestehenden Geschiebestudien verglichen. Als Fazit des Validierungsdurchgangs können folgende Punkte festgehalten werden:

Bezüglich der Abschätzungen der Ereignisfrachten am Kegelhalbs ergaben sich zwischen den Fachkräften Unterschiede. Die Differenz lag jedoch immer bei einem Faktor unterhalb 2 und damit innerhalb einer akzeptablen Bandbreite.

## Teil 2 Anwendung der Methoden

### 2 Vorbereitung

#### 2.1 Wahl der Berechnungsmethode

Für jeden geschieberelevanten Seitenbach muss entschieden werden, welche der beiden vorgestellten Methoden angewendet werden soll. Der Entscheid für die Methode wird primär aufgrund des Gefälles im Mündungsbereich zum Vorfluter getroffen.

Bei Bächen mit Längsgefällen im Mündungsbereich zum Vorfluter von < 10 % wird in der Regel die „Methode für Tal- und Gebirgsflüsse“ angewendet, bei Bächen > 10 % Gefälle die Methode "Geschiebeabschätzung in steilen Gebirgsbächen".

Die Methode für Tal- und Gebirgsflüsse ist ausserdem besser für Gebiete geeignet, in denen die Transportkapazität des Gewässers massgebend für den Geschiebetransport ist. Bei geschiebelimitierenden Bedingungen empfiehlt sich eher die Methode für steile Gebirgsbäche. Eine Kombination beider Methoden ist insbesondere dann zu empfehlen, wenn die erstgewählte Methode wenig plausible Ergebnisse liefert.

#### 2.2 Definition der relevanten Gerinne eines Einzugsgebiets

Um die Geschiebeführung eines Vorfluters ermitteln zu können, müssen die relevanten Geschiebezulieferer bekannt sein. Die Triage relevanter Seitengerinne kann vereinzelt mittels Karten und Orthofotos (z.B. auf map.admin.ch) erfolgen. Falls bei guter Einsehbarkeit ins Gerinne keine Spuren von aktivem Geschiebetransport bis in den Vorfluter sichtbar sind, wird das Seitengerinne als NICHT RELEVANT identifiziert. Wenn die Spuren deutlich für aktiven Geschiebetransport sprechen, wird das Gerinne als RELEVANT beurteilt. Bei Unsicherheiten ist die Relevanz im Gelände (Mündungsbereich in Vorfluter) zu beurteilen.

Tab. 1 Abgrenzkriterien für relevante Seitenbäche

Seitenbach nicht relevant	Seitenbach relevant
➤ Keine Geschiebespuren im Mündungsbereich zum Vorfluter	➤ Aktive Geschiebespuren im Gerinne
➤ Kein Delta im Vorfluter	➤ Delta im Vorfluter, allenfalls Abdrängen des Vorfluters
➤ Deutliche Gefällsverflachung im Kegelbereich	➤ Keine deutliche Gefällsverflachung im Kegelbereich
➤ See vor Einmündung in den Vorfluter	➤ Kegelbildung des Bachs

### 3 Methode für Tal- und Gebirgsflüsse

#### 3.1 Einführung

**Prinzip:** Die Geschiebefrachten in einem Fließgewässer werden entweder durch die Transportkapazität oder durch den Geschiebeeintrag limitiert. Wenn sich das Gewässer bezüglich des Geschiebehaushaltes langfristig mehr oder weniger in einem Gleichgewichtszustand befindet, kann mit einer Transportberechnung auf die gesuchte Fracht geschlossen werden. Dazu wird eine Referenzstrecke vor der Mündung des Gewässers in den Vorfluter ausgesucht. Die Referenzstrecke sollte folgende Eigenschaften aufweisen:

- Strecke mit möglichst geringem Gefälle
- kleine Streuung der an der Oberfläche sichtbaren Kornverteilungen
- Abschnitt mit einheitlicher Sohlenbreite

Aus Luftbildern und Höhenmodellen können Breite und Neigung der Referenzstrecke ermittelt werden. Die Korngrößenverteilung muss im Gelände erhoben werden. Mit diesen Parametern wird anschliessend die Transportkapazität berechnet.

**Stand der Methode:** Die vorgeschlagene Methode der Transportkapazität basiert auf einem Verfahren zur Ermittlung von Geschiebefrachten (beschrieben in Bezzola, 2013). Neu an der Methode sind:

- die Vorgabe konkreter und auf verschiedene Gefällsverhältnisse optimierter Eingabeparameter und Formeln
- die Verwendung mittlerer jährlicher Abflussdauerkurven und die Berechnung mittlerer jährlicher Frachten anstelle von Ereignisfrachten. Die Umrechnung von Ereignisfrachten auf Jahresfrachten entfällt.
- Der Verzicht auf die Unterscheidung zwischen maximaler (ohne Deckschichtbildung) und minimaler (mit Deckschichtbildung) Fracht. Die Transportkapazität wird aufgrund der gemessenen Kornverteilung an der Sohlenoberfläche bestimmt.

**Anwendung:** Die Methode bietet die Möglichkeit, mit wenig Feldarbeit sowie mit Hilfe von GIS-basierten Daten die Geschiebefrachten in den Seitenbächen und in den Vorflutern zu ermitteln.



### 3.2 Abflussdauerkurve

Für Frachtberechnungen sind nebst der Hydraulik und der Geschiebezusammensetzung auch die Abflüsse resp. deren Häufigkeit und Dauer entscheidend. Das Abflussverhalten wird im Rahmen der vorliegenden Methodik über eine **mittlere jährliche Dauerkurve** erfasst.

Häufig werden an den zu untersuchenden Gewässern keine Abflussmessungen vorliegen. Für diesen Fall wurde folgendes Verfahren entwickelt, um repräsentative mittlere Abflussdauerkurven zu generieren (vgl. Kapitel 5):

<p><b>1. Grundlagen- erhebung</b></p>	<p><b>1)</b> Definition des Gebietsauslasses und Abgrenzung des Einzugsgebiets mit Bestimmung folgender Parameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einzugsgebietsfläche <math>A_{EZG}</math> (in <math>km^2</math>)</li> <li>• Fließstrecke <math>L_k</math> (in m), von der Wasserscheide (in der Flucht des Hauptgerinnes) bis zum Gebietsauslass (vgl. Abb. 1)</li> <li>• Länge <math>L</math> (in km) des Einzugsgebiets - dies ist die Distanz vom entferntesten Punkt des Einzugsgebiets bis zum Gebietsauslass (vgl. Abb. 1)</li> <li>• Formfaktor nach Horton <math>ff = A_{EZG}/L^2</math> (-)</li> <li>• Konzentrationszeit <math>t_k</math> (in h) mit <math>v_m = 1</math> m/s</li> </ul>
	$t_k = \frac{L_k}{v_m} \cdot \frac{1}{3600} + 0.5$
	<p>Abb. 1 Skizze zur Definition von <math>L</math> und <math>L_k</math></p>

	<p><b>2)</b> Zuordnung des Abflussregimes (glacial, nival oder pluvial) in Abhängigkeit von der mittleren Höhenlage, Region und Vergletscherung.</p> <hr/> <p><b>3)</b> Erhebung der Niederschlagskenngrößen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• mittlerer jährlicher Gebietsniederschlags <math>P_{\text{Jahr}}</math> (in mm) aus der HADES-Karte 2.2</li> <li>• Starkniederschlagswerte einer Jährlichkeit von 2.33 a aus der HADES-Karte 2.4 resp. 2.4<sup>2</sup> (in mm)</li> <li>• Aus den Punktniederschlagswerten für Regendauern von 1 h und 24 h wird anhand der Extremalverteilung (vgl. HADES-Erläuterungen zur Karte 2.4) die Niederschlagshöhe <math>N_{\text{Punkt},t_k}</math> (in mm) eines 2.33 jährlichen Punktniederschlags der Dauer <math>t_k</math> bestimmt.</li> <li>• Aus dem Punktniederschlag <math>N_{\text{Punkt},t_k}</math> wird der mittlere Gebietsniederschlag <math>N_{\text{Gebiet},t_k}</math> (in mm) abgemindert. Hierbei werden die Einzugsgebietsfläche <math>A_{\text{EZG}}</math> (km<sup>2</sup>) und die Niederschlagsdauer (im vorliegenden Fall <math>t_k</math>) berücksichtigt.</li> </ul> $N_{\text{Gebiet},t_k} = N_{\text{Punkt},t_k} \cdot e^{-\omega A_{\text{EZG}}^{0.59}}$ $\omega = 0.0447 \cdot \frac{\overline{Ni}_{\text{Gebiet},t_k}}{60} + 0.0026$ <p><math>\overline{Ni}_{\text{Gebiet},t_k}</math> (in mm/h) bezeichnet den Erwartungswert der Niederschlagsintensität des betrachteten Ereignisses. Die Lösung der beiden Gleichungen muss iterativ erfolgen:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>i. Annahme für <math>\overline{Ni}_{\text{Gebiet},t_k}</math> und Berechnung des Wertes für <math>\omega</math>.</li> <li>ii. Berechnung des Gebietsniederschlags <math>N_{\text{Gebiet},t_k}</math> und Bestimmung der zugehörigen Intensität <math>\overline{Ni}_{\text{Gebiet},t_k} = N_{\text{Gebiet},t_k}/t_k</math> (in mm/h).</li> <li>iii. Wiederholung des Schrittes i. mit der beim Schritt ii. berechneten Intensität, bis die Abweichung der Intensität zwischen der Annahme (i) und dem Ergebnis (ii) vernachlässigbar wird.</li> </ol>
--	--

	<p><b>4)</b> Bestimmung des Mittelwasserabflusses MQ, z.B. nach der Methodik Pfandler und Zappa (2006)<sup>1</sup>. Anschliessend erfolgt die</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Berechnung der Abflusshöhe (mm)  <math>A_Q = MQ / A_{EZG} * 31536</math></li> <li>• Ermittlung des Abflussbeiwerts (-)  <math>\psi = A_Q / P_{Jahr}</math></li> <li>• Bestimmung der Abflussspende (l/(s*km<sup>2</sup>))  <math>Mq = MQ / A_{EZG} * 1000</math></li> </ul> <p><b>5)</b> Ermittlung/Abschätzung der Niedrigwasserspende <math>q_{347}</math>, z.B. anhand: „Landeshydrologie und –geologie 1999: Die Abflussmenge <math>q_{347}</math> - Eine Standortbestimmung. Hydrologie Mitteilungen Nr. 27. Bern.“</p>
<p><b>2. Bestimmung der Funktionsparameter der normierten, mittleren Dauerkurve</b></p>	<p><b>D</b> Der Parameter D wird in Abhängigkeit des Abflussregimes und der Niedrigwasserspende (<math>q_{347}</math>) nach folgenden Formeln bestimmt:</p> <p>glacial: <math display="block">D = 0.0087 \cdot \frac{Ni_{Gebiet,tk}}{\sqrt{ff \cdot \psi}} + 0.600</math></p> <p>nival: <math display="block">D = 0.0087 \cdot \frac{Ni_{Gebiet,tk}}{\sqrt{ff \cdot \psi}} + 0.921</math></p> <p>pluvial (<math>q_{347} \leq 6 \text{ l/(s*km}^2\text{)}</math>) <math display="block">D = 0.0087 \cdot \frac{Ni_{Gebiet,tk}}{\sqrt{ff \cdot \psi}} + 0.792</math></p> <p>pluvial (<math>q_{347} &gt; 6 \text{ l/(s*km}^2\text{)}</math>) <math display="block">D = 0.0087 \cdot \frac{Ni_{Gebiet,tk}}{\sqrt{ff \cdot \psi}} + 0.678</math></p> <p><b>A</b> Anhand von D kann der Parameter A ermittelt werden:  <math display="block">A = -0.2261 * D + 0.0573</math></p> <p><b>B</b> Der Parameter B wird mit folgender Beziehung bestimmt:  <math display="block">B = 0.0067 \cdot \frac{q_{347}}{Mq} - 0.0036</math></p>

<sup>1</sup> Datensätze verfügbar unter [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch) > Themen > Hydrologische Daten > Mittlere monatliche und jährliche Abflusshöhen

**C** Der Parameter C wird indirekt, d.h. erst nach Festlegung des Erwartungswerts für MHQ, ermittelt.

Zunächst wird der absolute Wert für das MHQ anhand folgender drei Methoden a) bis c) abgeschätzt:

- a. Nach Auswertung der Messdaten von 76 Stationen ergab sich für das Verhältnis von  $MHQ/Q_{1d}$  eine eher geringe Bandbreite des Erwartungswerts. Nach vorgängiger Bestimmung von  $Q_{1d}$  (mittels des Parameters D) kann somit in Abhängigkeit des Abflussregimetyps die Grössenordnung von MHQ eingegrenzt werden.

	alle	glacial	nival	pluvial
Quantil (-)	MHQ/ $Q_{1d}$ (-)	MHQ/ $Q_{1d}$ (-)	MHQ/ $Q_{1d}$ (-)	MHQ/ $Q_{1d}$ (-)
1.00	2.67	2.67	2.32	2.41
0.75	2.02	2.06	1.89	1.95
0.50	1.79	1.90	1.55	1.68
0.25	1.49	1.74	1.29	1.48
0.00	1.17	1.20	1.17	1.30
Mittelwert	1.77	1.91	1.62	1.75

- b. Analog lässt sich auch für das Verhältnis von  $MHQ/HQ_{100}$  eine gewisse Bandbreite angeben. Mit Kenntnis des  $HQ_{100}$  kann daraus ein Erwartungswert für das MHQ abgeschätzt werden. Das  $HQ_{100}$  lässt sich, falls nicht aus Gefahrenkarten oder anderen Studien bereits Werte vorliegen, vereinfachend mit der Formel nach Kürsteiner oder mit  $HQx\_meso\_CH$  ( $A_{EZG} > 10 \text{ km}^2$ ) resp. HAKESCH ( $< 10 \text{ km}^2$ ) ermitteln.

	alle	glacial	nival	pluvial
Quantil	MHQ/ $HQ_{100}$	MHQ/ $HQ_{100}$	MHQ/ $HQ_{100}$	MHQ/ $HQ_{100}$
1.00	0.65	0.54	0.64	0.65
0.75	0.48	0.43	0.50	0.49
0.50	0.40	0.37	0.42	0.42
0.25	0.31	0.30	0.33	0.31
0.00	0.21	0.22	0.29	0.21
Mittelwert	0.40	0.38	0.43	0.40

- c. Analog dem Verfahren zur Bestimmung des Parameters D kann der C\*-Wert ermittelt werden. Der C\*-Wert entspricht dabei dem normierten und logarithmierten MHQ ( $C^* = \log(MHQ/MQ)$ ).

	<p>glacial <math>C^* = 0.0087 \cdot \frac{Ni_{Gebiet,tk}}{\sqrt{ff \cdot \psi}} + 0.813</math></p> <p>nival <math>C^* = 0.0087 \cdot \frac{Ni_{Gebiet,tk}}{\sqrt{ff \cdot \psi}} + 1.239</math></p> <p>pluvial (<math>q_{347} \leq 6 \text{ l/(s*km}^2\text{)}</math>) <math>C^* = 0.0087 \cdot \frac{Ni_{Gebiet,tk}}{\sqrt{ff \cdot \psi}} + 1.045</math></p> <p>pluvial (<math>q_{347} &gt; 6 \text{ l/(s*km}^2\text{)}</math>)  <math>C^* = 0.0087 \cdot \frac{Ni_{Gebiet,tk}}{\sqrt{ff \cdot \psi}} + 0.917</math></p> <p>Nach Bestimmung von <math>C^*</math> kann mit nachfolgender Gleichung das MHQ berechnet werden</p> $MHQ = 10^{C^*} \cdot MQ$ <p>Abschliessend, nachdem für MHQ anhand der drei Punkte a) bis c) ein Wert <u>gewählt</u> wurde, wird der zugehörige C-Wert berechnet:</p> $C = \left( \log\left(\frac{MHQ}{MQ}\right) - A \ln\left(\frac{1}{24}\right) - \frac{B}{24} - D \right) \cdot \frac{1}{24}$
<p><b>3. Synthese</b></p>	<p>Berechnung der absoluten mittleren Dauerkurve über:</p> $Q(t) = MQ \cdot 10^{A \cdot \ln(t) + B \cdot t + C \cdot \frac{1}{t} + D}$

### 3.3 Berechnung der Geschiebefrachten

#### 3.3.1 Übersicht

Die Methode umfasst folgende drei Hauptarbeitsschritte:

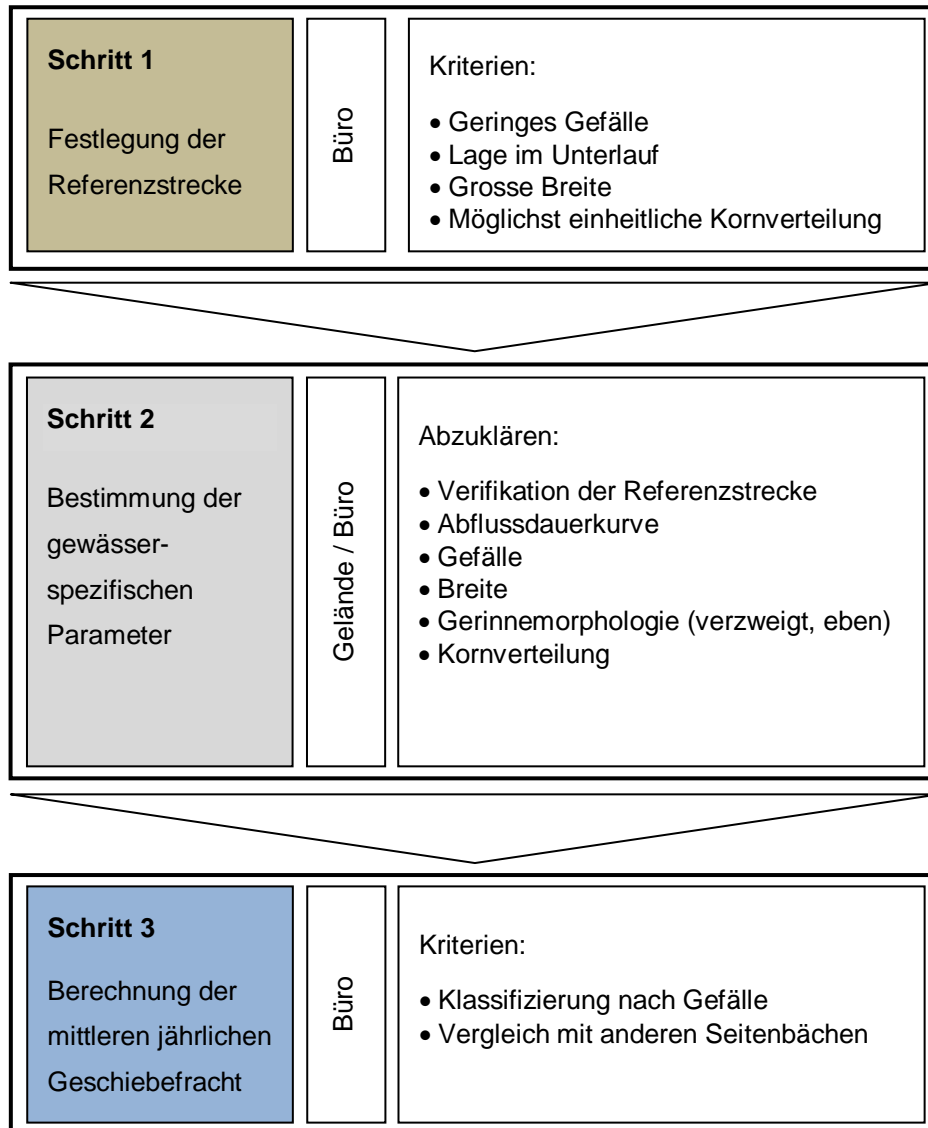


Abb. 2 Vorgehen bei der Berechnung der mittleren jährlichen Geschiebefrachten mit der Methode der Tal- und Gebirgsflüsse

#### 3.3.2 Schritt 1: Festlegung der Referenzstrecke

Der erste Schritt zur Festlegung der Referenzstrecke erfolgt im Büro. Dabei wird ein Längenprofil des zu untersuchenden Gewässers basierend auf den Datensätzen Swiss TLM3D und swissALTI3D erstellt. Ausgewählt wird ein Abschnitt, welcher im Unterlauf liegt und ein im Vergleich zum Pauschalgefälle geringes lokales Gefälle aufweist. Die Referenzstrecke sollte im Idealfall folgende Bedingungen erfüllen:

- Mindestlänge 100 m, respektive 10 – 20 \* Gerinnebreite
- es muss sich Normalabfluss einstellen
- die Sohlenveränderungen bei Hochwasser müssen gering sein
- die Sohlenbreite sollte im Vergleich zur mittleren Breite gross sein
- Spuren (Bänke, etc.) von aktivem Geschiebetransport müssen vorhanden sein.

Anschliessend wird in diesem Abschnitt mittels Orthofotos die Sohlenbreite bestimmt und geprüft, ob laufendes Geschiebe sichtbar ist. Schritt 1 ist abgeschlossen, wenn Lage und Ausdehnung der Referenzstrecke eindeutig definiert sind.

### 3.3.3 Schritt 2: Bestimmung der gewässerspezifischen Parameter

**Verifikation Referenzstrecke:** Die gewässerspezifischen Parameter in der Referenzstrecke werden im Gelände aufgenommen und anschliessend im Büro ausgewertet. Falls sich aufgrund der Begehung herausstellen sollte, dass sich die vorgesehene Referenzstrecke nicht als solche eignet, ist ein anderer Abschnitt zu wählen.

**Abflussdauerkurve:** Als nächstes wird die Abflussdauerkurve bestimmt (vgl. Kapitel 3.2)

**Gefälle:** Die Berechnungsansätze basieren auf der Annahme, dass sich in der untersuchten Strecke Normalabfluss einstellt. Aus diesem Grund kann das Energieliniengefälle mit dem Gefälle der Sohle gleichgesetzt werden.

Das Bruttogefälle (ohne Abzug von Abstürzen) wird vor der Begehung anhand des Längenprofils bestimmt. Im Gelände werden anschliessend die Absturzhöhen und deren Abstände ermittelt. Daraus kann dann das Nettogefälle (mit Abzug von Abstürzen) ermittelt werden. Die Berechnung der Transportkapazität erfolgt aufgrund des Nettogefälles.

Da die Flussachse des amtlichen Gewässernetzes vor allem bei kleinen Bächen nicht ganz genau mit dem Geländemodell übereinstimmt, muss das Längenprofil mittels Tiefenlinie des Höhenmodells oder händisch definiert werden.

**Flussbreite:** Bei einer Flussbettbreite kleiner als 15 m und angrenzender dichter Bewaldung wird eine Aufnahme der Breite im Gelände empfohlen. Weist das Gerinne eine grössere Breite auf, reicht die Genauigkeit der Breitenbestimmung mittels Orthofoto.

Für die Berechnung der Transportkapazität wird empfohlen, die Gerinnegeometrie durch ein Rechteckprofil anzunähern. Falls das Gerinne Inseln aufweist, ist die Summe der Teilgerinne ( $B_T$ ) massgebend (Abb. 3).

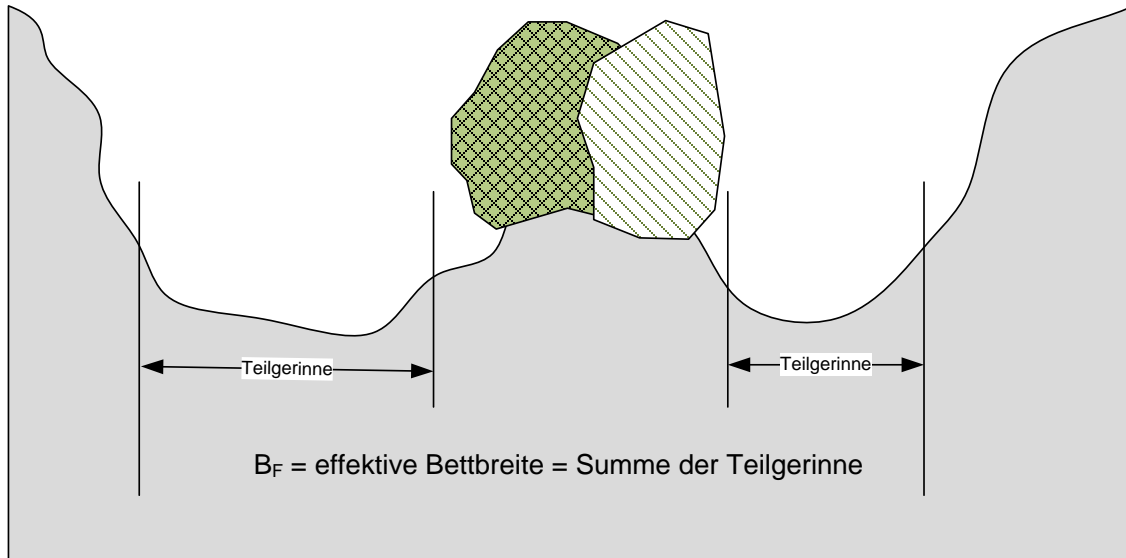


Abb. 3 Bettbreite bei Teilgerinnen

Je nach Flusscharakteristik werden zudem folgende beiden Fälle unterschieden:

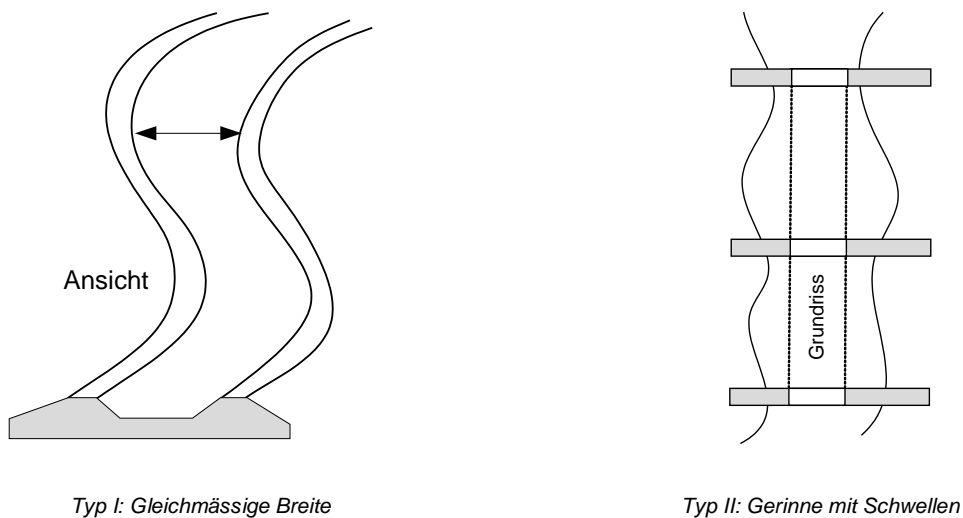


Abb. 4 Breite bei unterschiedlichen Gerinneformen

Falls die Breite über den gesamten Abschnitt konstant ist, wird sie durch die mittlere Sohlenbreite beschrieben (Typ I). Bei unregelmässigen Gerinnen mit stark variierender Breite ist ein Mittelwert zu wählen. Falls das Gewässer Schwellen mit kurzen Schwellenabständen aufweist, deren Überfallbreite schmaler ist als die Sohlenbreite in den Schwellenfeldern (Typ II), ist die Überfallbreite massgebend. Dabei wird angenommen, dass sich die Strömung bei kurzen Schwellenfeldern nicht über die gesamte Breite ausbilden kann.



**Gerinnemorphologie:** Die Gerinnemorphologie beschreibt die Strukturvielfalt der Sohle. Bei grossen Flussbettbreiten können sich Sohlenstrukturen ausbilden (Abb. 5), sodass sich Nieder- und Mittelwasser auf mehrere Gerinne aufteilen. Bei eingewachsenen Gerinnen ist nicht die gesamte Gewässerbreite, sondern die effektive Breite (vgl. Abb. 3) massgebend. Diese Teilgerinne führen dazu, dass die Transportkapazität grösser ist, als sie aufgrund der Transportformeln für ein breites Einzelgerinne zu erwarten wäre. Zur Berücksichtigung verzweigter Gerinne wird bei steilen Verhältnissen ( $> 1\%$ ) der Ansatz von Marti (2006) empfohlen. Dieser reduziert die abfluss- und transportwirksame Gewässerbreite als Funktion des mittleren Korndurchmessers, des Gefälles und des Abflusses (vgl. Gl.6 und Gl.7) für jeden Abflusszustand<sup>2</sup>. Anstelle des Ansatzes von Marti kann bei flachen Verhältnissen ( $< 1\%$ ) derjenige von Zarn (1997) verwendet werden.



a) Verzweigtes Gerinne ohne Bewuchs am Furnerbach (GR)



b) Verzweigtes Gerinne mit Bewuchs an der grossen Entle (LU)

Abb. 5 Zwei Beispiele für verzweigte Gerinne (Quelle: Swissimage)

**Kornverteilung:** Der charakteristische Korndurchmesser einer Kornverteilung definiert die Rauigkeit der Sohle sowie die Mobilität des Sohlmaterials und beeinflusst wesentlich die Transportkapazität. Die Ermittlung der Kornverteilung erfolgt anhand einer Linienzahlanalyse. Dazu wird empfohlen, an mindestens drei Stellen das für die Kornverteilung an der Sohlenoberfläche repräsentative Material zu beproben und für jede Probe die charakteristischen Korndurchmesser  $d_m$ ,  $d_{84}$   $d_{90}$  zu bestimmen<sup>3,4</sup>. Bei der Umrechnung der Linienzahlanalyse in eine Volumenprobe wird ein Feinanteil von ca. 25 % (Fuller-verteilt) berücksichtigt. Auf eine Umrechnung von einer Deck- in eine Unterschicht wird jedoch

---

<sup>2</sup> Bemerkung: Beim Ansatz von Marti wird auf die Reduktion des Gefälles zur Berücksichtigung der Sinuosität verzichtet.

<sup>3</sup> Der  $d_m$  bezeichnet den massgebenden mittleren Korndurchmesser nach Meyer-Peter und Müller (1948).

<sup>4</sup> Der charakteristische Korndurchmesser  $d_{90}$  (bzw.  $d_{84}$ ) ist derjenige Korndurchmesser, bei welchem 90% (Gewichtsanteil, bzw. 84 %) der Körner feiner sind.

verzichtet. Aus den drei Proben werden die Mittelwerte<sup>5</sup> gebildet, welche in die Berechnung der Geschiebefracht eingehen. Eine Alternative stellt das von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) entwickelte Verfahren BASEGRAIN dar. Dieses MATLAB-basierte Programm ermöglicht die Auswertung des Sohlmaterials anhand von Fotoaufnahmen und bietet damit eine Verringerung des Aufwands bei den Geländeaufnahmen. Die neueste Version von BASEGRAIN, Version 2.1, kann kostenlos unter <http://www.basement.ethz.ch/services/Tools/basegrain> heruntergeladen werden.

**Makrorauigkeit:** Bei steileren Verhältnissen befinden sich oft grosse Blöcke in der Sohle, welche morphologische Strukturen wie Stufen, Abstürze und Riegel bilden können (Abb. 6). Diese erhöhen den Fließwiderstand, verursachen Energieverluste und übernehmen einen Teil der wirkenden Schubspannungen, wodurch die Belastung auf die Sohle reduziert wird. Je grösser das Gefälle ist, desto grösser sind die durch die Makrorauigkeit induzierten Spannungsverluste. Grosse Blöcke, welche nicht Teil des Sohlenmaterials sind<sup>6</sup>, oder Becken-Absturz-Sequenzen geben Hinweise darauf, dass Makrorauigkeiten berücksichtigt werden müssen (Rickenmann & Recking, 2011). Es wird davon ausgegangen, dass Makrorauigkeiten bei Gefällen über 1 % zu erwarten sind und sie werden hier durch einen Exponenten  $b$  mit dem Wert 2.0 berücksichtigt. Die Untersuchungen zeigten, dass mit diesem Wert die Referenzwerte am besten nachgerechnet werden können.

---

<sup>5</sup> Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurde auch geprüft, ob die Sohlproben zuerst gemischt und erst anschliessend die charakteristischen Werte bestimmt werden sollten. Die resultierenden  $d_m$  und  $d_{90}$  unterschieden sich jedoch nicht wesentlich.

<sup>6</sup> Die im Flussbett vorhandenen Blöcke müssen sich in der Grösse vom Sohlmaterial unterscheiden. Grobes Sohlmaterial allein impliziert nicht, dass eine Makrorauigkeit berücksichtigt werden muss. Makrorauigkeiten sind dann zu erwarten, wenn eine bimodale Kornverteilung vorhanden ist.

**Keine Makrorauigkeit,  $b=0$**

Gleichförmiges Flussbett, mit ebener Kiessohle und ungestörter Strömung.



Grüne (BE)



Murg (TG)

**Mit Makrorauigkeit,  $b = 2$**

Grössere Einzelblöcke sowie kleinere Stufen-Becken-Systeme sichtbar.



Lonza (VS)

**Mit Makrorauigkeit,  $b = 2$**

Viele Einzelblöcke im Flussbett vorhanden und grosse Stufen-Becken-Systeme sichtbar.



Almagellerbach (VS)

Abb. 6 Beispiele für Makrorauigkeiten

### 3.3.4 Schritt 3: Berechnung der mittleren jährlichen Geschiebefracht

**Setup:** Zur Berechnung der mittleren jährlichen Geschiebefracht werden zwei Gefällsbereiche (<1 % und >1 %) unterschieden. In jedem dieser Gefällsbereiche wird eine spezifische Kombination von Berechnungsparametern und -verfahren vorgeschlagen (sogenanntes Setup).

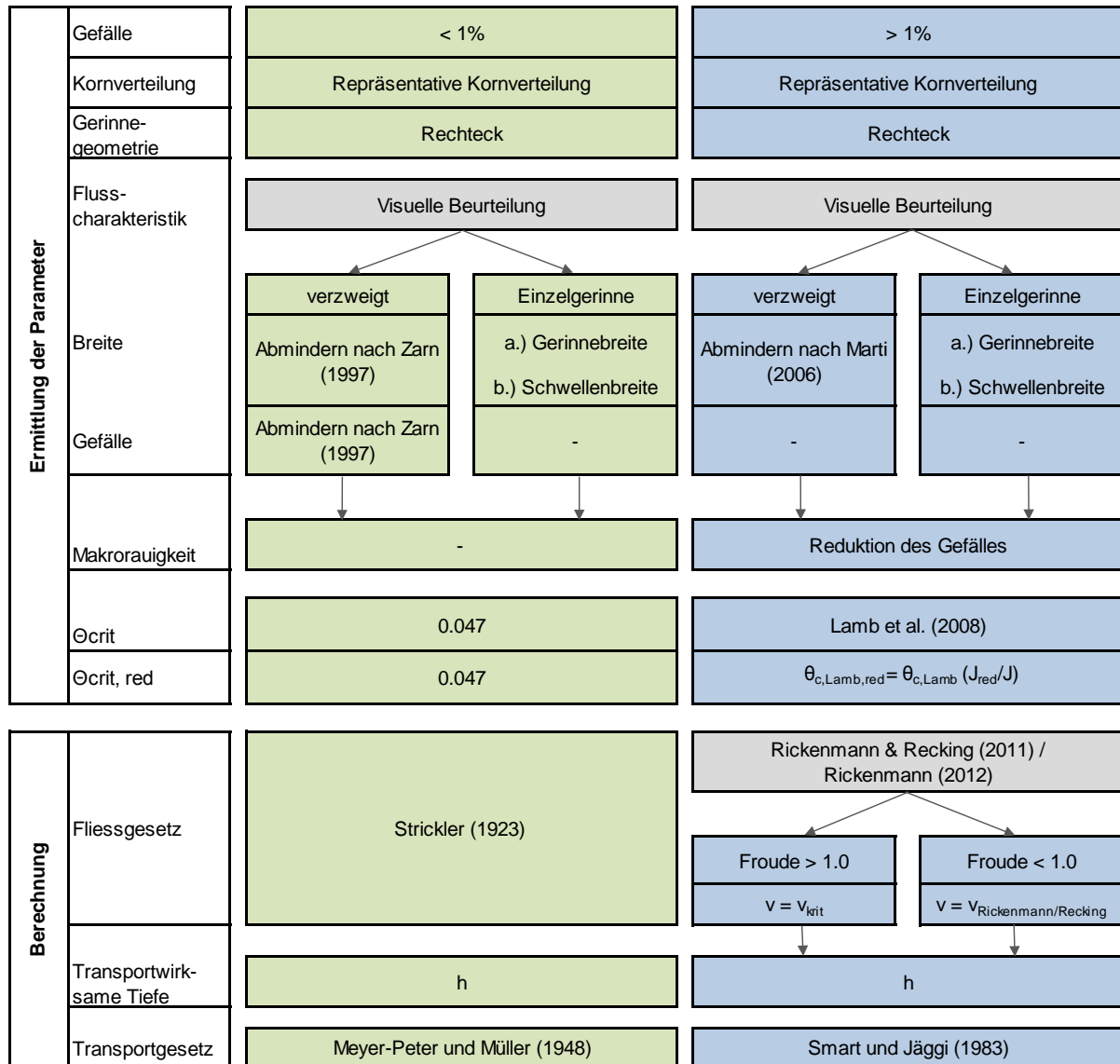


Abb. 7 Setup für die Eingabeparameter und die Berechnungsansätze zur Berechnung der mittleren jährlichen Geschiebefracht

**Formeln für Gewässer mit einem Gefälle < 1%**

Die Berechnung für Gerinne mit einem Gefälle < 1% wird durch die Gleichungen 1-5 beschrieben. Bei verzweigten Gerinnen wird die Breite und das Gefälle abgemindert und mit diesen modifizierten Werten die Transportkapazität berechnet.

**Fliessgesetz nach Strickler (1923)**

Gl.1	Mittlere Fliessgeschwindigkeit	$v_{m,Strickler} = k_{st} \cdot R_{hyd}^{2/3} \cdot J^{1/2}$
------	--------------------------------	--

**Reduktion von Gefälle und Breite nach Zarn (1997)**

Gl.2	Kontrolle, ob Korrektur nötig ist	$Y_{Zarn} = \frac{B_F}{h}$
		$Y_{Zarn} < 30 \rightarrow$ Keine Abminderung nötig
		$Y_{Zarn} > 400 \rightarrow Y_{Zarn} = 400$
		$30 < Y_{Zarn} < 400 \rightarrow$ Korrektur
Gl.3	Korrektur Gefälle	$S_{Zarn} = 1.087 - 0.087 \cdot e^{-0.011 \cdot Y_{Zarn}}$ $J_{Red,Zarn} = \frac{J}{S_{Zarn}}$
Gl.4	Korrektur Breite	$B_{W,Zarn} = 1.05 \cdot B_F \cdot e^{-0.0016 \cdot Y_{Zarn}}$

**Geschiebetransportkapazität nach Meyer-Peter und Müller (1948), modifiziert nach Hunziker (1995)**

Gl.5	Geschiebetransportkapazität	$G_B = 5 \cdot \frac{\sqrt{g} \cdot \rho_s \cdot B_w}{s - 1} [h \cdot J_{red} - \theta_c \cdot (s - 1) \cdot d_m]^{3/2}$
------	-----------------------------	--

**Formeln für Gewässer mit einem Gefälle > 1%**

Die Berechnung der Transportkapazität wird durch die Gleichungen 6-19 beschrieben. Analog zur Methode für Gewässer unter 1% wird die Breite bei verzweigten Gerinnen abgemindert und mit diesem Wert weitergerechnet. Die Fließgeschwindigkeit basiert auf dem Ansatz von Rickenmann & Recking (2011), wobei eine maximale Froudezahl von 1.0 zugelassen wird.

**Reduktion der Breite nach Marti (2006)**

Gl.6	Korrekturfaktor Breite	$M_{BW} = \frac{B_F^{0.65} \cdot d_m^{0.25} \cdot J^{0.3} \cdot g^{0.18}}{Q^{0.36}}$
Gl.7	Korrektur Breite	$B_{W,Marti} = B_F \cdot 1.19 \cdot e^{-0.6 \cdot M_{BW}}$

**Fließgesetz nach Rickenmann und Recking (2011)**

Gl.8	Dimensionsloser, spezifischer Abfluss	$q^{**} = \frac{q}{\sqrt{g \cdot J \cdot d_{84}^3}}$
Gl.9	Geschwindigkeit (mit Berücksichtigung aller Rauigkeitselemente) basiert auf Q	$v_{tot} = \sqrt{g \cdot J \cdot d_{84}} \cdot 1.443 \cdot q^{**0.60} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{q^{**}}{43.78} \right)^{0.8214} \right]^{-0.2435}$
Gl.10	Froude-Zahl	$Fr = \frac{v_{tot}}{\sqrt{gh}} \qquad h = \frac{Q}{b v_{tot}}$
Gl.11	Falls $Fr > 1.0$	$v = v_{krit} = \sqrt{gh_{krit}} \qquad h_{krit} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gb^2}}$
	Falls $Fr < 1.0$	$v = v_{tot}$

**Berücksichtigung der Makrorauigkeit**

Gl.12	Gesamtrauigkeit (nach Strickler 1923)	$k_{tot} = \frac{v}{\sqrt{J} \cdot h^{\frac{2}{3}}}$
-------	---------------------------------------	--

Gl.13	Kornrauigkeit	$k_{\text{korn}} = \frac{23.0}{\sqrt[6]{d_{90}}}$
Gl.14	Reduziertes Gefälle mit $b=2.0$	$J_{\text{red}} = J \cdot \left( \frac{k_{\text{tot}}}{k_{\text{korn}}} \right)^b$

**Kritische dimensionslose Schubspannung sowie reduzierte dimensionslose Schubspannung (Lamb et al., 2008, Nitsche et al. 2011)**

Gl.15	Dimensionslose kritische Schubspannung	$\theta_{c,\text{Lamb}} = 0.15 \cdot J^{0.25}$
Gl.16	Reduzierte dimensionslose kritische Schubspannung	$\theta_{c,\text{red}} = \theta_{c,\text{Lamb}} \cdot \left( \frac{J_{\text{red}}}{J} \right)$
Gl.17	Reduzierte dimensionslose Schubspannung	$\theta_{\text{red}} = \frac{h \cdot J_{\text{red}}}{(s-1) \cdot d_m}$

**Geschiebetransportkapazität nach Smart und Jäggi (1983)**

Gl.18	Vereinfachung:	$\left( \frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} = 1.05$
Gl.19	Geschiebetransportkapazität	$G_B = 4 \cdot B \cdot \frac{\rho_s}{s-1} \left( \frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} \cdot J_{\text{red}}^{1.6} \cdot h \cdot v_m \cdot \left( 1 - \frac{\theta_{c,\text{red}} \cdot (s-1) \cdot d_m}{h \cdot J_{\text{red}}} \right)$

## 4 Methode Geschiebeabschätzung in steilen Gebirgsbächen

**Einleitung:** Mit der Methode "Geschiebeabschätzung in steilen Gebirgsbächen" werden für den aktuellen Zustand des Gewässers Ereignisfrachten verschiedener Wiederkehrperioden (G2, G10, G30, G100, G300) ermittelt und daraus die mittlere jährliche Geschiebefracht abgeleitet. Das Verfahren beinhaltet neue methodische Ansätze zur Abschätzung häufiger Ereignisfrachten (G2, G10) sowie die Erfassung von Geschiebeverlagerungsprozessen im Kegelbereich und schlussendlich die Ableitung der mittleren jährlichen Geschiebefracht in den Vorfluter.

Die Methode "Geschiebeabschätzung in steilen Gebirgsbächen" ist durchführbar in Bächen mit einem Einzugsgebiet  $< 20 \text{ km}^2$  und einem mittleren Gefälle des Hauptgerinnes von  $> 10 \%$ .

### 4.1 Übersicht über das Vorgehen

Das Vorgehen ist in Abb. 8 dargestellt und gliedert sich in drei Schritte. Der erste Schritt erfolgt im Büro mit einer Triage der Bäche (Kapitel 2.2) und der Abschätzung von Ereignisfrachten (Kapitel 4.2). Der zweite Schritt umfasst die notwendigen Geländearbeiten. Die Berechnungen zur mittleren jährlichen Geschiebefracht erfolgen anschliessend wieder im Büro.



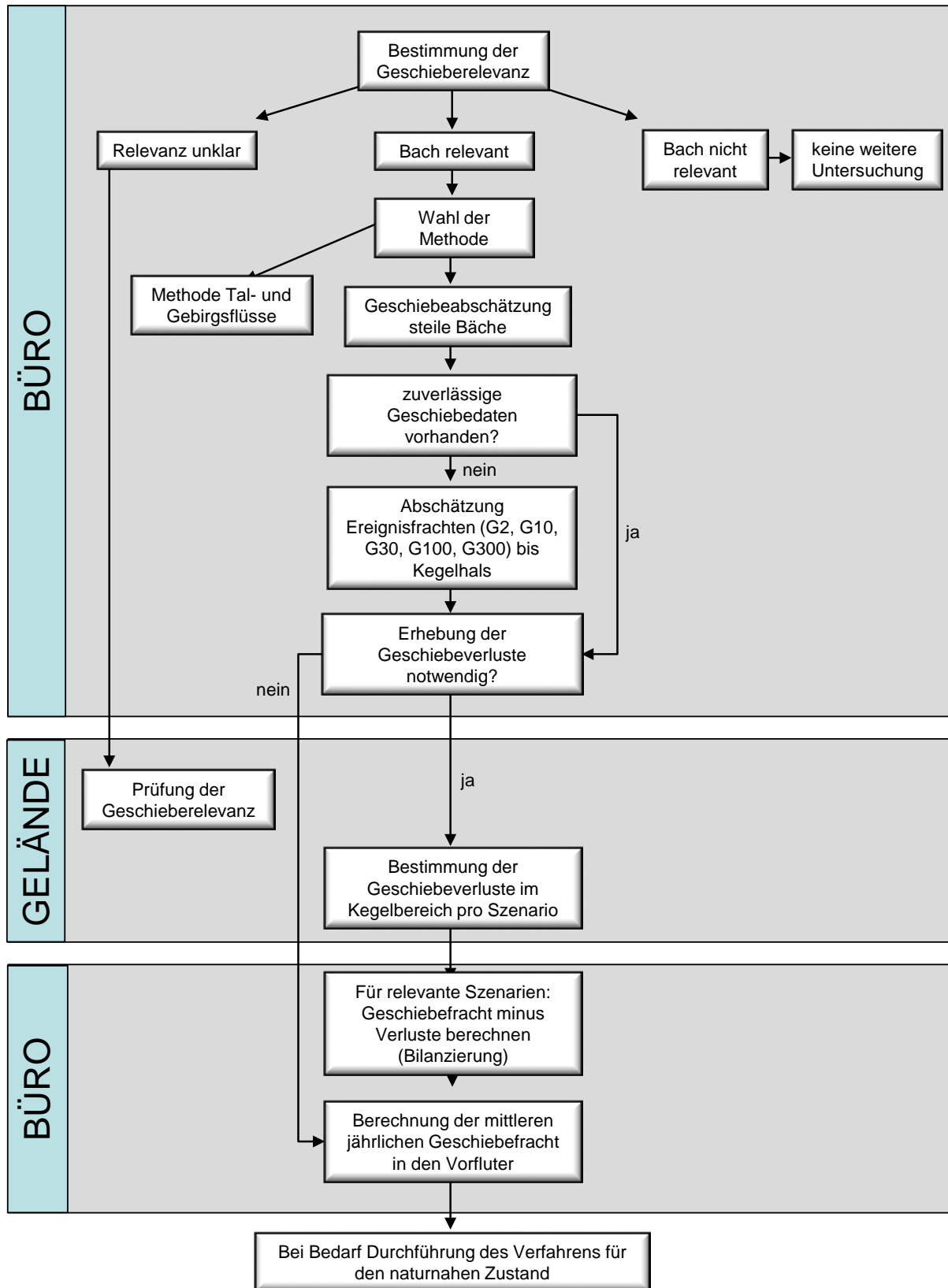


Abb. 8 Ablaufschema für die Methode „Geschiebeabschätzung in steilen Gebirgsbächen“

## 4.2 Erhebung der Geschiebefrachten

### 4.2.1 Abschätzung der 100-jährlichen Geschiebefracht (GF100)

Als Basis für die Abschätzung der Ereignisfrachten dient das 100-jährliche Ereignis, das mit der Methode aus GHO 1996 abgeschätzt wird. Daraus erfolgen Ableitungen für die anderen Szenarien.

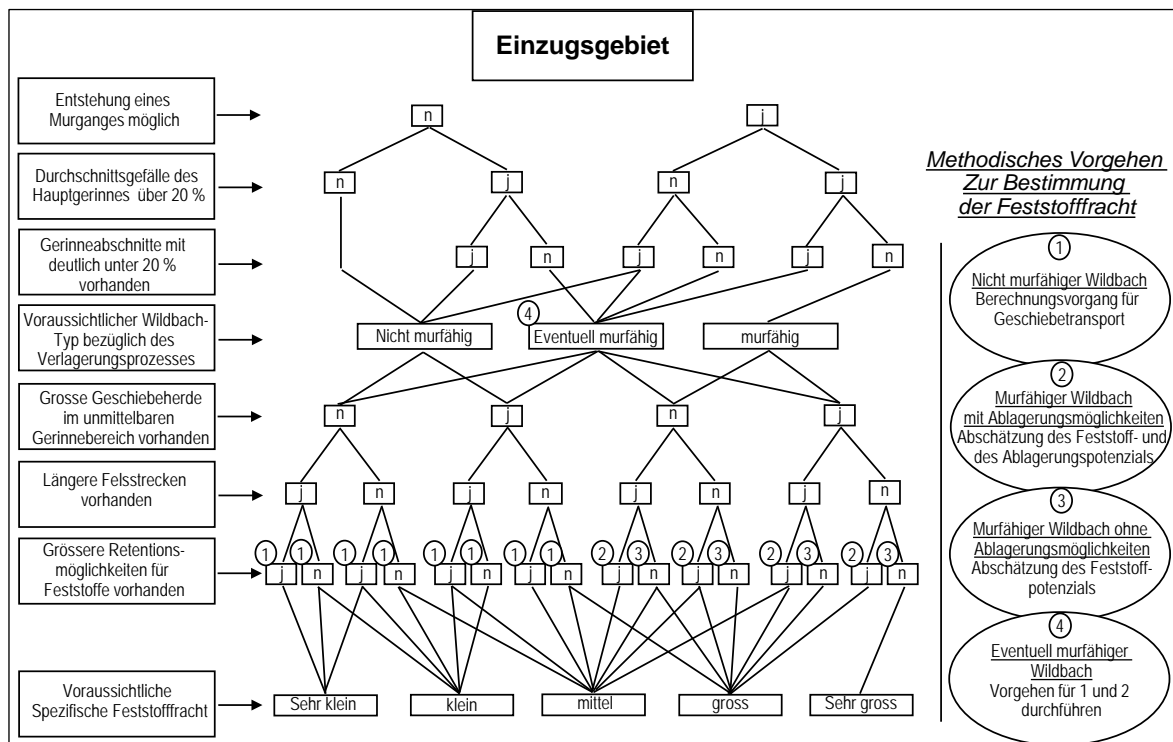


Abb. 9 Grobbestimmung der 100-jährlichen Feststofffracht in kleinen Einzugsgebieten (Quelle: GHO, 1996)

Spez. Fracht	Molasse	Flysch	Kalk	Kristallin
$m^3/km^2$	$10 km^2 - 1 km^2$		$10 km^2 - 1 km^2$	$10 km^2 - 1 km^2$
sehr klein	20 – 100	150	200 – 800	400 – 3'000
klein	50 – 200	1'500	500 – 1'000	800 – 5'000
mittel	150 – 500	5'000	1'000 5'000	1'500 – 15'000
gross	500 – 1'500	10'000	2'000 – 10'000	3'000 – 30'000
sehr gross	(800 – 3'000)	20'000	3'000 – 30'000	8'000 – 80'000

Abb. 10 Spezifische Feststofffracht ( $m^3/km^2$ ) in Abhängigkeit der Geologie und der Einzugsgebietsgrösse. Die spezifische Feststofffracht nimmt mit zunehmender Einzugsgebietsgrösse ab (Ausnahme Flyschgebiete). (Quelle: GHO, 1996)

Die Abschätzung der **Geschiebefracht für ein 100-jährliches Ereignis** kann anhand von Luftbildern und Karten gemäss Abb. 9 erfolgen. Die einzelnen Kriterien in Abb. 9 werden wie folgt abgearbeitet:

**1. Beurteilung der Murfähigkeit des Wildbaches:**

- Hangneigung, bzw. Gerinnegefälle:  $> 27^\circ$  im Hangbereich, bzw. 25 % im Gerinne können als Kriterien für die Entstehung von Murgängen herangezogen werden.
- Ein Gefälle von  $> 20\%$  ermöglicht die Fortbewegung von Murgängen.
- Längere Strecken mit geringem Gefälle (deutlich  $< 20\%$ ) können einen Murgang „verhungern“ lassen.
- Für die Entstehung von Murgängen ist eine minimale Einzugsgebietsgrösse von einigen Hektaren nötig.
- Prüfung früherer Murgangspuren im Gelände (Levéés, Murköpfe, unregelmässiges Relief des Kegels, usw.).

**2. Bestimmung der Faktoren, welche die Geschiebefracht beeinflussen können:**

- Grosse Geschiebeherde: die Geschiebeherde sind deutlich erkennbar und/oder als potenzielle Geschiebeherde mit hohem Feststoffaufkommen bekannt.
- Längere Felsstrecken: 200-300 m lange Felsstrecken, zusammenhängend oder über eine längere Strecke verteilt. Bei grösseren Einzugsgebieten beträgt die Summe der Felsstrecken mindestens 20 % der Hauptgerinnelänge.
- Grössere Retentionsmöglichkeiten: Bedeutende Anteile des Geschiebes (voraussichtlich  $> 20\%$ ) werden zurückgehalten. Das Gefälle der betreffenden Gerinneabschnitte ist kleiner als das Durchschnittsgefälle des Hauptgerinnes und / oder deren Bachbreite ist grösser als der Durchschnitt des Baches (soweit auf dem Luftbild erkennbar).

Die aus Abb. 9 ermittelte Grössenklasse (klein bis sehr gross) dient als Basis für die Bestimmung der Geschiebefracht in Abb. 10. In den Kategorien Molasse, Kalk und Kristallin gilt die jeweils kleine Zahl für ca. 10 km<sup>2</sup> grosse Einzugsgebiete, die grosse Zahl für solche von etwa 1 km<sup>2</sup>. Für dazwischenliegende Einzugsgebietsgrössen muss interpoliert werden, für grössere wird eine entsprechende Extrapolation vorgeschlagen.

Für die Kategorie Flysch wurden anhand der zur Verfügung stehenden Daten keine Beziehung zwischen der Feststofffracht und der Einzugsgebietsgrösse gefunden. Bei grösseren Einzugsgebieten könnte dies deshalb zu einer Überschätzung der Frachten führen.

#### 4.2.2 Abschätzung der 300-jährlichen (GF300) und 30-jährlichen (GF30) Geschiebefracht

Die 30- und 300-jährliche Geschiebefracht wird von der 100-jährlichen Geschiebefracht GF100 mittels Multiplikationsfaktoren abgeleitet. Für den gutachterlichen Entscheid, welche Faktoren jeweils verwendet werden sollen, wurde eine Entscheidungshilfe erstellt (Tab. 2). Dabei wird für jede Zeile ein entsprechender Faktor für das GF300 und das GF30 gewählt.

Tab. 2 Multiplikationsfaktoren zur Berechnung der GF30 und GF300 aus GF100

Berechnung <u>GF300</u> und <u>GF30</u> aus GF100		Multiplikationsfaktoren	
		für GF300	für GF30
Vorherrschender Transportprozess im Einzugsgebiet	fluvialer Geschiebetrieb	1.0 - 1.2	0.6 - 0.7
	Murgang	1.8 - 2.0	0.3 - 0.5
Einzugsgebietsfläche	0-0.5 km <sup>2</sup>	1.0 - 1.2	0.6 - 0.7
	0.5-5 km <sup>2</sup>	1.2 - 1.7	0.4 - 0.6
	>5 km <sup>2</sup>	1.5 - 2.0	0.3 - 0.4
Längere Felsstrecken vorhanden?	Ja	1.0 - 1.2	0.7 - 0.9
	Nein	1.5 - 2.0	0.3 - 0.5
Grosse Geschiebeherde vorhanden?	Ja	1.5 - 2.0	0.3 - 0.5
	Nein	1.0 - 1.2	0.7 - 0.9
Retentionsmöglichkeiten vorhanden?	Ja	1.0 - 1.2	0.7 - 0.9
	Nein	1.5 - 2.0	0.3 - 0.5
Schwellenprozesse	nicht möglich	1.0	1.0
	möglich	2.0 - 5.0	1.0
<b>Endgültiger Faktor</b>		Mittelwert bilden = Faktor f <sub>300</sub>	Mittelwert bilden = Faktor f <sub>30</sub>
<b>Berechnung</b>		GF300 =GF100*f <sub>300</sub>	GF30 =GF100*f <sub>30</sub>

Die Bandbreiten der vorgegebenen Faktoren sollen die Unsicherheiten zeigen und dem Bearbeiter einen gewissen Spielraum lassen.

<b>Vorherrschender Transportprozess:</b>	Es wird angenommen, dass bei murfähigen Einzugsgebieten das Spektrum zwischen der 30-, 100- und 300-jährlichen Geschiebefracht grösser sein kann als bei Bächen mit fluvialem Geschiebetrieb.
<b>Einzugsgebietsflächen:</b>	Es wird davon ausgegangen, dass sich die 30- und 300-jährlichen Geschiebefrachten umso weniger von der 100-jährlichen Geschiebefracht unterscheiden, je kleiner das Einzugsgebiet ist. Je grösser das Einzugsgebiet, umso höher wird somit der Faktor für das 300-jährliche Ereignis gewählt, beim 30-jährlichen Ereignis entsprechend tiefer.
<b>Längere Felsstrecken:</b>	Je mehr Felsabschnitte vorhanden sind, umso kleiner werden voraussichtlich die Unterschiede zwischen dem 30-, 100- und dem 300-jährlichen Ereignis sein, da für alle diese Szenarien nur ein beschränktes Geschiebepotential vorhanden ist. Die Faktoren nähern sich somit umso mehr an 1 an, je mehr Felsstrecken vorhanden sind.
<b>Grosse Geschiebeherde:</b>	Die Geschiebemobilisation aus grossen Geschiebeherden ist beim 300-jährlichen Ereignis mit hoher Wahrscheinlichkeit höher als beim 100-jährlichen Ereignis. Beim 30-jährlichen Ereignis ist die anfallende Geschiebefracht kleiner. Somit ist der Faktor umso höher bei 300-jährlichen Ereignissen (umso tiefer bei 30-jährlichen Ereignissen), je mehr grosse Geschiebeherde vorhanden sind.
<b>Retentionsmöglichkeiten:</b>	Es wird davon ausgegangen, dass Retentionsmöglichkeiten im Einzugsgebiet ausgleichend wirken. Je mehr Retentionsmöglichkeiten bestehen, desto näher an 1 liegen die Faktoren.
<b>Schwellenprozesse:</b>	Bei seltenen Ereignissen können Schwellenprozesse eintreten, welche Abflüsse und Geschiebefrachten um eine Grössenordnung erhöhen können. Schwellenprozesse werden vor allem beim 300-jährlichen Ereignis aktiviert. Zu nennen sind z.B. Ausbrüche von Flutwellen nach Verklausungen oder aus Wassertaschen im Gletscher, konzentrierte Austritte von Karstwasser, Abgänge von Grossrutschungen, Mobilisierung von grossen Geschiebeherden im Periglazialbereich, usw.). Beim 300-jährlichen Ereignis ist eine grosse Bandbreite eines Faktors möglich, beim 30-jährlichen fällt der Faktor eher marginal ins Gewicht.

#### 4.2.3 Abschätzung der 10-jährlichen Geschiebefracht (GF10)

Das hier vorgestellte Verfahren basiert auf den Annahmen, dass bei einem **10-jährlichen Ereignis** in einem steilen Gerinne die gesamte Sohlenbreite des Hauptgerinnes vom Abfluss betroffen ist und dass weder Böschungserosion noch Geschiebeeintrag aus den angrenzenden Hängen erfolgt. Die gesamte Geschiebeherkunft stammt somit aus der Sohle des Hauptgerinnes.

**Pauschalabschätzung:** In einem ersten Schritt wird das Hauptgerinne nach dem Kriterium „Sohlenbreite“ in homogene Abschnitte aufgeteilt. Die Geschiebefracht GF10 aus der Sohle wird für alle homogenen Gerinneabschnitte durch eine Multiplikation der Sohlenbreite (SB) mit einer vordefinierten mittleren Erosionsmächtigkeit von 6.5% der Sohlenbreite und der Länge des Gerinneabschnitts (LGA) berechnet. Die Ergebnisse aller homogenen Gerinneabschnitte werden als Zwischenresultat in Form einer Pauschalabschätzung zu einer Geschiebefracht am Kegelhals aufaddiert.

Gl.20

$$GF10 = \left( \sum_{k=1}^i (SB_i * 0.065 * SB_i * LGA) \right) * \text{Korrekturfaktor}$$

**Korrekturfaktor GF10:** Für das Schlussresultat wird das Ergebnis der Pauschalabschätzung mit verschiedenen Korrekturfaktoren multipliziert. Für die Bestimmung der Korrekturfaktoren wurde eine Hilfstabelle erstellt (Abb. 11). Für die Abschätzungen der Korrekturfaktoren sind Kenntnisse aus dem Gelände unbedingt erwünscht. Notfalls können die meisten Informationen aus Orthofotos und topographischen Karten entnommen werden, falls genügend Einsicht in den Gerinnebereich besteht.

<b><u>Erhöhende Faktoren</u></b>										
Murfähigkeit bis zum Kegelhals						evtl.	selten, moderat		immer, aktiv	
Mittleres Gefälle des Hauptgerinnes [%]						20-30	30-40	>40		
<b><u>Reduzierende Faktoren</u></b>										
Mittleres Gefälle des Hauptgerinnes [%]			< 5	5-8	8-10					
Einzugsgebietsfläche [km <sup>2</sup> ]			30-20	20-15	15-10					
Grosse Sohlenbreite				Viele Abschnitte	Einige Abschnitte					
Felsanteile in Sohle [%]	100	80	60	40	20	0				
Grosse/Viele natürliche Rauigkeitselemente (Blöcke, Holz) in der Gerinnesohle			durchgehend		streckenweise					
Entkoppelung von Teilen des EZG durch lokale Flachstrecken und/oder Retentionsräume [%]	100	80	60	40	20	0				
Verbauungen/Sperren im EZG				vorhanden						
<b>Korrekturfaktor</b>	<b>0</b>	<b>0.2</b>	<b>0.4</b>	<b>0.6</b>	<b>0.8</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>

Abb. 11 Erhöhende und reduzierende Korrekturfaktoren für die Abschätzung des GF10

Erhöhende Faktoren führen dazu, dass das Zwischenresultat der 10-jährlichen Geschiebefracht mit Faktoren >1 multipliziert werden, reduzierende Faktoren weisen Werte <1 auf. **Für jedes erhöhende oder reduzierende Kriterium wird der Faktor bestimmt und anschliessend fortlaufend mit den Zwischenresultaten multipliziert.**

Mit Ausnahme der nachfolgend aufgeführten Punkte sind die Korrekturfaktoren selbsterklärend.

**Felsanteile in Sohle:** Für auf Fels verlaufende Streckenabschnitte wird der entsprechende Anteil mittels Korrekturfaktor berücksichtigt.

**Rauigkeitselemente:** Falls von Geländeaufnahmen die Formrauigkeiten im Gerinne bekannt sind, können diese hier als reduzierende Faktoren einbezogen werden. Je länger diese Abschnitte sind, umso tiefer wird der reduzierende Faktor gewählt.

**Entkoppelung von Teilen des Einzugsgebiets und/oder Retentionsräume:** Sind Teile des Einzugsgebiets geschiebemässig durch eine Flachstrecke oder Geschiebesammler im Einzugsgebiet abgekoppelt oder wird Geschiebe in Retentionsräumen zurückgehalten, kann der entsprechende Anteil durch einen Faktor reduziert werden.

**Verbauung/Sperre im Einzugsgebiet:** Weist das Hauptgerinne Sperrbauten auf, welche Geschiebe zurückhalten, kann dieser reduzierende Effekt mit einem Korrekturfaktor zwischen 0.5 und 1 berücksichtigt werden.

#### 4.2.4 Abschätzung der 2-jährlichen Geschiebefracht (GF2)

Die Abschätzung der **2-jährlichen Geschiebefracht** wird aus der 10-jährlichen Geschiebefracht hergeleitet. Die in Kapitel 7.1 beschriebenen Datenauswertungen führten zu einer Annahme von 1/3 der 10-jährlichen Geschiebefracht.

### 4.3 Verluste auf dem Kegel oder auf einer Flachstrecke

Auf Kegeln und Flachstrecken vor der Mündung in den Vorfluter lagert der Bach Geschiebe ab. Diese Geschiebeverluste müssen eingerechnet werden. Bei vorhandenem Geschiebeablagerungsplatz wird dieser gemäss Abb. 12 berücksichtigt:

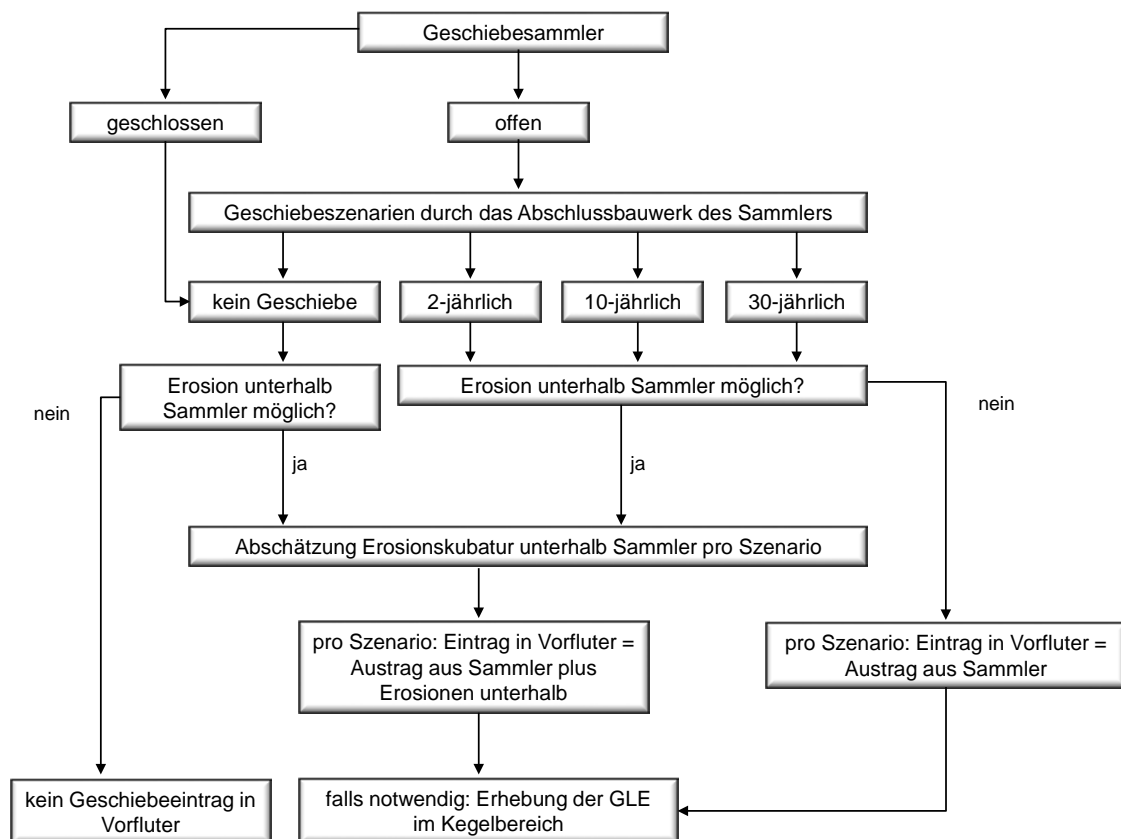


Abb. 12 Beurteilung des Einflusses von Geschiebesammlern



- Unterscheidung zwischen geschlossenem und offenem Geschiebesammler
- Bei geschlossenen Bauwerken bleibt trotz möglichem Überlastfall alles Geschiebe liegen (vgl. Kapitel 7.1.3). Die Beurteilung erfolgt anschliessend, ob Erosionen unterhalb des Geschiebeablagerungsplatzes möglich sind (siehe unten).
- Bei offenen Geschiebeablagerungsplätzen sind die Szenarien für die Durchlässigkeit des Abschlussbauwerks zu definieren. Die Durchflussszenarien sind abhängig von der Lichtweite der einzelnen Balkenschlitze:
  - „kein Geschiebe“: die Schlitzweiten sind klein und werden bereits bei kleinen Ereignissen verstopft (durch Holz / Geschiebe). Der Geschiebefluss aus dem Bauwerk ist vernachlässigbar klein oder inexistent.
  - „<2-jährliche Ereignisse“: die Schlitzweiten sind gross genug für den Durchfluss kleiner Geschiebemengen. Eine Verstopfung der Balkenschlitze ist bei kleinen Ereignissen nicht zu erwarten.
  - „10-jährliche Ereignisse“ oder 30-jährliche Ereignisse: Die Konfiguration des Abschlussbauwerkes erlaubt den Durchfluss grösserer Geschiebemengen.

**Es wird davon ausgegangen, dass seltene Ereignisfrachten partiell im Sammler zurückgehalten werden und der Austrag maximal einem 30-jährlichen Ereignis entspricht.**

#### **4.3.1 Erosion unterhalb von Geschiebesammlern**

Unterhalb des Geschiebeablagerungsplatzes können in Abhängigkeit des Abflusses zusätzliche Erosionen für eine Zunahme der Geschiebefracht sorgen. Die zusätzliche Fracht ist im Gelände zu bestimmen. Dabei sind die höheren Wassermengen bei seltenen Ereignissen im Vergleich zu den kleinen Ereignissen zu berücksichtigen (höhere Erosionsbeträge).

#### **4.3.2 Geschiebe-limitierende Elemente**

Durchlässe, Eindolungen, Brücken, aber auch ungenügende Abflussquerschnitte oder eine Abnahme der Transportkapazität können geschiebelimitierende Elemente darstellen, welche den Geschiebeeintrag in den Vorfluter reduzieren. Bei diesen geschiebelimitierenden Elementen muss pro Szenario die Reduktion der Geschiebezulieferung in den Vorfluter **gutachterlich** abgeschätzt werden. Sind keine Geschiebe-limitierenden Elemente unterhalb des Sammlers vorhanden, entspricht der Geschiebeeintrag in den Vorfluter dem Austrag aus dem Geschiebeablagerungsplatz plus den Erosionen unterhalb davon.

#### 4.4 Bilanzierung bis Vorfluter

Für jedes der Szenarien wird nun eine Geschiebebilanz erstellt, welche sich durch die Geschiebefracht minus der Geschiebereduktionen im Kegelbereich ergibt.

#### 4.5 Berechnung der mittleren jährlichen Geschiebefracht in den Vorfluter

##### 4.5.1 Ableitung von Ereignisfrachten in mittlere jährliche Frachten

Die Bestimmung der mittleren jährlichen Geschiebefracht ( $G_m$ ) erfolgt über eine Wertereihe:

$$\text{Gl.21} \quad G_m = \frac{(1 + 300y) + (2 * 100y) + (7 * 30y) + (20 * 10y) + (120 * 2y)}{300}$$

wobei z.B.  $300y$  die Fracht eines 300-jährlichen Ereignisses bei Einmündung in den Vorfluter bedeutet.

#### 4.6 Kontrolle des Ergebnisses

Vergleiche mit Geschiebestudien haben gezeigt, dass die Frachtschätzungen bei kleinen, sehr steilen Einzugsgebieten eher überbewertet, bei grösseren und flacheren Gebieten eher unterschätzt werden. Anhand von Abb. 13 kann eine Überprüfung des Ergebnisses vorgenommen werden. Die Kurven in Abb. 13 entsprechen allerdings der mittleren jährlichen Feststofffracht (d. h. Feinmaterial inbegriffen) und Geschiebeverluste sind nicht berücksichtigt. Liegt die Abschätzung der mittleren jährlichen Geschiebefracht für einen bestimmten Bach weit ausserhalb der massgeblichen Kurve in Abb. 13, ist diese nochmals zu überprüfen oder die Differenz sollte sich entsprechend erklären.

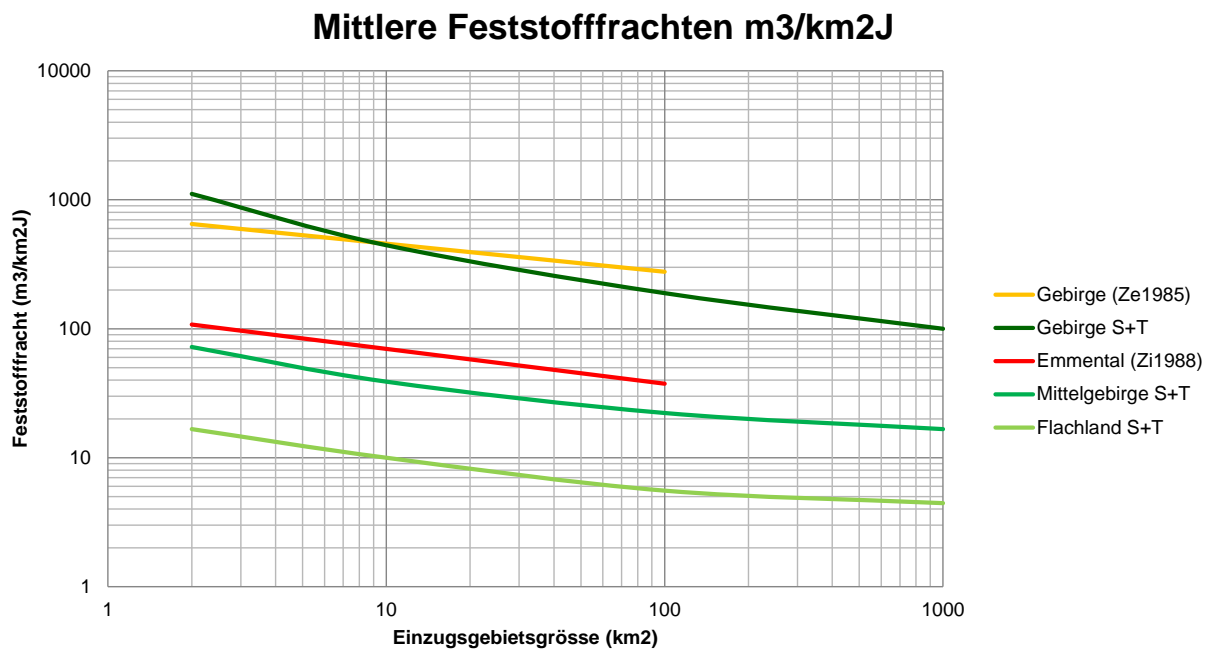


Abb. 13 Spezifische jährliche Feststofflieferung für verschiedene geomorphologische Einheiten; zusammengestellt von M. Zimmermann mit Daten von Schröder+Theune (1984), Zeller (1985) und Zimmermann (1989).

Bei grösseren Seitenbächen ab ca. 4 km<sup>2</sup> Einzugsgebietsfläche sowie Hinweisen auf Karten/Luftbild auf grosse Geschiebeherde und Rutschungsaktivitäten sollten ergänzende Geländeaufnahmen durchgeführt werden. Dies gilt ebenfalls, wenn die Ergebnisse der Abschätzung nicht plausibel sind.

## Teil 3 Erläuterungen zu den Methoden

### 5 Erläuterungen zur Bestimmung der Abflussdauerkurve

#### 5.1 Funktion

**Formfunktion:** Mit folgendem Ansatz **einer dimensionslosen Funktion** (Abb. 14) konnte eine sehr gute Abbildung von verschiedenen gemessenen Dauerkurven im Gültigkeitsbereich von 1 h bis zu 300 d erreicht werden<sup>7</sup>:

$$\text{Gl.22} \quad \log(Q(t) / MQ) = A \cdot \ln(t) + B \cdot t + C \cdot \frac{1}{t} + D$$

Bei der Bestimmung der Funktion musste berücksichtigt werden, dass bei kurzen Überschreitungsdauern sehr grosse Gradienten auftreten können. Mit der gewählten logarithmisierten Funktion gelang es, auch diese grossen Gradienten, bei Überschreitungsdauern von nur wenigen Tagen, abzubilden. Die vier enthaltenen Parameter A, B, C und D bewirken folgendes Funktionsverhalten:

Die Grundfunktion  $A \cdot \ln(t) + D$  mit den Parametern A und D definiert über den gesamten Überschreitungsdauerbereich den generellen Funktionsverlauf. Der Parameter A gibt dabei die Gradienten (Verhältnis zwischen seltenen und häufigen Abflüssen) vor. Der Parameter D 'verschiebt' die Funktion in der Höhe.

Der Parameter B korrigiert den Funktionsverlauf bei grösseren Überschreitungsdauern und führt zu einer Reduktion mittlerer und kleinerer Abflüsse. Der Einfluss ist erst bei Überschreitungsdauern > 50 Tage wesentlich.

Bei sehr geringen Überschreitungsdauern (< 1 Tag) führt die Grundfunktion  $A \cdot \ln(t) + D$  mit den Parametern A und D zu sehr hohen Abflusswerten. Der Parameter C dient dazu, diese Werte zu reduzieren. Der Einfluss des Parameters C ist bei Überschreitungsdauern > 1 Tag vernachlässigbar.

---

<sup>7</sup> Für den Geschiebetransport sind in der Regel die Spitzenabflüsse, welche nur an wenigen Tagen im Jahr erreicht oder überschritten werden, entscheidend. Mit dem vorgeschlagenen Ansatz und dem grossen Gültigkeitsbereich können aber auch Dauerlinien für andere Fragestellungen bestimmt werden. Der deutliche Abfall der Abflüsse bei Überschreitungsdauern >300 Tage kann mit der gewählten Formfunktion jedoch nicht abgebildet werden.

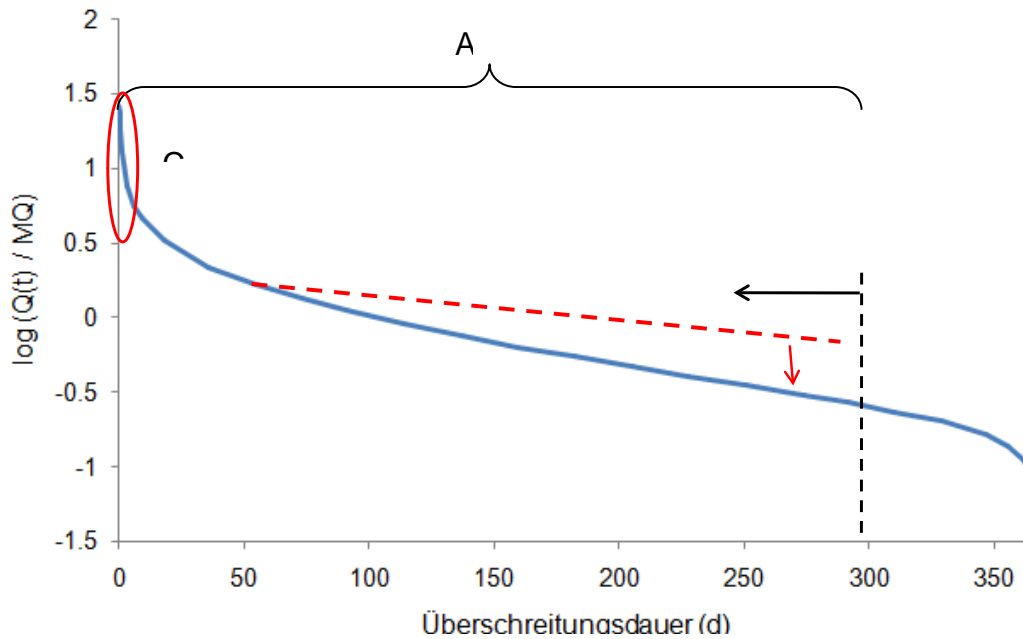


Abb. 14: Logarithmierte Funktion und Einfluss der vier Parameter

## 5.2 Auswertung von Messstationen zur Ermittlung der Parameter A bis D

**Bestimmung der Parameter:** Zur Bestimmung der Parameter A bis D wurden von 47 Abflussmessstationen des BAFU und von 29 kantonalen Messstationen die Abflussdaten des Zeitraums 1974 bis 2012 (resp. nach Verfügbarkeit) bezogen. Die durch Messstationen abgedeckten Einzugsgebiete weisen unterschiedliche Gebietseigenschaften auf:

- die Einzugsgebietsflächen  $A_{EZG}$  betragen zwischen 10 km<sup>2</sup> und 700 km<sup>2</sup>.
- Die mittlere Höhenlage der betrachteten Einzugsgebiete liegt zwischen 450 und 2660 m ü. M.
- Der Vergletscherungsgrad liegt zwischen 0 % und 36 %.

Für die 76 Stationen wurde jeweils anhand der Stundenmittelwerte die mittlere jährliche Überschreitungsdauerkurve bestimmt. Nachdem diese durch den gemessenen Mittelwasserabfluss MQ normiert wurde, konnte die erhaltene Form jeweils mit der gewählten Funktion (Gl.22) angenähert und die Parameter A bis D bestimmt werden.

Für insgesamt 76 Stationen liegen die Formparameter A, B, C und D sowie die zugehörigen Gebiets-eigenschaften vor.

**Parameterbestimmung:** Nach Auswertung der Abflussdaten wurden die Abhängigkeiten zwischen den vier Parametern A bis D und den Eigenschaften der zugehörigen Einzugsgebiete gesucht.

### 5.2.1 Parameter D

Hilfreich bei der Auswertung ist die Tatsache, dass für eine Überschreitungsdauer von  $t = 1d$  der Einfluss sämtlicher Parameter - bis auf D – nahezu verschwindet<sup>8</sup>. Bei der Bestimmung des **Parameters D** können deshalb die drei anderen Parameter A, B und C vernachlässigt werden. Es ergibt sich:

$$\text{Gl.23} \quad \log(Q_{1d} / MQ) \approx D$$

**Einflussgrößen:** Es besteht dementsprechend ein enger Zusammenhang zwischen dem normierten Wert eines übers Jahr gesehen relativ seltenen Abflusses und dem Parameter D. Der Parameter D wird also durch die gleichen Faktoren beeinflusst, welche auch zu **hohen normierten** Abflusswerten ( $Q_{1d}/MQ$ ) führen. Es sind dies im Wesentlichen folgende Faktoren:

- die Niederschlagsverhältnisse
- die Fläche und Form des Einzugsgebiets
- die mittlere Höhenlage
- die Vergletscherung
- die Bodenverhältnisse

**Niederschlagsverhältnisse:** Hinsichtlich der Niederschlagsverhältnisse sind einerseits die Intensitäten der Starkniederschläge<sup>9</sup> als auch der mittlere jährliche Gebietsniederschlag<sup>10</sup> von Bedeutung.

Der **mittlere jährliche** Gebietsniederschlag  $P_{\text{Jahr}}$  (in mm) kann aus der HADES-Karte 2.2 entnommen werden.

Für die Bestimmung repräsentativer **Intensitäten der Starkniederschläge** wird folgendes Vorgehen gewählt, welches auf gewissen vereinfachenden Annahmen beruht:

- a) Aus den HADES-Karten 2.4 resp. 2.42 werden die maximalen Punktniederschläge im Einzugsgebiet für Ereignisse mit einer Jährlichkeit von 2.33 Jahren entnommen<sup>11</sup>.

---

<sup>8</sup>  $A \cdot \ln(1) = 0$ ,  $B \approx 10^{-3}$  und  $C \approx 10^{-2}$

<sup>9</sup> Einfluss auf hohe, seltene Abflüsse wie z.B.  $Q_{1d}$

<sup>10</sup> Einfluss aufs Mittelwasser MQ

<sup>11</sup> Die Jährlichkeit 2.33 a wurde gewählt, da die Niederschlagshöhen im HADES direkt verfügbar sind und diese Eintretenswahrscheinlichkeit gross genug ist, um in guter Näherung geringe Überschreitungsdauern der Dauerkurve zu repräsentieren.

- b) Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass bei den interessierenden hohen und relativ seltenen Abflüssen tendenziell das gesamte Einzugsgebiet, oder zumindest ein Grossteil davon, an der Abflussbildung beteiligt ist. Die Niederschlagsereignisse müssen somit eine Dauer von mindestens der Konzentrationszeit  $t_K$  aufweisen. Die Konzentrationszeit (in h) wird überschlägig anhand der Fließstrecke  $L_K$  (in m, von der Wasserscheide entlang des Hauptgerinnes bis zum Gebietsauslass, vgl. Abb. 1) und einer mittleren Fließgeschwindigkeit von  $v_m = 1$  m/s bestimmt. Zusätzlich wird eine Benetzungszeit von 0.5 h addiert (Gl.24).

$$\text{Gl.24} \quad t_K = \frac{L_K}{v_m} \cdot \frac{1}{3600} + 0.5$$

- c) Aus den Punktniederschlagswerten für Regendauern von 1 h und 24 h wird anhand der Extremalverteilung (vgl. HADES-Erläuterungen zur Karte 2.4) die Niederschlagshöhe  $N_{\text{Punkt},t_K}$  (in mm) eines 2.33 jährlichen Punktniederschlags der Dauer  $t_K$  bestimmt.
- d) Anschliessend wird der Punktniederschlag  $N_{\text{Punkt},t_K}$  in einen mittleren Gebietsniederschlag  $N_{\text{Gebiet},t_K}$  (in mm) abgemindert. Mit der Formel nach Lorenz und Skoda (2000) werden hierbei die Einzugsgebietsfläche  $A_{\text{EZG}}$  (km<sup>2</sup>) und die Niederschlagsdauer (im vorliegenden Fall  $t_K$ ) berücksichtigt (Gl.25 und Gl.26).

$$\text{Gl.25} \quad N_{\text{Gebiet},t_K} = N_{\text{Punkt},t_K} \cdot e^{-\omega A_{\text{EZG}}^{0.59}}$$

$$\text{Gl.26} \quad \omega = 0.0447 \cdot \frac{\overline{Ni_{\text{Gebiet},t_K}}}{60} + 0.0026$$

$\overline{Ni_{\text{Gebiet},t_K}}$  (in mm/h) bezeichnet den Erwartungswert der Niederschlagsintensität des betrachteten Ereignisses. Die Lösung der beiden Gleichungen muss iterativ erfolgen:

- i. Zunächst wird eine Annahme für  $\overline{Ni_{\text{Gebiet},t_K}}$  getroffen und mit Gl.26 der Wert für  $\omega$  ermittelt.
- ii. Anschliessend wird mit Gl.25 der Gebietsniederschlag  $N_{\text{Gebiet},t_K}$  berechnet und daraus die zugehörige Intensität bestimmt:

$$\text{Gl.27} \quad \overline{Ni_{\text{Gebiet},t_K}} = \frac{N_{\text{Gebiet},t_K}}{t_K}$$

- iii. Der Schritt i. wird mit der beim Schritt ii. berechneten Intensität solange wiederholt, bis die Abweichung der Intensität zwischen der Annahme (i) und dem Ergebnis (ii) vernachlässigbar wird.

**Fläche und Form des Einzugsgebiets:** Die Fläche und die Form des Einzugsgebiets werden indirekt bei der Bestimmung der Starkniederschlagswerte berücksichtigt:

- Je grösser das Gebiet ist, umso stärker ist die Gebietsabminderung ausgeprägt.
- Langgestreckte Einzugsgebiete weisen eine längere Konzentrationszeit auf<sup>12</sup>.

Zusätzlich kann mit dem Formfaktor nach Horton (ff), welcher das Verhältnis der Gebietsfläche zum Quadrat der Länge ist, das Einzugsgebiet charakterisiert werden (vgl. Abb. 15). Langgestreckte Einzugsgebiete weisen kleine ff-Werte auf.

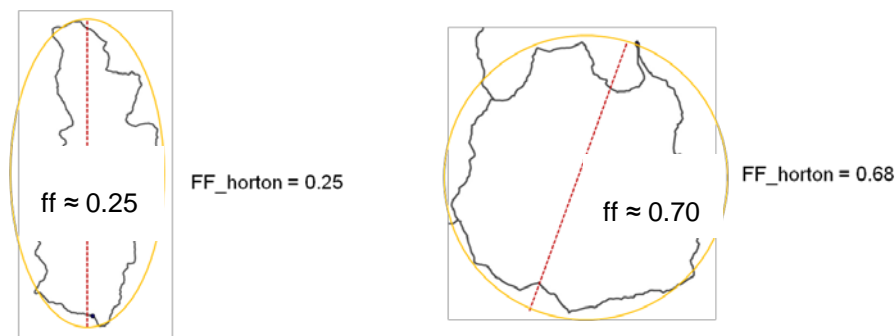


Abb. 15 Vergleich zweier Einzugsgebiete mit unterschiedlichen ff-Werten.

**Abflussregime:** Die **mittlere Höhenlage** und der **Vergletscherungsgrad** werden berücksichtigt, in dem das Einzugsgebiet über das Abflussregime charakterisiert wird. (vgl. Abb. 18)<sup>13</sup>.

- **glacial** geprägte Einzugsgebiete: Abflussregimetypen 1 - 6 und 13
- **nival** geprägte Einzugsgebiete: Abflussregimetypen 7 - 8 und 14
- **pluvial** geprägte Einzugsgebiete: Abflussregimetypen 9 - 12 und 15

**q<sub>347</sub>:** Die pluvial geprägten Einzugsgebiete werden zusätzlich noch nach der Höhe der Grundwasserspense unterschieden. Als Mass für die Grundwasserspense kann die Abflussspense q<sub>347</sub> verwendet werden, welche unter anderem anhand der Karte<sup>14</sup> in Abb. 16 bestimmt werden kann.

Es werden bei pluvialen Einzugsgebieten dementsprechend zwei Klassen unterschieden:

Klasse 1:  $q_{347} \leq 6 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$

Klasse 2:  $q_{347} > 6 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$

---

<sup>12</sup> Der komplexe Einfluss des Gerinnenetzes und der Gerinnelänge auf die Konzentrationszeit wird im Rahmen dieses Vorgehens nicht berücksichtigt.

<sup>13</sup> Das Entscheidungsdiagramm ist unter <http://www.bafu.admin.ch/hydrologie> (-> Informationssystem und Methoden -> Grobe Abschätzung hydrologischer Kenngrössen -> Abflussregimetypen) verfügbar.

<sup>14</sup> Landeshydrologie und -geologie 1999: Die Abflussmenge Q<sub>347</sub>, Eine Standortbestimmung. Hydrologie Mitteilungen Nr. 27. Bern.



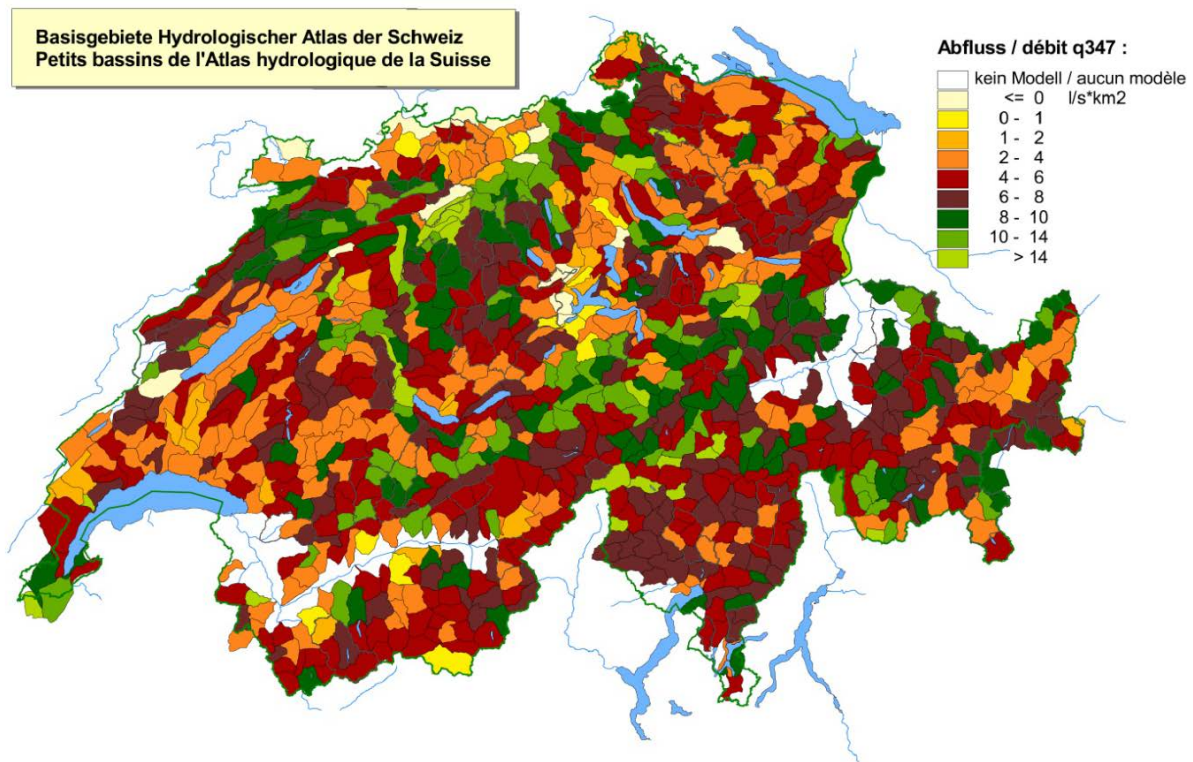


Abb. 16 Karte der Abflussspende  $q_{347}$

**Bodenverhältnisse:** Eine exakte Beschreibung der Bodenverhältnisse erfordert einen relativ hohen Aufwand an Grundlagenerhebungen und evtl. ergänzender Feldbegehungen.

Für eine einfache und qualitative Erfassung der Bodeneigenschaften wird stattdessen der Abflussbeiwert  $\psi$  herangezogen, welcher das Verhältnis aus der Abflusshöhe und dem mittleren Gebietsniederschlag darstellt ( $\psi = A_Q / P_{\text{Jahr}}$ ). Die mittlere Abflusshöhe kann nach vorgängiger Bestimmung von MQ ermittelt werden.

**Ergebnis für D:** Der Parameter D lässt sich in Abhängigkeit der oben genannten Parameter in guter Näherung herleiten. Es wurden folgende Näherungsfunktionen<sup>15</sup> bestimmt:

Gl.28                      glacial                      
$$D = 0.0087 \cdot \frac{Ni_{\text{Gebiet},tk}}{\sqrt{ff \cdot \psi}} + 0.600$$

Gl.29                      nival                      
$$D = 0.0087 \cdot \frac{Ni_{\text{Gebiet},tk}}{\sqrt{ff \cdot \psi}} + 0.921$$

<sup>15</sup> diese entsprechen den durchgezogenen Linien in Abb. 17

Gl.30                      pluvial (Klasse 1)                       $D = 0.0087 \cdot \frac{Ni_{Gebiet,tk}}{\sqrt{ff \cdot \psi}} + 0.792$

Gl.31                      pluvial (Klasse 2)                       $D = 0.0087 \cdot \frac{Ni_{Gebiet,tk}}{\sqrt{ff \cdot \psi}} + 0.678$

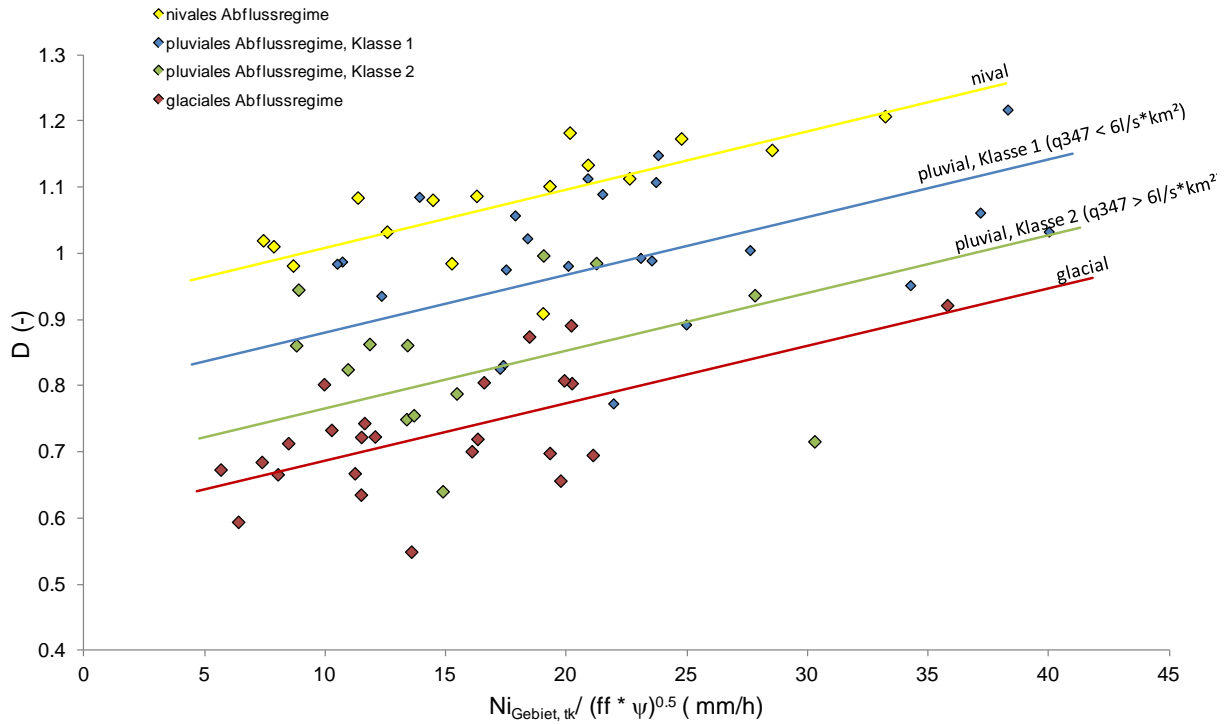


Abb. 17 Bestimmung von D anhand der Gebietseigenschaften und der Niederschlagsverhältnisse

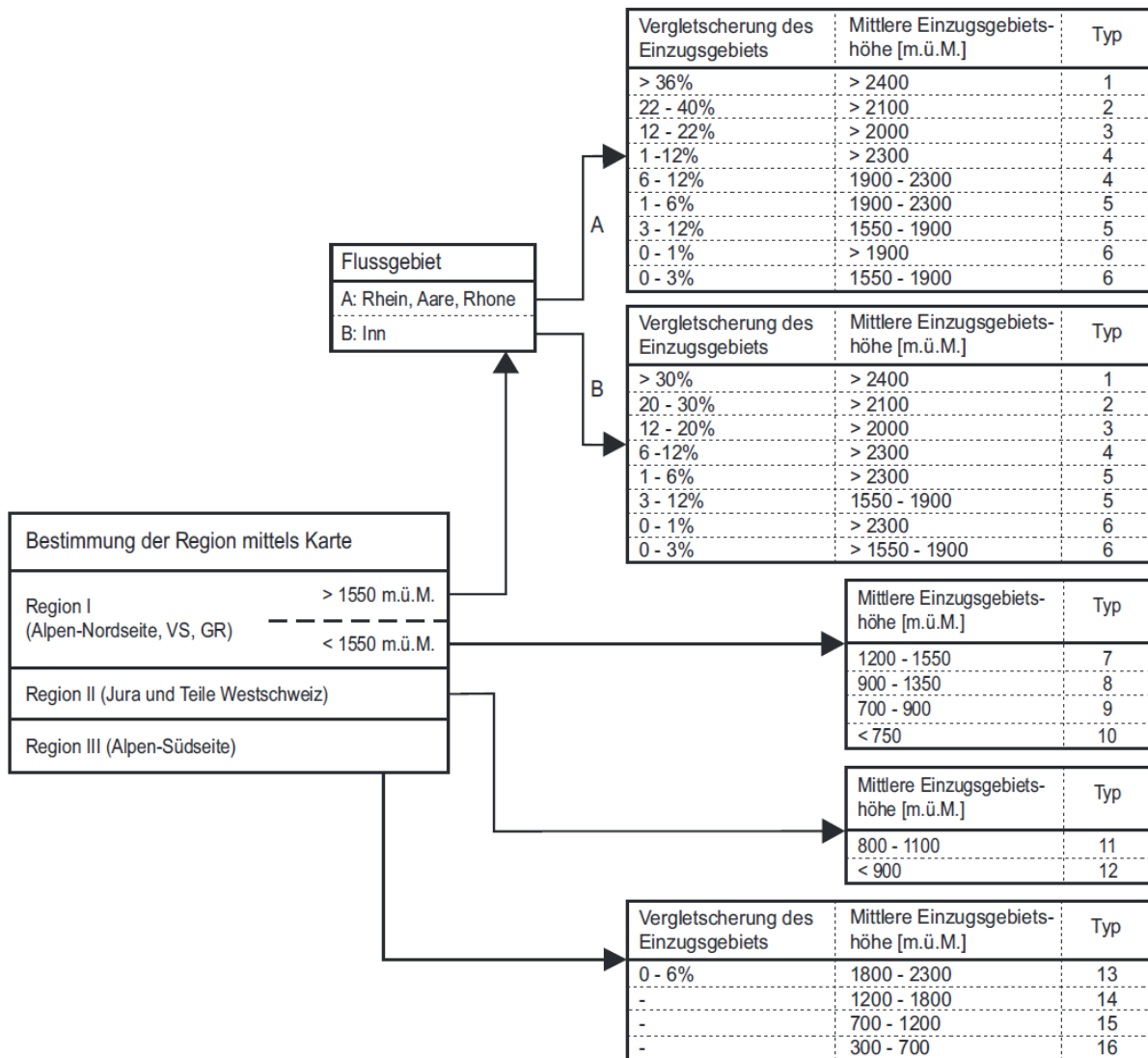


Abb. 18 Entscheidungsdiagramm zur Bestimmung des Abflussregimetyps

### 5.2.2 Parameter A

Zwischen den **Parametern A** und D besteht eine enge Korrelation (vgl. Abb. 19). Der Parameter A kann deshalb vereinfachend mit folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\text{Gl.32} \quad A = -0.2261 \cdot D + 0.0573$$

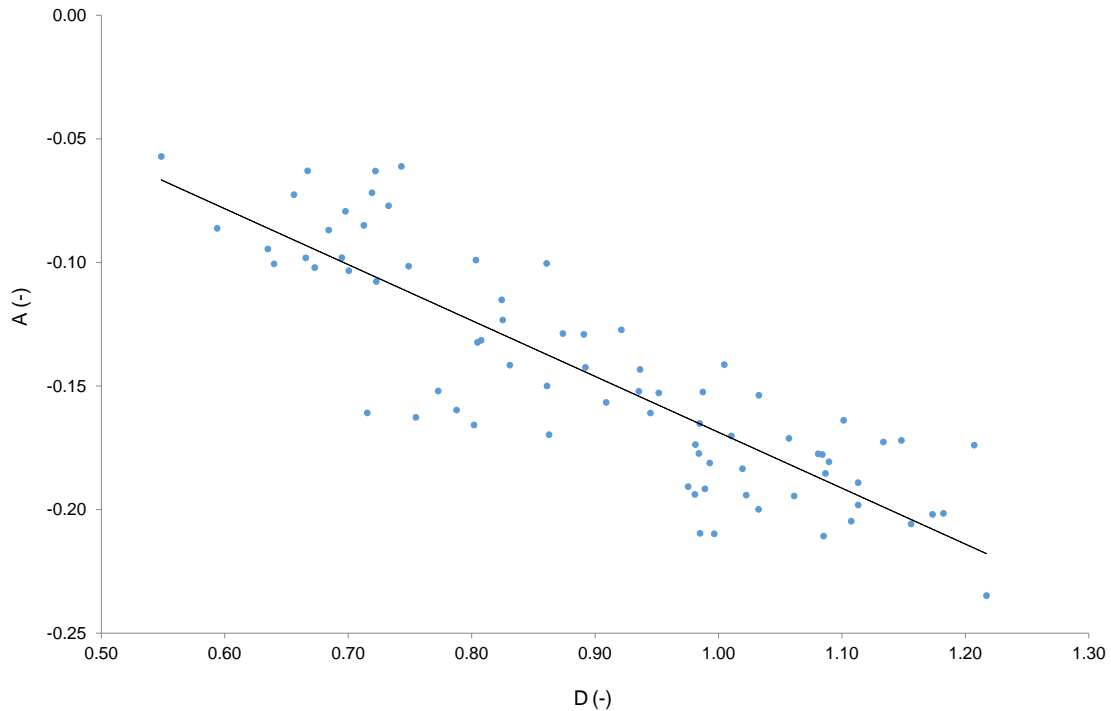


Abb. 19 Korrelation zwischen D und A

### 5.2.3 Parameter B

Der **Parameter B** dient der Korrektur von Abflüssen mit grösseren Überschreitungsdauern ( $t > 50$  d). Ein wesentlicher Einfluss auf die Dauerkurve ergibt sich tendenziell erst bei Niedrigwasserabflüssen, welche im Rahmen der vorliegenden Aufgabenstellung eigentlich unbedeutend sind.

Zwischen dem Parameter B und dem Verhältnis der Abflussspende zur mittleren Abflussspende  $q_{347}/Mq$  besteht gemäss Abb. 20 eine gewisse Korrelation. Um bei Fragestellungen, bei denen kleinere Abflüsse ( $t > 50$  d) von Interesse sind, eine bessere Genauigkeit zu erreichen, kann der Parameter B mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$\text{Gl.33} \quad B = 0.0067 \cdot \frac{q_{347}}{Mq} - 0.0036$$

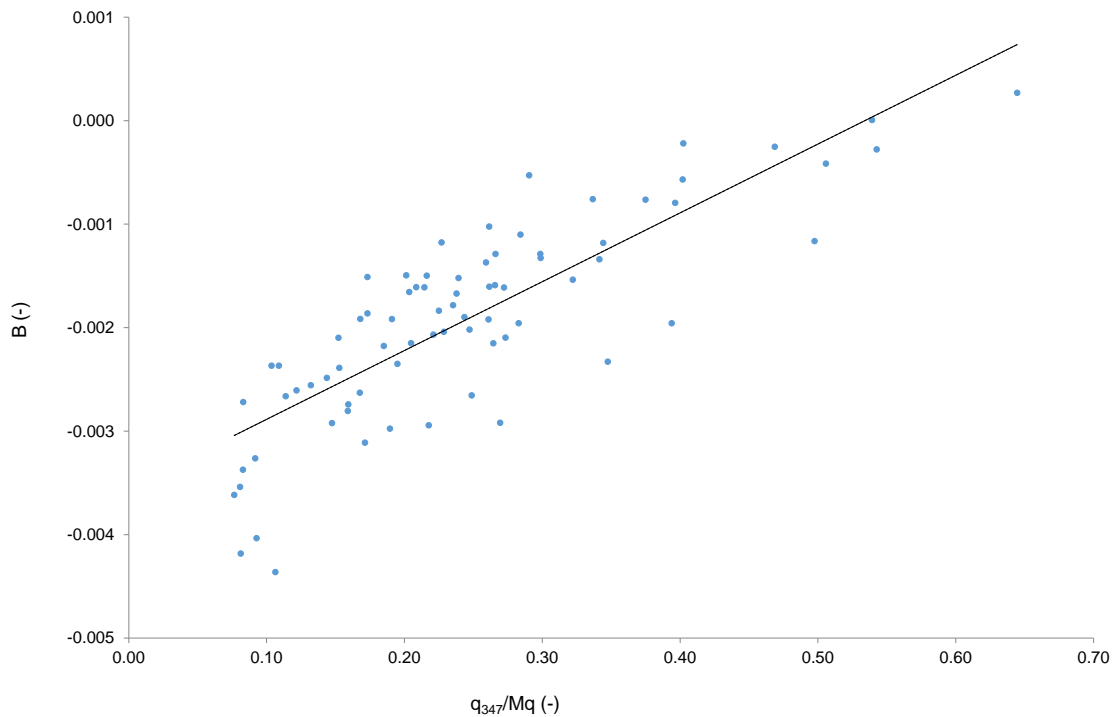


Abb. 20 Korrelation zwischen  $B$  und  $q_{347}/Mq$ .

#### 5.2.4 Parameter C

**Indirektes Vorgehen:** Der **Parameter C** dient der Korrektur der Spitzenabflüsse mit sehr kurzen Überschreitungsdauern (< 12 h). Weil keine eindeutige Korrelation zwischen C einerseits und den Parametern A und D sowie anderen Einflussgrößen gefunden wurde, musste ein indirektes Vorgehen gewählt werden.

Anstatt C zu bestimmen und daraus die Spitzenabflüsse zu berechnen, wird der absolute Wert des Spitzenabflusses angenähert und daraus der erforderliche Wert für C, unter Berücksichtigung der zuvor bestimmten Werte für A und D, rückgerechnet.

**Erwartungswert MHQ:** Der Spitzenwert der Dauerkurve (Überschreitungsdauer = 1 h) stellt den mittleren jährlichen Hochwasserabfluss MHQ (in  $m^3/s$ ) dar. Der Erwartungswert für das MHQ kann anhand von drei unterschiedlichen Ansätzen bestimmt werden.

- a. Nach Auswertung der Messdaten von 76 Stationen ergab sich für das Verhältnis von  $MHQ/Q_{1d}$  eine eher geringe Bandbreite des Erwartungswerts (Tab. 3). Nach vorgängiger Bestimmung von  $Q_{1d}$  (mittels dem Parameter D) kann somit in Abhängigkeit des Abflussregimetyps die Größenordnung von MHQ eingegrenzt werden.

Tab. 3 Bandbreite des Verhältnisses  $MHQ/Q_{1d}$

	alle	glacial	nival	pluvial
Quantil (-)	$MHQ/Q_{1d}$ (-)	$MHQ/Q_{1d}$ (-)	$MHQ/Q_{1d}$ (-)	$MHQ/Q_{1d}$ (-)
1.00	2.67	2.67	2.32	2.41
0.75	2.02	2.06	1.89	1.95
0.50	1.79	1.90	1.55	1.68
0.25	1.49	1.74	1.29	1.48
0.00	1.17	1.20	1.17	1.30
Mittelwert	1.77	1.91	1.62	1.75

- b. Analog lässt sich auch für das Verhältnis von  $MHQ/HQ_{100}$  eine gewisse Bandbreite angeben<sup>16</sup> (vgl. Tab. 4). Mit Kenntnis des  $HQ_{100}$  kann daraus ein Erwartungswert für das  $MHQ$  angenähert werden. Das  $HQ_{100}$  lässt sich, falls nicht aus Gefahrenkarten oder anderen Studien bereits Werte vorliegen, vereinfachend mit der Formel nach Kürsteiner oder mit  $HQ_{x\_meso\_CH}$  ( $A_{EZG} > 10 \text{ km}^2$ ) resp. HAKESCH ( $< 10 \text{ km}^2$ ) ermitteln.

Tab. 4: Bandbreite des Verhältnisses  $MHQ/HQ_{100}$

	alle	glacial	nival	pluvial
Quantil	$MHQ/HQ_{100}$	$MHQ/HQ_{100}$	$MHQ/HQ_{100}$	$MHQ/HQ_{100}$
1.00	0.65	0.54	0.64	0.65
0.75	0.48	0.43	0.50	0.49
0.50	0.40	0.37	0.42	0.42
0.25	0.31	0.30	0.33	0.31
0.00	0.21	0.22	0.29	0.21
Mittelwert	0.40	0.38	0.43	0.40

- c. Analog dem Verfahren zur Bestimmung von D (Kapitel 5.2.1), kann mittels Abb. 21 der  $C^*$ -Wert ermittelt werden. Der  $C^*$ -Wert entspricht dabei dem normierten und logarithmierten  $MHQ$  ( $C^* = \log(MHQ/MQ)$ ). Anschliessend kann mit der Gl.38 das  $MHQ$  berechnet werden.

$$\text{Gl.34} \quad \text{glacial} \quad C^* = 0.0087 \cdot \frac{Ni_{\text{Gebiet},tk}}{\sqrt{ff \cdot \psi}} + 0.813$$

$$\text{Gl.35} \quad \text{nival} \quad C^* = 0.0087 \cdot \frac{Ni_{\text{Gebiet},tk}}{\sqrt{ff \cdot \psi}} + 1.239$$

<sup>16</sup> Bei der Auswertung wurde das  $HQ_{100}$  der BAFU-Statistik entnommen.

Gl.36	pluvial (Klasse 1) ( $q_{347} \leq 6 \text{ l/(s*km}^2\text{)}$ )	$C^* = 0.0087 \cdot \frac{Ni_{\text{Gebiet,tk}}}{\sqrt{ff \cdot \psi}} + 1.045$
Gl.37	pluvial (Klasse 2) ( $q_{347} > 6 \text{ l/(s*km}^2\text{)}$ )	$C^* = 0.0087 \cdot \frac{Ni_{\text{Gebiet,tk}}}{\sqrt{ff \cdot \psi}} + 0.917$
Gl.38	$MHQ = 10^{C^*} \cdot MQ$	

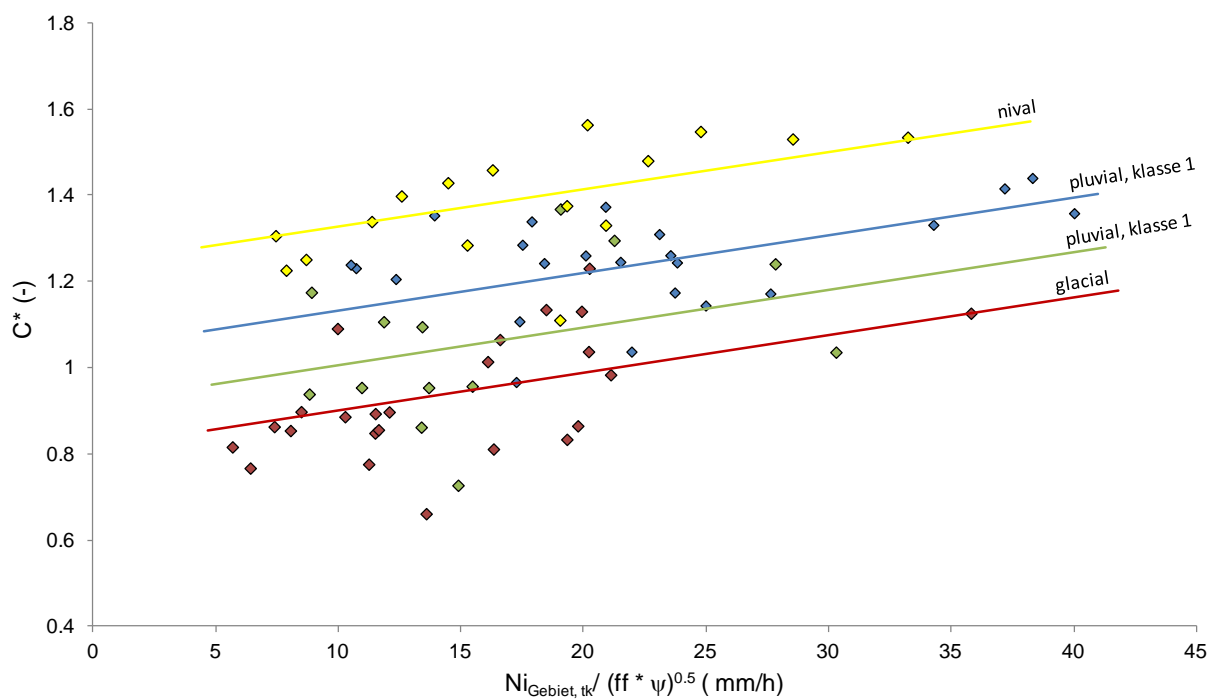


Abb. 21 Abhängigkeit des Wertes für  $C^*$  ( $= \log(MHQ/MQ)$ ) von verschiedenen Einflussgrößen

**Bestimmung C:** Es empfiehlt sich, jeweils alle drei Methoden anzuwenden und einen plausiblen Wert für das MHQ festzulegen. Anschliessend kann über Gl.22 der entsprechende Parameter C berechnet werden.

### 5.3 Absolute mittlere Dauerlinien

Nach Bestimmung der Parameter A, B, C und D sowie des Mittelwasserabflusses MQ kann die mittlere, absolute Dauerlinie mit Gl.39 bestimmt werden:

$$\text{Gl.39} \quad Q(t) = MQ \cdot 10^{A \cdot \ln(t) + B \cdot t + C \cdot \frac{1}{t} + D}$$

### 5.4 Genauigkeit

Mit dem in Kap. 5.1 bis 5.3 erläuterten Vorgehen wurden für die 76 zur Herleitung des Verfahrens bezogenen Messstationen die jeweils mittleren Dauerkurven ermittelt<sup>17</sup> und mit den Messwerten verglichen. In Abb. 22 sind für ausgewählte Überschreitungsdauern t in einer Box-Plot-Darstellung die Abweichungen zwischen den gemessenen und den berechneten Werten dargestellt.

In 50 % der Fälle (Bandbreite des roten Rechtecks) liegt der Fehler absolut unter  $\pm 10\%$ . In 50 % der Fälle können die Abweichungen, je nach Überschreitungsdauer t,  $\pm 30\%$  betragen. Die Abweichungen sind relativ symmetrisch um 0 % verteilt, d.h. mit dem Verfahren werden die wahren Werte etwa gleich häufig über- als auch unterschätzt. Mit dem Verfahren können also in guter Genauigkeit mittlere Dauerkurven ermittelt werden.

---

<sup>17</sup> Da sich das Verfahren auf die Herleitung der normierten Dauerkurve beschränkt, wurde das Mittelwasser aus den Messwerten übernommen.



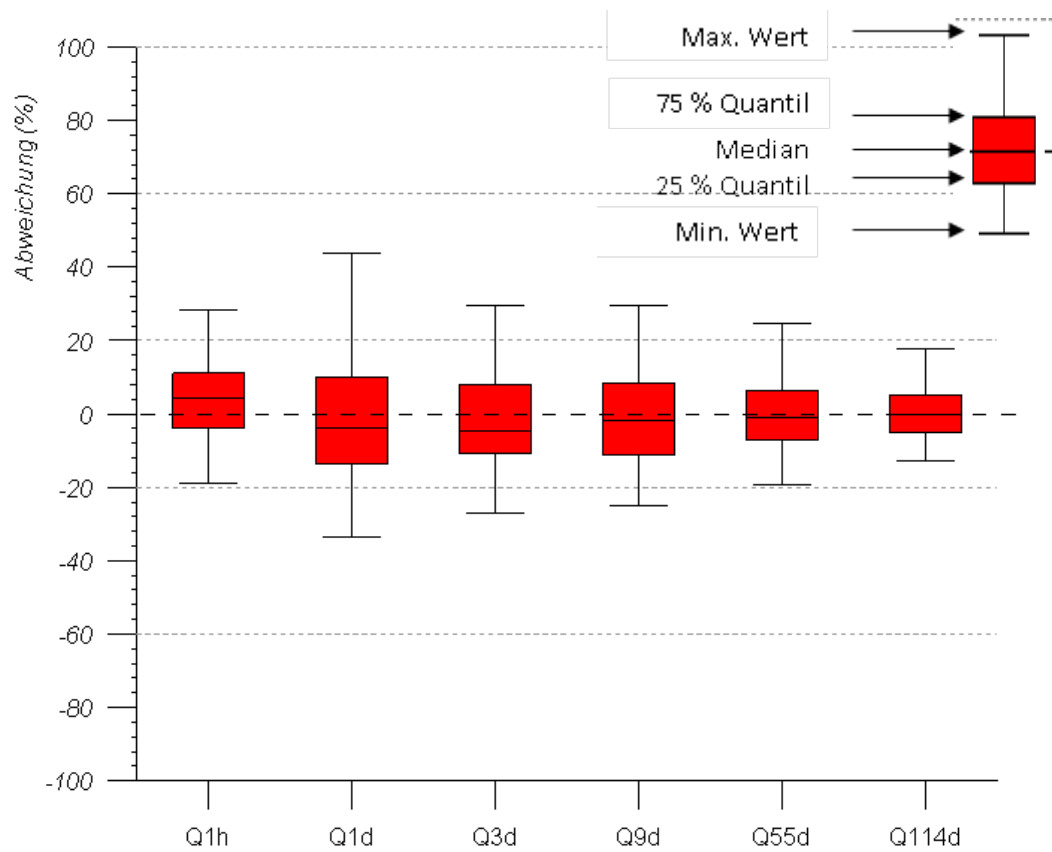


Abb. 22 Box-Plot-Darstellung der Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Dauerkurven.

## 6 Erläuterungen zur Methode für Tal- und Gebirgsflüsse

### 6.1 Entwicklung der Methode

**Vorgehen:** Zur Entwicklung der Methode für die Tal- und Gebirgsflüsse wurde an verschiedenen Flüssen mit bestehenden Referenzwerten die mittlere jährliche Geschiebefracht auf Stufe Normalabfluss berechnet. Die Referenzwerte stützen sich auf die Werte aus Geschiebehaushaltsstudien (Tab. 5) oder auf die Daten des Geschiebesammlernetzwerkes SOLID.

Im Rahmen einer Kalibrierung wurde die beste Kombination aus Einflussgrößen (Gefälle, Korndurchmesser, Abflusstiefe, etc.) und Berechnungsansätzen (Formeln) zur Berechnung der Geschiebefrachten evaluiert. Die Kombinationen wurden solange angepasst, bis eine möglichst geringe Abweichung zwischen den berechneten und den erwarteten (Referenzwerte) Geschiebefrachten resultierte.

Aufgrund des Gefälles wurden die einzelnen Seitenbäche klassifiziert und für jede Klasse ein Vorschlag für die Wahl der Einflussgrößen und der Berechnungsansätze erarbeitet (sogenanntes Setup). Dieses Setup stellt den Kern der Methode dar.

**Referenzwerte:** Bei den Referenzwerten handelt es sich um erwartete mittlere jährliche Geschiebefrachten, welche mehrheitlich im Rahmen von Geschiebehaushaltstudien ermittelt wurden. Bei solchen Studien wird der Geschiebehaushalt eines Vorfluters mit Hilfe eines Geschiebetransportmodells grossräumig untersucht, wobei die verschiedenen Parameter wie die Geschiebeeinträge der Seitenbäche oder die Kornverteilung des Sohlenmaterials so lange variiert werden, bis eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Sohlenlagen erreicht wird. Diese Geschiebestudien bieten den Vorteil, dass die Geschiebelieferung aus den Seitenbächen auf ein ganzes morphologisches System abgestützt ist. Zwar weisen auch die so ermittelten Referenzwerte eine gewisse Unsicherheit auf, diese ist jedoch geringer als die Unsicherheit bei rein lokalen Untersuchungen. Die Referenzwerte dürfen aber nicht als wahre Grössen angenommen werden. Das gleiche gilt auch für die verwendeten SOLID-Daten, welche aufgrund der teilweise kurzen Messperioden ebenfalls Unsicherheiten aufweisen.

**Untersuchte Flüsse:** Bei der Wahl der untersuchten Flüsse wurde darauf geachtet, dass die Vorfluter-Seitenbach-Systeme unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf Gefälle, Breite, geografische Lage und Abflussregime aufweisen. Insgesamt wurde an sieben Vorflutern mit total 28 Seitenbächen (Tab. 6) die mittlere jährliche Geschiebefracht berechnet und daraus das Setup abgeleitet.

Tab. 5 Verwendete Studien mit Referenzwerten (alle von Hunziker, Zarn und Partner)

Vorfluter	Quelle
Aare	Augstbach Balsthal, A-209, Januar 2004
Emme	Hochwasserschutz und Revitalisierung Emme, A-596, 2012
Kleine Emme	Geschiebemodell Kleine Emme/Reuss, A-381, 2008
Landquart	Schraubach, A-1000.18, 2002; Taschinasbach, A-083, 2000-2002 Transportbeginn Furnerbach und Arieschbach, A-452, 2008 UVB Kraftwerk Chlus, A-464, 2008-2009
Rhône	Rhonekorrektur, A-236, in Bearbeitung
Saaser Vispa	Geschiebehaushalt Saastal; A-147, Juni 2003
Thur	Thur, Grüneck bis Ror, A-067, 2001

Tab. 6 Untersuchte Vorfluter-Seitenbach-Systeme, anhand welcher die Methode der Tal- und Gebirgsflüsse entwickelt wurde. Die Referenzwerte der mit \* markierten Seitenbäche beziehen sich auf die SOLID-Datenbank.

Vorfluter-Typ	Charakteristik in Bezug auf den Geschiebehaushalt	Vorfluter	Untersuchte Seitenbäche
Grosser Mittellandfluss	Eintrag durch Seitenbäche gering, grosse Zuflüsse sind relevant, Abflussmessstationen im Seitenbach teilweise vorhanden	Aare	Mümliswilerbach und Siggern Wyna*, Talbach* und Ruderchen*
		Rhein	Sisslen*
		Thur	Murg
		Emme	Emme ob Emmenmatt, Grüene und Ilfis
Grosser Alpenfluss	Eintrag durch grosse und kleine Seitenbäche, Abflussmessstationen teilweise vorhanden	Kleine Emme	Grosse Entle, grosse und kleine Fontanne, Rümli
		Landquart	Arieschbach, Furnerbach, Schranggabach, Schraubach und Taschinasbach
		Rhône	Vispa, Lonza, Sionne, Navisence und Morge
Kleiner Alpenfluss	Eintrag durch kleine Seitenbäche, mehrheitlich keine Abflussmessstationen vorhanden	Saaser Vispa	Almagellerbach und Fee-Vispa
			Eistlenbach*, Wallbach*

**Grundsätze:** Grundsätzlich wurden nur Berechnungsansätze verwendet, welche in der Praxis und in der Theorie anerkannt sind. Alle verwendeten Daten sind allgemein zugänglich oder können im Feld erhoben werden.

**Technik:** In der ersten Version der vorliegenden Praxishilfe musste entschieden werden, inwieweit eine Deckschichtbildung auf die Transportkapazität einen Einfluss hat und ob die effektive Fracht eher der minimalen oder der maximalen Fracht entspricht. Da der Unterschied zwischen der minimalen und der maximalen Fracht gerade bei steilen Gewässern sehr gross ist, war dieses Vorgehen mit grossen Unsicherheiten verbunden.

Die vorliegende Version basiert nun auf einem Transportmodell, welches auf der Kornverteilung der Oberfläche basiert und bei welchem keine Unterscheidung in minimale und maximale Fracht erfolgt. Ein eventuelles Geschiebedefizit manifestiert sich in der Kornverteilung der Sohlenoberfläche. Diese wirkt als Regulator, welche je nach Geschiebezufuhr mit einer Vergröberung (im Erosionszustand) oder Verfeinerung (im Auflandungszustand) der Kornverteilung reagiert.

## 6.2 Diskussion der Methode

### 6.2.1 Frachten

**Performance:** Im Rahmen der Kalibrierung wurden die Frachten von 28 Referenzstrecken verglichen. Bei insgesamt 14 Bächen wird eine Abweichung von einem Faktor kleiner 2 erreicht, bei weiteren 5 Bächen liegt das Resultat bei einem Faktor 3. Der Rest weist Abweichungen grösser als einen Faktor 3 auf (Abb. 23 und Abb. 24).

Dabei ist zu beachten, dass die erwarteten Geschiebefrachten mehrheitlich in Geschiebestudien ermittelt wurden. Zwar weisen diese Werte eine verhältnismässig hohe Genauigkeit auf, sie dürfen jedoch nicht als absolut wahre Werte verstanden werden.

**Bereichsgrenzen:** Bei Flüssen, welche ein Gefälle in der Nähe der Bereichsgrenze aufweisen, sollte jeweils das Setup für beide Gefällsbereiche angewendet werden. Die Grenzen sind als Richtwert zu verstehen. Beispielsweise weist die Siggern in der untersuchten Strecke ein Gefälle von 1.14% auf. Die Berechnung mit dem Setup für Gefälle > 1 % ergibt ein vergleichbares Ergebnis wie das Setup mit Gefällen < 1% (300 m<sup>3</sup>/Jahr mit der steilen Methode und 300 m<sup>3</sup>/Jahr mit der flachen Methode), wobei die erwartete mittlere jährliche Geschiebefracht bei 500 m<sup>3</sup>/Jahr liegt.

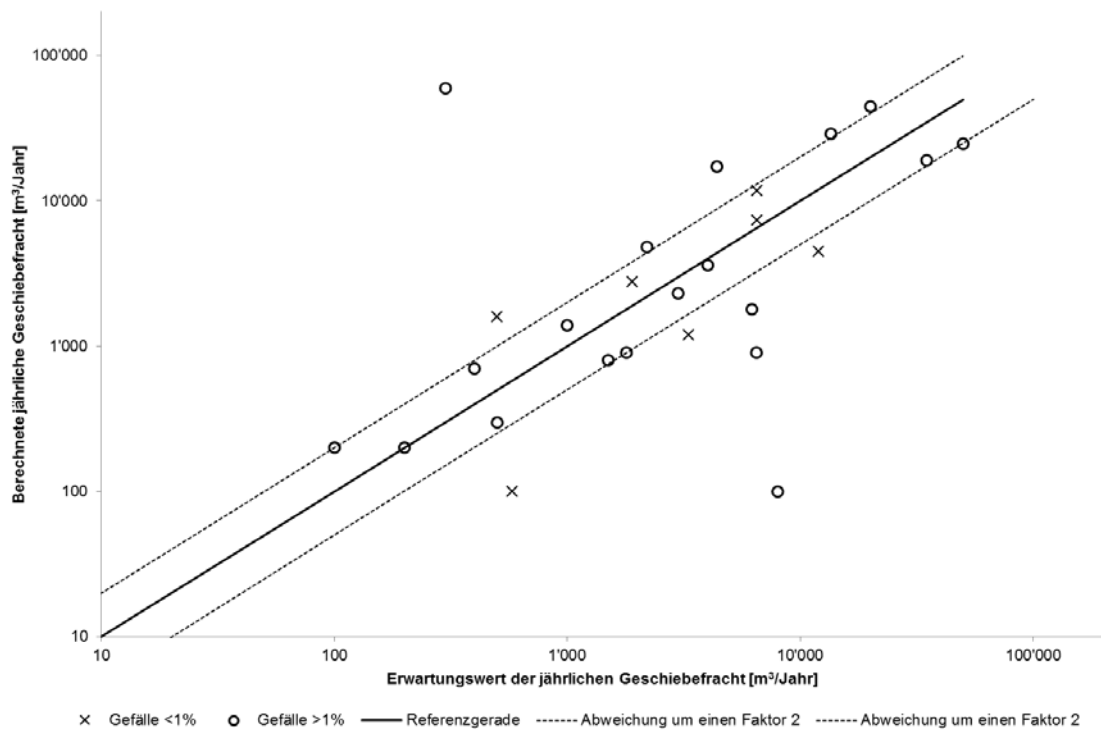


Abb. 23 Doppellogarithmischer Vergleich der berechneten mittleren jährlichen Geschiebefrachten mit den erwarteten Geschiebefrachten. Die durchgezogene Linie entspricht einer perfekten Übereinstimmung, die gestrichelten Linien stellen das Intervall mit einer Abweichung um einen Faktor 2 dar. Die Lonza und der Schrangabach sind aus Darstellungsgründen nicht abgebildet (vgl. Tab. 12 & Tab. 13).

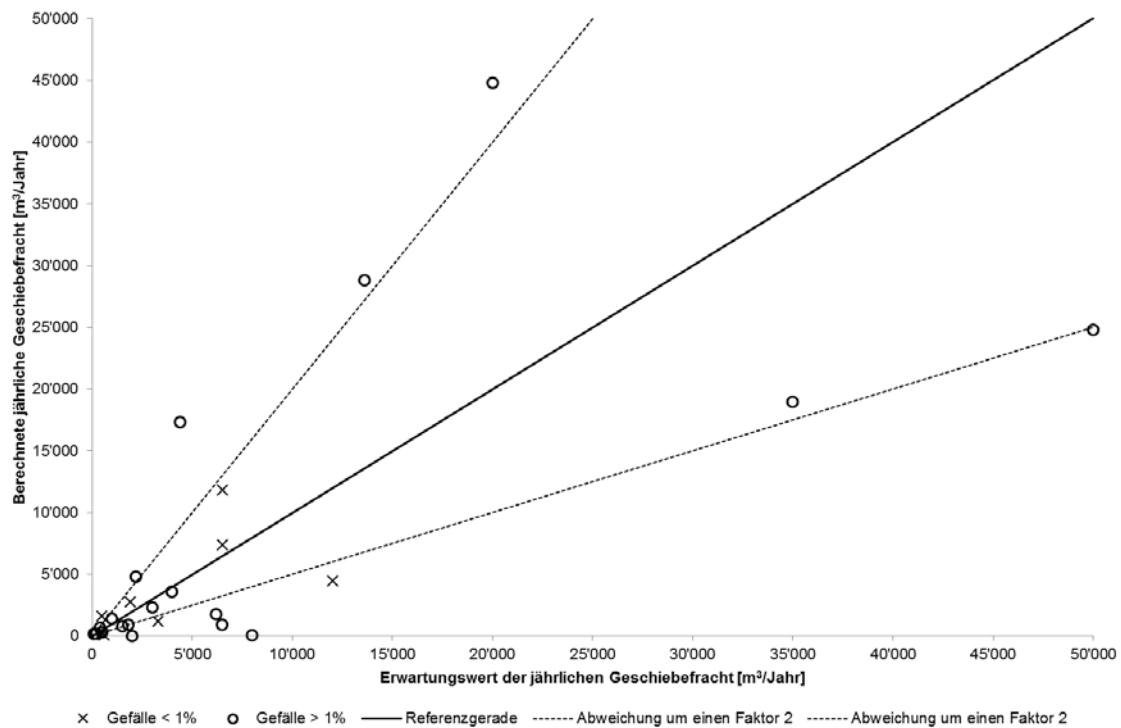


Abb. 24 Linearer Vergleich der berechneten mittleren jährlichen Geschiebefrachten mit den erwarteten Geschiebefrachten. Die durchgezogene Linie entspricht einer perfekten Übereinstimmung, die gestrichelten Linien stellen das Intervall mit einer Abweichung um einen Faktor 2 dar. Die Lonza und der Almagellerbach sind aus Darstellungsgründen nicht abgebildet (vgl. Tab. 12 & Tab. 13).

## 6.2.2 Sensitivität der Ergebnisse auf die Eingabeparameter

**Charakteristischer Korndurchmesser:** Die Sensitivität der mittleren jährlichen Geschiebefracht auf die charakteristischen Korndurchmesser wird am Beispiel der Emme oberhalb Emmenmatt (BE) und der Morge (VS) diskutiert. Die beiden Flüsse unterscheiden sich einerseits im Gefälle, andererseits in der Bandbreite der vorgefundenen Kornverteilungen. Während das Sohlmaterial an der Emme homogen ist und die charakteristischen Korndurchmesser nur gering variieren, findet man an der Morge eine sehr inhomogene Kornverteilung.



a) Probe I

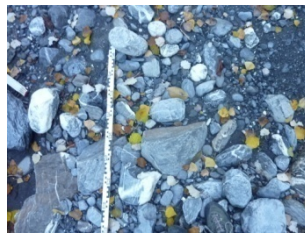


b) Probe II

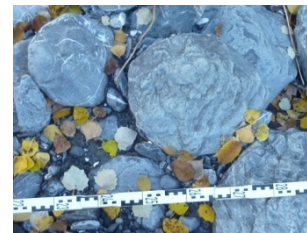
Abb. 25 Sohlenmaterial an der Emme (BE): Die Emme weist in diesem Abschnitt ein Gefälle von 0.89 % und eine Breite von 37 Metern auf. Die Linienproben ergeben ein dm von 5.27 cm (Probe I) resp. 5.06 cm (Probe II).



a) Probe I



b) Probe II



c) Probe III

Abb. 26 Sohlenmaterial an der Morge: Die Morge weist in diesem Abschnitt ein Gefälle von 2.97 % und eine Breite von 15 Metern auf. Die grossen Unterschiede im Sohlenmaterial sind typisch und werden bei allen untersuchten Flüssen mit steilen Gefällen beobachtet.

Je nach Wahl des Korndurchmessers zur Berechnung der Transportkapazität resultieren sehr unterschiedliche Frachten. Tab. 7 zeigt die Sensitivität der berechneten jährlichen Geschiebefracht am Beispiel der Morge (VS). Die erwartete Fracht liegt bei ca. 6'500 m<sup>3</sup>/Jahr. Die Auswertung ergibt, dass je nach Wahl des Korndurchmessers die berechneten Frachten stark vom Erwartungswert abweichen.

Tab. 7 Berechnete charakteristische Korndurchmesser für die in Abb. 26 dargestellten Linienproben und die resultierenden mittleren jährlichen Geschiebefrachten der Morge.

Probe	$d_m$ (cm)	$d_{84}$ (cm)	$d_{90}$ (cm)	Berechnete Fracht (m <sup>3</sup> /Jahr)
I,	2.8	4.7	5.2	88'000
II,	8.5	15.3	17.1	11'400
III,	33.6	59.1	66.5	0
Mittelwert (I, II, III)	14.5	26.4	29.6	900

**Makrorauigkeit:** Die Sensitivität der berechneten mittleren jährlichen Geschiebefracht bezüglich der Makrorauigkeit (Exponent b) wird am Beispiel des Rümli (LU) und der Sionne diskutiert (Tab. 8).

Tab. 8 Sensitivität der mittleren jährlichen Geschiebefracht bezüglich der Makrorauigkeit am Beispiel des Rümli (LU) und der Sionne (VS)

Seitenbach	Rümli (LU)	Sionne (VS)
Gefälle (%)	2.8	11.3
Erwartete Geschiebefracht (m <sup>3</sup> /Jahr):	4'000	2'200
<b>Berechnete mittlere jährliche Geschiebefracht (m<sup>3</sup>/ Jahr)</b>		
b= 1.5	5'400	11'500
b= 2.0	3'600	4'800
b= 2.5	2'400	2'000

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass für steilere Gerinne tendenziell ein grösserer Wert für den Exponenten b gewählt werden könnte, während für Gefälle zwischen 1-3% ein Wert kleiner als 2.0 bessere Resultate ergeben würde. Aus Gründen der Einfachheit wurde jedoch auf eine weitere Unterteilung in zwei Gefällsklassen verzichtet.

### 6.3 Anwendungsbeispiel

Am Beispiel der grossen Entle (Abb. 27) im Kanton Luzern soll Schritt für Schritt aufgezeigt werden, wie die Methode der Tal- und Gebirgsflüsse angewendet wird.

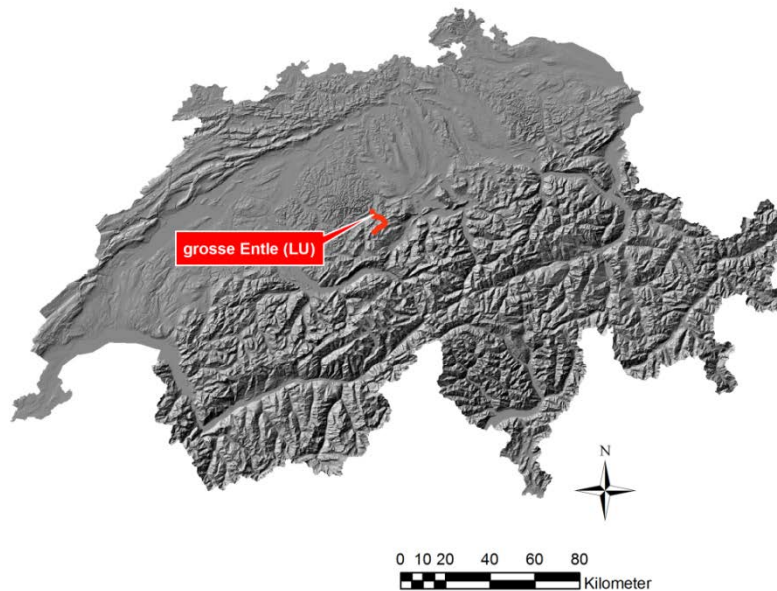


Abb. 27: Geografische Lage der Grossen Entle (LU) (Quelle: swissALTI3D, Hillshade)

Die mittlere jährliche Geschiebefracht wird nach der Methode der Tal- und Gebirgsflüsse bestimmt, da die Grosse Entle ein Einzugsgebiet von ca. 60 km<sup>2</sup> entwässert und viele Strecken mit einem Gefälle < 10 % aufweist. Sie mündet bei Entlebuch (LU) in die kleine Emme. Es ist keine Abflussmessstation vorhanden.

#### 6.3.1 Schritt 1: Festlegen der Referenzstrecke

Zur Festlegung der Referenzstrecke wird ein Längenprofil auf Basis der Datensätze *Swiss TLM3D* und *swissALTI3D* (Abb. 28) erstellt.

**Auswahl der Referenzstrecke:** Die Analyse des Längenprofils ergibt, dass sich ein Abschnitt im unteren Teil der Grossen Entle, ca. 2 km vor der Mündung in die Kleine Emme, als Referenzstrecke eignet. Bei Gewiss-km 2.06 befindet sich ein Absturz. Oberhalb dieses Absturzes ist das Gerinne verhältnismässig flach (Abb. 28) und breit (Abb. 29). Unterhalb des Absturzes verläuft der Fluss im Fels und das zugeführte Material wird durch transportiert. Die blau markierte Flachstrecke oberhalb des Absturzes (vgl. Abb. 28) eignet sich als Referenzstrecke.



**Kriterium Gefälle:**

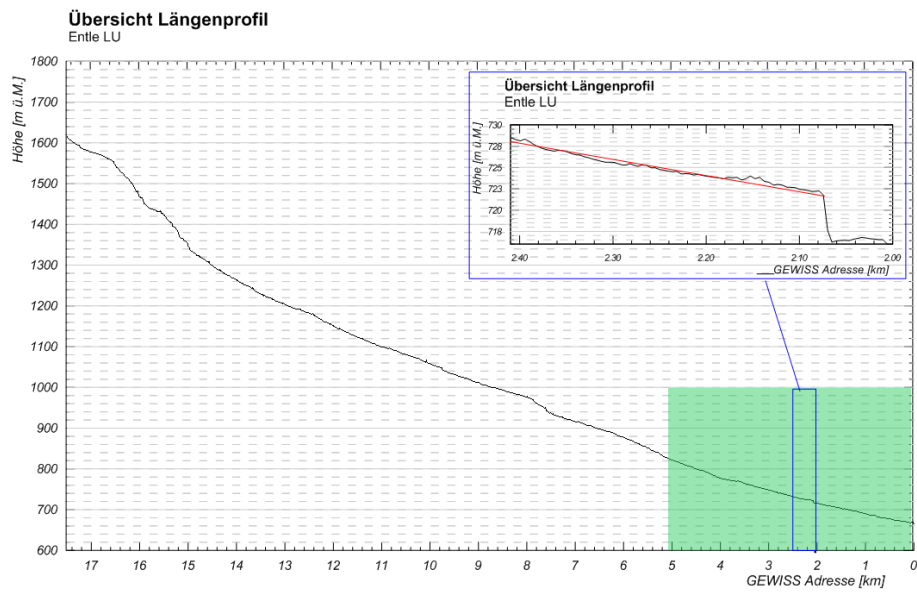


Abb. 28 Längenprofil der Grossen Entle. Grün markiert ist der flachere Unterlauf, wobei in blau der Abschnitt für eine mögliche Referenzstrecke hervorgehoben ist.

**Kriterium Breite:**

Zur Festlegung der Breite wird das Orthofoto (Abb. 29) verwendet.

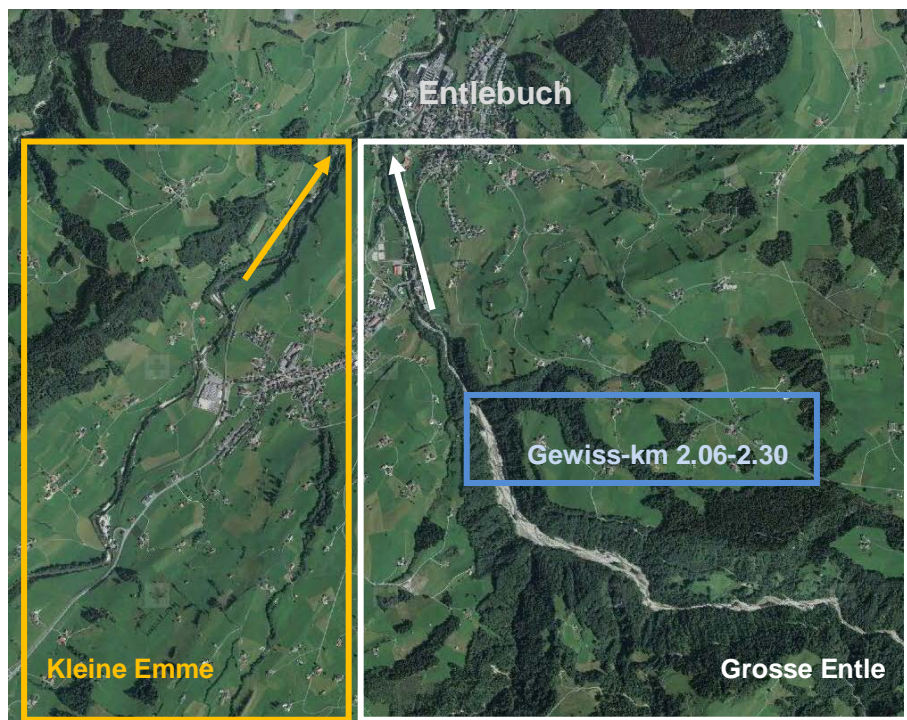


Abb. 29 Orthofoto der möglichen Referenzstrecke an der grossen Entle. (Quelle: Swisimage). Orange: Kleine Emme, Weiss: grosse Entle.

### 6.3.2 Schritt 2: Bestimmung der Charakteristiken der Referenzstrecke

**Begehung:** Bei der Begehung werden verschiedene Parameter aufgenommen und die lokalen gewässerspezifischen Verhältnisse beurteilt (Abb. 30).

Wichtige Merkmale bei der Bestimmung von Referenzstrecken			
	<i>Grosse</i>		
Fluss:	<i>Entle</i>	Datum:	<i>14.09.2012</i>
LPNr.:	<i>01-04</i>	Beobachter:	<i>Hans Muster</i>
Zeit:			
Begründung für die Wahl der Strecke als Referenzstrecke:			
Lage im Längenprofil	<input checked="" type="checkbox"/>	Unterlauf	<input type="checkbox"/>
		Mittellauf	<input type="checkbox"/>
		Oberlauf	<input type="checkbox"/>
Gefälle	<input checked="" type="checkbox"/>	flach	<input type="checkbox"/>
		mittel	<input type="checkbox"/>
		steil	<input type="checkbox"/>
Breite (im Vergleich zu anderen Streckenabschnitten)	<input checked="" type="checkbox"/>	breit	<input type="checkbox"/>
		durchschnittlich	<input type="checkbox"/>
		schmal	<input type="checkbox"/>
Charakteristiken des Standorts			
<b>Breite</b>			
Gesamtgewässerbreite:	<i>im Orthofoto bestimmt</i>		m
% Anteil Bewuchs:	<i>etwa 40%</i>		%
Regimebreite erreicht:	<i>ja</i>		
<b>Schwellen</b>			
Gibt es Schwellen?	<input type="checkbox"/>	ja	<input checked="" type="checkbox"/>
			nein
<i>(Falls Schwellen vorhanden muss das Nettogefälle ermittelt werden)</i>			
Wenn ja, Höhe der Abstürze			m (vom WSP gemessen)
Abstand zwischen den Schwellen:			m
<b>Beurteilung Makrorauigkeit</b>			
Sehr grosse Blöcke im Gerinne	<input checked="" type="checkbox"/>	ja	<input type="checkbox"/>
			nein
Stufen-Becken-Systeme erkennbar	<input type="checkbox"/>	ja	<input checked="" type="checkbox"/>
			nein
<b>Beurteilung des Sohlenmaterial</b>			
Vergröberung Oberfläche	<input type="checkbox"/>	ja	<input checked="" type="checkbox"/>
			nein

Abb. 30 Protokoll der Begehung

**Gerinnegeometrie:** Aufgrund der Begehung (Abb. 31) und der Auswertung des Orthofotos (Abb. 29) wird ein verzweigtes Gerinne mit 40 % Bewuchs angenommen.



Abb. 31 Beurteilung der Breite. Blick flussaufwärts in Richtung des untersuchten Abschnitts. Zwei Teilgerinne sind sichtbar. Die Mittelbänke sind bewachsen.

**Kornverteilung:** Zur Bestimmung der Kornverteilung werden 3 Linienproben aufgenommen (Tab. 9 und Abb. 32).



Abb. 32 Aufnahme der Linienproben: Links: Blick flussaufwärts, Probe I. Mitte: Blick flussabwärts, Probe II, rechts: Blick flussaufwärts, Probe III.

Tab. 9 Berechnete charakteristische Korndurchmesser an der Grossen Entle

Probe	$d_m$ (cm)	$d_{84}$ (cm)	$d_{90}$ (cm)
I	9.8	18	20
II	12.5	23	25
III	11.3	20	24
Mittelwert	11	20	23

**Makrorauigkeit:** Mit einem Gefälle von 2.1 % gehört die Grosse Entle in die Klasse der Gefälle > 1 %. Für diese Gruppe erfolgt die Berechnung nach Gl.6-Gl.19. Im Fall der Grossen Entle wird mit einem verzweigten Gerinne gerechnet. Die Makrorauigkeit wird mit einem Exponenten  $b = 2$  berücksichtigt.

**Eingabeparameter:** Zur Berechnung der Transportkapazität wird von folgenden charakteristischen Grössen (Tab. 10) ausgegangen:

Tab. 10 Eingabeparameter an der Grossen Entle

Gefälle	J = 2.1 %
Gesamte Gerinnebreite	$B_{\text{gesamt}} = 55 \text{ m}$
Anteil Bewuchs	$\%_{\text{Bewuchs}} = 40 \%$
Gerinnemorphologie	verzweigt
Mittlerer Korndurchmesser	$d_m = 0.11 \text{ m}$
Korndurchmesser $d_{84}$	$d_{84} = 0.20 \text{ m}$
Korndurchmesser $d_{90}$	$d_{90} = 0.23 \text{ m}$
Makrorauigkeit (Parameter b)	2.0

### 6.3.3 Schritt 3: Berechnung der mittleren jährlichen Geschiebefracht

Aufgrund des Gefälles ist der Bereich > 1.0 % massgebend für die Berechnung. Die Berechnung erfolgt am Beispiel des jährlichen maximalen Abflusses von  $55 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Schritt	Zielgrösse	Beziehung
I.	Flussbettbreite	$B_{\text{gesamt}} - \%_{\text{Bewuchs}} \cdot B_{\text{gesamt}} = B_F$ $B_F = 55 - 0.4 \cdot 55 \text{ m} = 33 \text{ m}$
II.	Gl.6 Korrekturfaktor Breite	$M_{\text{BW}} = \frac{B_F^{0.65} \cdot d_m^{0.25} \cdot J^{0.3} \cdot g^{0.18}}{Q^{0.36}} = 0.63$
III.	Gl.7 Korrektur Breite	$B_{\text{W,Marti}} = B_F \cdot 1.19 \cdot e^{-0.6 \cdot M_{\text{BW}}} = 27 \text{ m}$
IV.	Spezifischer Abfluss	$q = \frac{Q}{B_{\text{W,Marti}}} = 2.0 \frac{\text{m}^3}{\text{sm}}$

V.	Gl.8	Dimensionsloser, spezifischer Abfluss	$q^{**} = \frac{q}{\sqrt{g \cdot J \cdot D_{84}^3}} = 49.9$
VI.	Gl.9	Geschwindigkeit (mit Berücksichtigung aller Rauigkeitselemente) basiert auf Q	$v_{\text{tot}} = \sqrt{g \cdot J \cdot D_{84}} \cdot 1.443 \cdot q^{**0.60} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{q^{**}}{43.78} \right)^{0.8214} \right]^{-0.2435} = 2.6$
VII.		Berechnung der Abflusshöhe	$h = \frac{Q}{B_{W,\text{Martini}} \cdot v_{\text{tot}}} = 0.8 \text{ m}$
VIII.	Gl.10	Froude	$Fr = \frac{v_{\text{tot}}}{\sqrt{gh}} = 0.9$
IX.	Gl.11	Froude < 1.0	$v = v_{\text{tot}}$
X.	Gl.12	Gesamtraugigkeit (nach Strickler, 1923)	$k_{\text{tot}} = \frac{v}{\sqrt{J} \cdot h^{\frac{2}{3}}} = 20.5 \frac{\text{m}^{\frac{1}{3}}}{\text{s}}$
XI.	Gl.13	Kornrauigkeit	$k_{\text{korn}} = \frac{23.0}{\sqrt[6]{d_{90}}} = 29.4 \frac{\text{m}^{\frac{1}{3}}}{\text{s}}$
XII.	Gl.14	Reduziertes Gefälle	$J_{\text{red}} = J \cdot \left( \frac{k_{\text{tot}}}{k_{\text{korn}}} \right)^b = 0.009$
XIII.	Gl.15	Dimensionslose kritische Schubspannung	$\theta_{c,\text{Lamb}} = 0.15 \cdot J^{0.25} = 0.057$
XIV.	Gl.16	Reduzierte dimensionslose kritische Schubspannung	$\theta_{c,\text{red}} = \theta_{c,\text{Lamb}} \cdot \left( \frac{J_{\text{red}}}{J} \right) = 0.023$
XV.	Gl.18	Vereinfachung:	$\left( \frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} = 1.05$
XVI.	Gl.19	Geschiebetransportkapazität	
			$G_B = 4 \cdot B_{W,\text{Martini}} \cdot \frac{\rho_s}{s-1} \left( \frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} \cdot J_{\text{red}}^{1.6} \cdot h \cdot v_{\text{tot}} \cdot \left( 1 - \frac{\theta_{c,\text{red}} \cdot (s-1) \cdot d_m}{h \cdot J_{\text{red}}} \right) = 69.2 \text{ kg/s}$
XVII.		Geschiebefracht	$t_o \rightarrow Q > Q_0$ $GF_{\text{Max,kg}} = \int_{t_o}^{t_{\text{jahr}}} G_b dt$

XVIII.

Umrechnung in

$$GF_{m^3} = GF_{kg}/1.8 = m^3/Jahr$$

---

Dies ergibt für die Grosse Entle:

Tab. 11 Berechnete mittlere jährliche Geschiebefracht

<b>GF<sub>max,m<sup>3</sup></sub></b>
---------------------------------------

1'800 m <sup>3</sup> /J
-------------------------

---

## 7 Erläuterungen zur Methode der steilen Gebirgsbäche

### 7.1 Entwicklung der Methode

#### 7.1.1 Datengrundlagen und Auswertungen

Zur Methodenentwicklung wurden die dokumentierten Leerungskubaturen der Geschiebesammler inkl. der Ereigniskataster von 75 Einzugsgebieten des Geschiebemessnetzes der Gruppe für operationelle Hydrologie GHO (SOLID-Datenbank des BAFU) ausgewertet. Ferner wurden ca. 50 Bäche aus Geschiebestudien (Thur mit Sitter und Urnäsch, Emmental und Matter Vispa) beurteilt und die Ergebnisse verglichen, sowie Werte aus der Literatur einbezogen. Anhand der Auswertung von Ereignisanalysen und Gefahrenkarten wurden die Abschätzmethoden für seltenere Ereignisse zusätzlich verfeinert.

Anhand der Messreihen konnten Extremwertstatistiken für häufige Ereignisse (2-jährlich, 10-jährlich) berechnet werden. Diese dienten zur Eichung und Validierung des Abschätzverfahrens für die Bestimmung der 2-jährlichen und 10-jährlichen Geschiebefracht am Kegelhals. Ferner konnte eine mittlere jährliche Geschiebefracht in Bezug auf die vorhandenen Daten berechnet werden.

**Geländeaufnahmen für Prozessverständnis:** Um die Prozesse von sehr häufigen Ereignissen zu verstehen, wurden Geländeanalysen und Abflussabschätzungen basierend auf Daten von Niederschlagsmessstationen (IMIS) durchgeführt. Es zeigte sich aber, dass die Erfassung sehr häufiger Ereignisse für den operationellen Einsatz mit diversen Schwierigkeiten verbunden ist und eine eigene Erfassungsmethode benötigte.

**Repräsentation kleiner Geschiebefrachten:** Die kleinen Geschiebefrachten werden deshalb durch die „2-jährliche Geschiebefracht“ repräsentiert. Auswertungen haben gezeigt, dass die 2-jährliche Geschiebefracht für eine Mehrheit der Bäche etwa in einem Bereich von einem Fünftel bis zur Hälfte des Wertes einer 10-jährlichen Geschiebefracht liegt. Als mittlerer Wert wurde deshalb 1/3 gewählt.

#### 7.1.2 Prozesse vom Kegelhals bis zum Vorfluter

**Aktiver Kegel:** Es kann davon ausgegangen werden, dass der Gerinnequerschnitt auf dem Kegel eines Seitengerinnes natürlicherweise eine Kapazität aufweist, die nur für kleinere, häufige Ereignisse ausreicht, so dass seltenere Ereignisse meist ausbrechen, auf dem Kegel grösstenteils zur Ablagerung kommen und daher nur bedingten Einfluss für den Vorfluter haben.

**Inaktiver Kegel** (natürlich und Kulturlandschaft): Durch Absenkung des Vorfluters kann der Seitenbach seine Sohle im Kegel erodieren, so dass die natürliche Kegelfunktion als Ablagerungsgebiet nicht mehr gewährleistet ist. In diesem Fall können die Geschiebefrachten sämtlicher Ereignisse in den Vorfluter gelangen.



### 7.1.3 Berücksichtigung von Geschiebesammlern

Auf Kegeln mit grösserem Schadenpotenzial wurden Geschiebesammler gebaut. Diese stellen oft das wichtigste Element in der Geschiebeverlagerung bis zum Vorfluter dar. Dabei kann unterschieden werden in offene und geschlossene Geschiebesammler (Abb. 33).

Bei geschlossenen Geschiebesammlern wird von einem vollständigen Geschieberückhalt ausgegangen. Diese Vereinfachung trifft beim Eintritt des Überlastfalls nicht zu. Ein Teil der Geschiebefracht überfließt das Abschlussbauwerk und gelangt unterhalb davon in oder neben das Gerinne. Nur in Fällen, in denen der überwiegende Anteil der Geschiebefracht in das Gerinne gelangen kann, sollte der Überlastfall berücksichtigt werden. Im andern Fall sind die Auswirkungen auf die mittlere jährliche Geschiebefracht marginal<sup>18</sup>.

Bei offenen Geschiebesammlern kann Geschiebe durch das Auslaufbauwerk in den untenliegenden Gerinneabschnitt gelangen. Aber auch hier kann die gesamte Geschiebefracht infolge Verstopfung des Auslaufbauwerks beispielsweise durch Holz zurückgehalten werden.



Abb. 33 Geschlossener (links) und offener (rechts) Geschiebesammler. Als geschlossene Sammler gelten auch Konstruktionen mit kleinen Öffnungen.

---

<sup>18</sup> Eine Weiterverlagerung von 5000 m<sup>3</sup> im Gerinne als Teil einer 100-jährlichen Geschiebefracht von 20'000 m<sup>3</sup> bewirkt eine mittlere jährliche Frachterhöhung von 50 m<sup>3</sup>. Dies liegt im Fehlerbereich der Abschätzung.



#### 7.1.4 Erosionen unterhalb von Geschiebeablagerungsplätzen

Je nach Ausprägung des Gerinnes können im Unterlauf des Baches, auf dem Kegel oder unterhalb von Geschiebesammlern erneut Erosionen auftreten, welche die Geschiebefracht wiederum erhöhen.

Die Erosionen werden durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Menge des verfügbaren Geschiebes beim betreffenden Szenarium
- Wassermenge und –sättigung durch bereits mitgeführte Feststoffe
- Gerinnegeometrie
- Sohlenbeschaffenheit (Kornverteilung)
- Gefällsverhältnisse (gestreckt, step-pool, usw.)

## 7.2 Diskussion der Methode

Die Methode für die Abschätzung der mittleren jährlichen Geschiebefracht in steilen Seitengerinnen soll mit wenig Aufwand zu plausiblen Ergebnissen führen. Sie zeigt auf, welche Bäche für den Geschiebetransport relevant sind und liefert die Grössenordnung der mittleren jährlichen Geschiebefracht. Sie kann jedoch eine gezielte und tiefgründige Abklärung, wie sie für verschiedene Fragestellungen benötigt wird und als konkrete Dimensionierungsgrundlage erforderlich ist, nicht ersetzen. Aufgrund der Datenlage insbesondere auch für kleine Geschiebefrachten hoher Frequenz werden fehlende Grundlagen durch Annahmen ersetzt.

Durch die Vielfalt der Charaktere der einzelnen Seitenbäche ist es nicht möglich, jedem Fall ohne weiterreichende Abklärungen gerecht zu werden. Diesen Anspruch muss die Methode auch nicht erfüllen. Sie ist indes ein Hilfsmittel für einen raschen Überblick in einem bestimmten Gebiet und kann aufzeigen, in welchen Bächen grössere Unsicherheiten bestehen und die Ergebnisse durch zusätzliche Abklärungen abzustützen sind.

Die Abschätzungen liegen tendenziell eher hoch bei steilen und kleinen Einzugsgebieten, in flacheren und grösseren Bächen haben Vergleiche mit Geschiebestudien eher tiefe Werte ergeben. Diese Erkenntnis ermöglicht im konkreten Fall eine Korrektur bis zu einem gewissen Grad. Der Anspruch an die Genauigkeit der Abschätzungen bewegt sich etwa in einem Bereich von 50 – 100%. Genauere Ergebnisse können nur mit entsprechendem Aufwand erzielt werden und wenn in einem Bach Vergleichswerte vorliegen (Leerungen von Geschiebesammlern oder Kiesentnahmen).

### 7.3 Anwendungsbeispiel

Der Turrengraben im Einzugsgebiet der Grossen Melchaa ist ein kleiner, ca. 2 km<sup>2</sup> grosser Zufluss. Die Abschätzung der mittleren jährlichen Geschiebefracht in die Grosse Melchaa verläuft folgendermassen:

#### 1. Bestimmung der 100-jährlichen Geschiebefracht (Abb. 9 und Abb. 10):

Entstehung Murgang	ja
Durchschnittsgefälle > 20%	ja
Gerinneabschnitte deutlich <20%	ja
Wildbachtyp	eventuell murfähig
Grosse Geschiebeherde	ja
Längere Felsstrecken	nein
Grössere Retentionsmöglichkeiten	ja
Spezifische Feststofffracht (qualit.)	gross
Geologie	Kalk
Einzugsgebietsgrösse (km <sup>2</sup> )	2.0
Spezifische Feststofffracht m <sup>3</sup> / km <sup>2</sup>	9111
Total GF100 [m <sup>3</sup> ]	18'222
<b>Total GF100 gerundet [m<sup>3</sup>]</b>	<b>18'200</b>

#### 2. Bestimmung von GF 300 und GF 30 (vgl. Tab. 2)

<i>Wahl der Multiplikationsfaktoren</i>	<b>GF300</b>	<b>GF30</b>
Transportprozess	1.9	0.3
Einzugsgebietsfläche Korrekturfaktor	1.5	0.4
Längere Felsstrecken, gewählter Wert	1.8	0.3
Grosse Geschiebeherde	1.7	0.3
Retentionsmöglichkeiten, gewählter Wert	1.1	0.7
Schwellenprozesse, gewählter Wert	1	1
Mittelwert-Faktor	1.5	0.5
Total GF300 [m <sup>3</sup> ], GF30 [m <sup>3</sup> ]	27'333	9'111
<b>Total GF300 [m<sup>3</sup>], GF30 [m<sup>3</sup>] gerundet</b>	<b>27'330</b>	<b>9'110</b>

#### 3. Bestimmung von GF 10 (vgl. Abb. 11, Kapitel 4.2.3)

Auf einer Länge von 1530 m (in diesem Beispiel als 1 Gerinneabschnitt definiert) besteht, geschätzt aus Karte und Luftbild, eine durchschnittliche Bachbreite von ca. 3 m. Dies ergibt eine Erosionstiefe für das GF 10 von knapp 0.2 m (0.195), was eine Geschiebefracht von 895 m<sup>3</sup> ergibt.

Nachfolgende Korrekturfaktoren wurden bestimmt:

<u>Erhöhende Faktoren</u>	<b>Korrekturfaktor</b>
Murfähigkeit bis Kegelhals	3
Mittleres Gefälle Hauptgerinne	2
<u>Reduzierende Faktoren</u>	
Mittleres Gefälle Hauptgerinne	1
Einzugsgebietsfläche	1
Überdurchschn. Sohlenbreite	0.8
Viele Felsanteile	0.8
Viele/Grosse Rauigkeitselemente	0.4
Entkoppelung Teile Einzugsgebiet	0.6
Verbauungen im EZG	1
Total GF10 [m3]	825
<b>Total GF10 [m3] gerundet</b>	<b>820</b>

Die zweijährliche Geschiebefracht beträgt  $1/3$  von  $820 \text{ m}^3 = 273 \text{ m}^3$ .

Aufgrund des Geschiebeablagerungsplatzes und verschiedener Hindernisse wurde eine Kapazitätsgrenze von ca.  $500 \text{ m}^3$  für den Gerinnebereich auf dem Kegel gutachterlich geschätzt, d. h. das 10-jährliche Ereignis übersteigt dort die bestehende Kapazität. Die entsprechenden Jährlichkeiten betragen deshalb:

Jährlichkeit	Fracht [ $\text{m}^3$ ]
GF2	273
GF10	500
GF30	500
GF100	500
GF300	500

Damit ergibt sich gemäss untenstehender Formel eine mittlere jährliche Geschiebefracht von etwa  $160 \text{ m}^3$ .

$$G_m = \frac{(1 + 300y) + (2 * 100y) + (7 * 30y) + (20 * 10y) + (120 * 2y)}{300}$$

# Literaturverzeichnis

Bezzola, R. G. (2013): Vorlesungsmanuskript Flussbau. Professur für Wasserbau, ETH Zürich.

Gertsch, E. (2009): Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen - Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens. Inauguraldissertation am Geographischen Institut der Universität Bern, Bern.

GHO (Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie), (1996): Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen. Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie GHO, Mitteilung Nr. 4. Bern.

Hunziker, R.P. (1995): Fraktionsweiser Geschiebetransport, Mitteilungen Nr. 138 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.

Lamb, M.P., Dietrich, W.E. und Venditti, J.G. (2008): Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope? *Journal of Geophysical Research*, 113, F02008, doi: 10.1029/2007JF000831. 2008.

Lehmann, Ch. (1993): Zur Abschätzung der Feststofffracht in Wildbächen – Grundlagen und Anleitung. *Geographica Bernensia* G42, Bern.

Lorenz, P. & Skoda, G. (2000): Bemessungsniederschläge kurzer Dauerstufen ( $D \leq 12$  Stunden) mit inadäquaten Daten. *Mitt. Hydr. Dienst in Österr.* 80: 1-24. In modifizierter Form im hydrologischen Atlas Österreichs HAÖ, Erläuterungsblatt 2.5.

Marti, C. (2006): Morphologie von verzweigten Gerinnen. Mitteilungen Nr. 199 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.

Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948): Formulas for bedload transport. Conference of the International Association of Hydraulic Research, Stockholm.

Nitsche, M., Rickenmann D., Turowski, J.M., Badoux, A., Kirchner, J.W. (2011): Evaluation of bedload transport predictions using flow resistance equations to account for macro-roughness in steep mountain streams. *Water Resources Research*, 47, W08513, doi:10.1029/2010WR009793.

Pfaundler M., Zappa M. (2006): Die mittleren Abflüsse über die ganze Schweiz. Ein optimierter Datensatz im 500 x 500 m Raster. In: *Wasser, Energie, Luft*, Heft 4/2006. S. 291–298. (Datensätze verfügbar unter [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch) > Themen > Hydrologische Daten > Mittlere monatliche und jährliche Abflusshöhen).

Rickenmann, D., Recking, A. (2011): Evaluation of flow resistance equations using a large field data. *Water Resources Research*, 47, W07538, doi:10.1029/2010WR009793.

Rickenmann, D. (2012): Alluvial steep channels: flow resistance, bedload transport and transition to debris flows. Chichester, England : M. Church, P. Biron and A Roy, John Wiley & Sons, 2012. S. 386-397.

Schröder, W, Theune, C. (1984): Feststoffabtrag und Stauraumverlandung in Mitteleuropa. *Wasserwirtschaft H.* 7/8,374-379.

Smart, G., Jäggi, M. (1983): Sedimenttransport in steilen Gerinnen. *Mitteilungen Nr. 64 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.*

Strickler, A. (1923): Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahl für Ströme, Kanäle und geschlossenen Leitungen. *Mitteilung Nr. 16 des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft, Bern.*

Zarn, B. (1997): Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität. *Mitteilungen Nr. 64 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.*

Zeller, J. (1985): Feststoffmessung in kleinen Gebirgseinzugsgebieten. *Wasser-Energie-Luft* 7/8, 246-251.

Zimmermann, M. (1989): Geschiebeaufkommen und Geschiebe-Bewirtschaftung – Grundlagen zur Abschätzung des Geschiebehaushalts im Emmental. *Geographica Bernensia. G34, Bern.*

# Abkürzungsverzeichnisse

## 1. Bestimmung der Abflussdauerkurve

<b>A, B, C und D</b>	(-)	Parameter zur Annäherung der Form einer dimensionslosen Abflussdauerkurve
<b>A<sub>Q</sub></b>	(mm)	Mittlere jährliche Abflusshöhe; $A_Q = MQ/A_{EZG} * 31536$
<b>A<sub>EZG</sub></b>	(km <sup>2</sup> )	Fläche des Einzugsgebiets
<b>ff</b>	(-)	Formfaktor nach Horton mit $ff = A_{EZG}/L^2$
<b>HQ<sub>100</sub></b>	(m <sup>3</sup> /s)	Hundertjähriger Hochwasserabfluss
<b>L</b>	(km)	Länge des Einzugsgebiets
<b>L<sub>K</sub></b>	(m)	Distanz von der Wasserscheide bis zum Gebietsauslass des Einzugsgebiets
<b>MHQ</b>	(m <sup>3</sup> /s)	Mittlerer jährlicher Hochwasserabfluss
<b>MQ</b>	(m <sup>3</sup> /s)	Mittelwasserabfluss
<b>Mq</b>	(l/(s*km <sup>2</sup> ))	Mittelwasserspende
<b>N<sub>Gebiet,tK</sub></b>	(mm)	Mittlere Gebietsniederschlagshöhe eines 2.33 jährlichen Niederschlagsereignisses der Dauer t <sub>K</sub> in einem Einzugsgebiet der Fläche A <sub>EZG</sub>
<b>N<sub>Punkt,tK</sub></b>	(mm)	Punktniederschlagshöhe eines 2.33 jährlichen Niederschlagsereignisses der Dauer t <sub>K</sub>
<b>N<sub>i</sub></b>	(mm/h)	Niederschlagsintensität
<b>N<sub>iGebiet,tK</sub></b>	(mm/h)	Mittlere Gebietsniederschlagsintensität eines 2.33 jährlichen Niederschlagsereignisses der Dauer t <sub>K</sub> in einem Einzugsgebiet der Fläche A <sub>EZG</sub>
<b>P<sub>Jahr</sub></b>	(mm)	Mittlere jährliche Gebietsniederschlagshöhe
<b>t<sub>K</sub></b>	(h)	Konzentrationszeit
<b>Q<sub>i</sub></b>	(m <sup>3</sup> /s)	Abfluss, welcher jährlich über eine Zeitspanne i erreicht oder überschritten wird (z.B. Q <sub>1d</sub> ).
<b>q<sub>347</sub></b>	(l/s*km <sup>2</sup> )	Abflussspende, welche im Mittel an 347 Tagen eines Jahres erreicht oder überschritten wird.

$v_m$	(m/s)	Mittlere Fliessgeschwindigkeit von der Wasserscheide bis zum Gebietsauslass des Einzugsgebiets
$\psi$	(-)	Abflussbeiwert, definiert als $\psi = A_Q/P_{\text{Jahr}}$
$\omega, \xi$	(-)	Parameter zur Gebietsabminderung nach Lorenz und Skoda (2000)

## 2. Methode der Tal- und Gebirgsflüsse

<b>b</b>	(-)	Exponent zur Berücksichtigung der Makrorauigkeit nach
<b>B</b>	(m)	Bettbreite
<b>B<sub>gesamt</sub></b>	(m)	Gesamte Bettbreite
<b>%<sub>Bewuchs</sub></b>	(-)	Anteil Bewuchs an der gesamten Bettbreite
<b>B<sub>F</sub></b>	(m)	effektive Bettbreite
<b>B<sub>W,Marti</sub></b>	(m)	Reduzierte Wasserspiegelbreite für verzweigte Gerinne nach Marti (2006)
<b>B<sub>F,Marti</sub></b>	(m)	Reduzierte Bettbreite für verzweigte Gerinne nach Marti (2006)
<b>B<sub>W,Zarn</sub></b>	(m)	Reduzierte Breite für verzweigte Gerinne nach Zarn (1997)
<b>d<sub>30</sub></b>	(m)	Charakteristischer Korndurchmesser, 30% (Gewichtsanteile) des Geschiebes sind feiner
<b>d<sub>m</sub></b>	(m)	Charakteristischer mittlerer Korndurchmesser einer Mischung nach Meyer-Peter und Müller
<b>d<sub>90</sub></b>	(m)	Charakteristischer Korndurchmesser, 90% (Gewichtsanteile) des Geschiebes sind feiner
<b>Fr</b>	(-)	Froude-Zahl
<b>g</b>	(m/s <sup>2</sup> )	Erdbeschleunigung (9.81 m/s <sup>2</sup> )
<b>G<sub>B</sub></b>	(kg/s)	Geschiebetransportkapazität
<b>GF<sub>max,kg</sub></b>	(kg/Jahr)	maximale mittlere jährliche Geschiebefracht
<b>GF<sub>min,kg</sub></b>	(kg/Jahr)	minimale mittlere jährliche Geschiebefracht
<b>GF<sub>max,m<sup>3</sup></sub></b>	(m <sup>3</sup> /Jahr)	maximale mittlere jährliche Geschiebefracht



$\mathbf{GF}_{\min,m^3}$	(m <sup>3</sup> /Jahr)	minimale mittlere jährliche Geschiebefracht
$\mathbf{h}$	(m)	Fliesstiefe
$\mathbf{h}_{\text{krit}}$	(m)	kritische Fliesstiefe
$\mathbf{J}$	(-)	Sohlgefälle
$\mathbf{J}_{\text{red}}$	(-)	Reduziertes Sohlgefälle
$\mathbf{J}_{\text{red}}$	(-)	Reduziertes Gefälle durch Berücksichtigung der Makrorauigkeit
$\mathbf{J}_{\text{red,Zarn}}$	(-)	Reduziertes Gefälle für verzweigte Gerinne nach Zarn (1997)
$\mathbf{k}_{\text{st}}$	(m <sup>1/3</sup> /s)	Strickler-Beiwert der Sohle
$\mathbf{m}_b$	(-)	Böschungsneigung
$\mathbf{M}_{\text{BW}}$	(-)	Korrekturfaktor Breite für verzweigte Gerinne nach Marti (2006)
$\mathbf{k}_r$	(m <sup>1/3</sup> /s)	Strickler-Beiwert für die Kornrauigkeit
$\mathbf{k}_{\text{tot}}$	(m <sup>1/3</sup> /s)	Gesamtrauigkeit
$\frac{\mathbf{n}_r}{\mathbf{n}_{\text{tot}}}$	(-)	Verhältnis der Kornrauigkeit zur Gesamtrauigkeit des Gerinnes
$\mathbf{Q}$	(m <sup>3</sup> /s)	Abfluss
$\mathbf{Q}_0$	(m <sup>3</sup> /s)	Abfluss bei Transportbeginn
$\mathbf{q}$	(m <sup>3</sup> /sm)	Spezifischer Abfluss pro Breite
$\mathbf{q}^{**}$	(-)	Dimensionsloser, spezifischer Abfluss pro Breite
$\mathbf{R}_{\text{hyd}}$	(m)	Hydraulischer Radius
$\mathbf{s} = \frac{\rho_s}{\rho}$	(-)	relative Feststoffdichte

$S_{Zarn}$	(-)	Korrekturfaktor Gefälle für verzweigte Gerinne nach Zarn (1997)
$\rho_s$	(kg/m <sup>3</sup> )	Feststoffdichte
$\rho$	(kg/m <sup>3</sup> )	Dichte des Wassers
$v_{krit.}$	(m/s)	Kritische Fließgeschwindigkeit (Froude = 1.0)
$v_m$	(m/s)	Mittlere Fließgeschwindigkeit
$v_{m,Manning}$	(m/s)	Mittlere Fließgeschwindigkeit nach Strickler (1923)
$v_{tot}$	(m/s)	Fließgeschwindigkeit nach Rickenmann und Recking (2011)
$Y_{Zarn}$	(-)	Verhältnis zwischen effektiver Breite und Fliesstiefe, Kontrollvariable zur Reduktion der Breite verzweigter Gerinne nach Zarn (1997)
$\theta_c$	(-)	Kritische dimensionslose Schubspannung nach Shields, Ansatz Meyer-Peter und Müller (1948) $\theta_c (d_m) = 0.047$
$\theta_{c,Lamb}$	(-)	Kritische dimensionslose Schubspannung nach Lamb et al. (2008)
$\theta_{c,red}$	(-)	Reduzierte, kritische dimensionslose Schubspannung nach Lamb et al. (2008)
$\theta_{red}$	(-)	Reduzierte dimensionslose Schubspannung

# Datentabellen

Tab. 12 Datentabelle der Seitenbäche einem Gefälle kleiner als 1 %

< 1 %	Flüsse	Gefälle	EZG	MHQ	Breite	d <sub>m</sub>	d <sub>90</sub>	Referenz	Berechnet
		(-)	(km <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(cm)	(cm)	(m <sup>3</sup> /Jahr)	(m <sup>3</sup> /Jahr)
	Vispa	0.0028	788	175	32	4	7.9	12'000	4'500
	Ilfis	0.0038	192	115	16	4.3	10.7	6'500	7'400
	Murg	0.0040	214	69	13	4.5	8.7	500	1'600
	Grüene	0.0080	81	25	14	3.5	7.4	3'300	1'200
	Emme	0.0089	207	124	37	5.2	11.0	6'500	11'800
	Wyna	0.0027	54	17	10	1.9	3.5	580	100
	Sisslen	0.0079	128	33	11	4.4	8.3	1'900	2'800

Tab. 13 Datentabelle der Seitenbäche einem Gefälle grösser als 1 %

> 1 %	Flüsse	Gefälle	EZG	MHQ	Breite	d <sub>m</sub>	d <sub>90</sub>	Referenz	Berechnet
		(-)	(km <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(cm)	(cm)	(m <sup>3</sup> /Jahr)	(m <sup>3</sup> /Jahr)
	Tabach	0.0120	15	6	4.5	4.4	8.9	100	200
	Rüderchen	0.0120	18	8	5.0	4.0	8.1	200	200
	Siggern	0.0114	23	11	7.5	5.1	11.1	500	300
	Mümliswilerbach	0.0126	36	11	9.0	3.9	7.4	400	700
	Grosse Fontannen	0.0144	39	29	12.0	6.7	12.8	6'200	1'800
	Kleine Fontannen	0.0163	16	16	16.0	4.6	8.1	1'500	800
	Navisence	0.0185	256	60	20.0	8.2	18.4	13'600	28'800
	Grosse Entle	0.0210	60	55	33.0	11.0	23.0	3'000	2'300
	Taschinasbach	0.0255	65	25	25.0	15.9	34.5	8'000	100
	Schranggabach	0.0255	27	11	8.0	15.4	34.8	2'000	0
	Rümlig	0.0282	65	45	22.0	11.3	22.7	4'000	3'600
	Morge	0.0297	72	27	15.0	14.5	29.6	6'500	900
	FeeVispa	0.0428	38	17	30.0	12.1	25.9	1'000	1'400
	Lonza	0.0430	162	60	17.0	8.2	15.8	15'500	202'100
	Schraubach	0.0499	62	22	38.0	10.7	25.4	35'000	19'000
	Furnerbach	0.0591	37	16	30.0	8.0	17.2	50'000	24'800
	Sionne	0.1126	19	9	14.0	10.1	19.3	2'200	4'800
	Almagellerbach	0.1145	20	13	6.0	7.1	16.6	300	59'300
	Arieschbach	0.1184	27	9	18.0	9.7	19.3	20'000	44'800
	Eistlenbach	0.1270	4	8	30.0	6.3	12.7	4'400	17'300
	Walbach	0.0786	11	8	8.0	7.6	16.0	1'800	900