

# **Geomorphologische Auswirkungen von Geschiebesammlern auf den Unterlauf in Wildbächen**

Eine Untersuchung an  
Geschiebesammlern der Datenbank Solid

Masterarbeit der  
Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Universität Bern

vorgelegt von  
**Silvia Käser**  
**Februar 2016**  
Korrigierte Version

Betreuung der Arbeit  
PD Dr. Margreth Keiler  
Dr. Markus Zimmermann



## **Vorwort**

Zu dieser Masterarbeit haben zahlreiche Personen durch ihre fachliche, konzeptionelle und moralische Unterstützung beigetragen.

Zuerst möchte ich mich bei PD Dr. Margreth Keiler bedanken. Für die fachliche Unterstützung und die hilfreichen Inputs während der gesamten Arbeit als Co-Leiterin der Masterarbeit bin ich sehr dankbar. Aus den Diskussionen im Rahmen der Arbeit und Kolloquium nehme ich viel Wertvolles für meinen weiteren Weg mit.

Einen besonderen Dank möchte an Dr. Markus Zimmermann für die engagierte Leitung der Arbeit richten. Ich durfte jeder Zeit meine Anliegen und Fragen besprechen. Die Expertise, Hinweise auf Stolpersteine und pragmatischen Rückmeldungen wusste ich sehr zu schätzen.

Ein weiterer Dank geht an Alessandro Grasso vom Bundesamt für Umwelt. Die Bereitstellung der Informationen der Datenbank Solid und der Folgearbeiten war die Grundlage meiner Arbeit.

Den folgenden Personen möchte ich für die Bereitstellung von Projektdaten und persönlichen Erfahrungen danken: L. Antonuccio Bauverwaltung Menziken, D. Schneider und A. Casprischer OIK IV Bern, A. Gerber Schwellenkorporation Schangnau, O. Hitz und M. Fässer OIK I Bern, D. Feuz Strasseninspektorat Frutigen, C. Meyer Kissling + Zbinden AG Bern, U. Oehrli Schwellenkorporation Saanen, M. Stump Schwellenkorporation Leissigen, W. Fessler und M. Klauser Kanton Nidwalden, P. Scheiwiler und P. Käslin Schubiger AG Hergiswil, M. Meier Kanton Obwalden, S. Fluri Wasserbau Sarnen, A. Lampietti Kanton Schwyz, K. Hug Hug Bau AG Altendorf, F. Epp Kanton Uri.

Den Interviewpartnern R. Mosimann ehemals OIK IV Bern, A. Fahrni OIK II Bern und D. Bürki KWO und Schwellenkorporation Guttannen möchte ich für den spannenden Einblick und die ausführlichen Erläuterungen der Dimensionierung und der Handhabung von Geschiebesammlern der jeweiligen Regionen danken.

Der gesamten Gruppe der Geomorphologie, Naturgefahren- und Risikoforschung und den Mitstudentinnen und Mitstudenten möchte ich für die zahlreichen spannenden und anregenden Diskussionen sowie für die fachliche und moralische Unterstützung herzlich danken.

Ein grosses Dankeschön geht nicht zuletzt an meine Freunde und Familie, welche mich im Hintergrund stets unterstützten und sich Zeit für das Gegenlesen der Arbeit genommen haben.

**Bern, Januar 2016**

**Silvia Käser**

## Zusammenfassung

Wasserbauliche Massnahmen schützen Menschen, Sachwerte und Infrastruktur vor Murgängen und geschiebeführenden Hochwasser (Strobl und Zunic 2006) in zahlreichen Wildbächen im Alpenraum (Kienholz et al. 1998). An technischen Massnahmen wie Geschiebesammlern werden Feststoffe zurückgehalten und regelmässig entnommen (Bergmeister 2009). Der Geschieberückhalt und die aktive Bewirtschaftung der Geschiebesammler führen häufig zu einem Geschiebedefizit im Unterlauf (Schälchli et al. 2005). Die Auswirkungen des Geschiebedefizits sind bspw. Tiefenerosion (Romang 2004) oder die Bildung von Kolken an Brücken, welche die Stabilität der Infrastruktur beeinträchtigen (Schälchli et al. 2005). Solche Effekte des Geschieberückhalts und der Geschiebeentnahme sind für viele Wildbäche der Schweiz relevant. Die daraus entstandene Erosion im Unterlauf wird jedoch wenig beachtet (Takahashi 2014).

Das Ziel der Studie ist den Zusammenhang der Rückhaltewirkung am Geschiebesammler und dem Geschiebedefizit im Unterlauf zu verdeutlichen. Die Auswirkungen der Rückhaltewirkung der Geschiebesammler auf den Unterlauf werden durch die Entwicklung einer vergleichenden Methode dargestellt. Die Beurteilung basiert auf der Datengrundlage der Datenbank Solid vom Bundesamt für Umwelt, welche jährliche Entnahmekubaturen von mehr als 100 Geschiebesammlern beinhaltet (Grasso et al. 2010). Das Vorgehen ist in drei Stufen gegliedert.

In der Stufe 1 werden anhand von Luft- und Satellitenbilder sowie topographischen Karten geschiebearme Unterläufe visuell identifiziert. In der Stufe 2 werden die Erosionsphänomene im Unterlauf und die Rückhaltewirkung des Geschiebesammlers im Gelände vergleichend erfasst und in der Stufe 3 wird die Ausprägung der Erosion mittels Vermessungen des Gerinnes bestimmt.

Für die Untersuchung der drei Stufen werden Auswahlkriterien für die Selektion von geeigneten Wildbächen angewendet. Aus der Untersuchung geht hervor, dass aus 50 Unterläufe der Stufe 1 insgesamt 72 % Unterläufe als geschiebearm, 28 % als umlagernd und kein Unterlauf als ablagernd kategorisiert wird. Die Unterläufe der Kategorie geschiebearm werden für die Stufe 2 ausgewählt. Die Indexierung der Erosion im Unterlauf, den Verhältnissen an der Mündung und der Rückhaltewirkung zeigt, dass in 14 von 15 Unterläufen eine effiziente Rückhaltewirkung zu einem starken Geschiebedefizit führt. Die Ausprägung der Erosion der Stufe 3 wird anhand der Tiefenerosion in unverbauten Abschnitten und der Kolkgrösse in Abschnitten mit Sperrentreppen vermessen und mit Archivdaten verglichen. Die Veränderung des Längenprofils nach dem Bau des Sammlers und der Aufnahme des Ist-Zustandes (differentielle GPS Messung im Frühjahr 2015) zeigt, dass die Erosion im Unterlauf im Zusammenhang mit jungen Ereignissen punktuell mehrere Meter tief ist. Diese erheblichen Eintiefungen der Sohle werden durch Aussagen von Experten bestätigt. Die starke Ausprägung der Erosion ist mit der effizienten Rückhaltewirkung des Geschiebesammlers übereinstimmend.

Die Studie zeigt, dass die untersuchten Geschiebesammler mit einer effizienten Rückhaltewirkung grösstenteils zu stark ausgeprägten Erosionen im Unterlauf und zu einem Geschiebedefizit im Vorfluter führen. Die Herausforderung der Zukunft besteht somit darin, einen effizienten Hochwasserschutz und ein Sedimentkontinuum in Form von regelmässigem Geschiebetransport im Unterlauf zu gewährleisten (Habersack et al. 2005).

*Schlüsselwörter:*

*Geschiebesammler, Datenbank Solid, Geschiebedefizit, Sohlenveränderung*

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	I
Zusammenfassung.....	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Formelverzeichnis.....	X
Abkürzungen.....	XI
1. Einleitung.....	1
1.1 Stand der Forschung.....	3
1.1.1 Wildbäche und Geschiebetransport.....	3
1.1.2 Geschiebesammler und ihre Rückhaltewirkung.....	7
1.1.3 Auswirkung des Geschiebesammlers auf den Unterlauf.....	10
1.2 Hypothesen und Forschungsfragen.....	16
2. Daten.....	17
2.1 Datenbank Solid.....	17
2.2 Luft- und Satellitenbilder und topographische Karten.....	18
2.3 Projektdaten der Geschiebesammler und der Unterläufe.....	18
3. Methoden.....	19
3.1 Kriterien zur Auswahl geeigneter Unterläufe.....	21
3.2 Identifikation geschiebearmer Bedingungen im Unterlauf (Stufe 1).....	24
3.2.1 Erfassung des geomorphologischen Zustandes im Unterlauf.....	24
3.2.2 Bewertung des geomorphologischen Zustandes im Unterlauf.....	25
3.3 Beurteilung der Erosion und der Rückhaltewirkung (Stufe 2).....	26
3.3.1 Vergleichende Beurteilung der Erosion und der Rückhaltewirkung.....	27
3.3.2 Erfassung und Bewertung der Erosion und der Rückhaltewirkung.....	27
3.4 Semi-quantitative Erfassung der Erosion im Unterlauf (Stufe 3).....	33
3.4.1 Vermessung der Erosion im Gerinne.....	33
3.4.2 Bewertung der erfassten Erosion.....	35
4. Resultate.....	36
4.1 Selektion geeigneter Unterläufe.....	36
4.1.1 Unterläufe Stufe 1.....	36
4.1.2 Unterläufe Stufe 2.....	38
4.1.3 Unterläufe Stufe 3.....	39
4.2 Geomorphologische Bedingungen (Stufe 1).....	40
4.2.1 Beurteilung der Kategorie geschiebearm, umlagernd und ablagernd.....	40
4.2.2 Einschränkungen der visuellen Identifikation.....	43
4.2.3 Übersicht der Kategorisierung der untersuchten Unterläufe.....	44
4.3 Indexierung der Erosion und der Rückhaltewirkung.....	45
4.3.1 Festlegung der Indexierung.....	45
4.3.2 Gerinne-Index: Ausprägung der Erosionsphänomene.....	47

4.3.3	Mündungs-Index: Kolk- bzw. Kegelbildung im Vorfluter .....	57
4.3.4	Rückhalte-Index: Rückhaltewirkung der Absperrbauwerke.....	60
4.3.5	Vergleich der Indizes: Übereinstimmung der Beurteilung .....	65
4.4	Ausprägung der Tiefenerosion im Gerinne (Stufe 3).....	68
4.4.1	Datenqualität der Längsprofile .....	68
4.4.2	Tiefenerosion in unverbauten Abschnitten .....	70
4.4.3	Kolke unterhalb von Querwerken .....	72
5.	Diskussion.....	76
5.1	Visuelle Identifikation: Stärken und Schwächen (Stufe 1).....	76
5.2	Erkenntnisse Indexierung (Stufe 2) .....	78
5.2.1	Gerinne-Index: Stärken und Schwächen .....	78
5.2.2	Mündungs-Index: Stärken und Schwächen .....	80
5.2.3	Rückhalte-Index: Stärken und Schwächen .....	81
5.2.4	Vergleich der drei Indizes: Begründung der Unterschiede .....	82
5.3	Erläuterung der Tiefenerosion im unverbauten Gerinne (Stufe 3).....	86
6.	Schlussfolgerung .....	89
6.1	Beantwortung der Forschungsfragen und Hypothesen .....	89
6.2	Ausblick.....	94
	Literaturverzeichnis .....	96
	Anhang .....	102

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erosion der Böschung im Unterlauf des Steinibachs in Dallenwil. (Aufnahmedatum 20. Juli 2015).....	2
Abbildung 2: Sohlenstabilität in Abhängigkeit der Korngrösse und der Fliessgeschwindigkeit von Fliessgewässern nach Hjulström 1935 (Quelle: Strobl und Zunic 2006). ....	4
Abbildung 3: Schematische Skizze eines Geschiebesammlers (Promny und Müller 2008).....	7
Abbildung 4: Schematische Darstellung mit Beispielen von unterschiedlichen Absperrbauwerken von Geschiebesammlern nach Soda A-C: Konsolidierungssperren, D-F: grossdolidge Sperren, G-H Schlitzsperren, I: Schlitzdolen, J: Doppelschlitzsperre mit Mittelscheibe, K: aufgelöste Sperre, L,N: Murbrecher, M,O: aufgelöste Sperre mit Balkenverschluss, P: Netzsperre, Q: Seilsperre.(Quelle: Bergmeister et al. 2009). ....	8
Abbildung 5: Erosion des Böschungsfusses. Links bei niedriger Böschung, rechts bei hoher Böschung. $B_{UE}$ = Erosionsbreite, $h_{UE}$ = Erosionshöhe. (Quelle: Hunzinger et al. 2015). ....	11
Abbildung 6: Schematische Darstellung im Längenprofil der Kolkbildung unterhalb von Sperrtreppen. (Quelle: Bergmeister et al. 2009, nach Böll 1997). ....	12
Abbildung 7: Überfall bei beweglicher Sohle im Unterwasserbereich. Quelle: Bergmeister et al. 2009, nach Zeller 1971) .....	12
Abbildung 8: Schematische Darstellung Deckschicht durch die passive Anreicherung von Grobkomponenten. $Q$ = Abfluss. (Quelle: Strobl und Zunic 2006). ....	13
Abbildung 9: Geographische Verteilung der 108 Geschiebesammler der Datenbank Solid (BAFU) in Wildbächen der Schweiz (rote Markierung). ....	17
Abbildung 10: Übersicht des dreistufigen Vorgehens der Beurteilung der Erosion im Unterlauf und der Rückhaltewirkung von Geschiebesammlern. Blau: Stufe, Grün: Auswahlkriterien. ....	19
Abbildung 11: Schematische Darstellung des verwendeten Begriffs Unterlauf, Blau = Flusslauf, Schwarz = Geschiebesammler. ....	20
Abbildung 12: Auswahlkriterien pro Stufe für eine geeignete Stichprobe. ....	21
Abbildung 13: Schematische Darstellung der einheitlich verbauten Abschnitte im Unterlauf des Geschiebesammlers. Blau = Fliessgewässer, Schwarz = Geschiebesammler, Grün = einheitlich verbauter Abschnitt. ....	27
Abbildung 14: Parameter der Böschungserosion. $E_B$ = Erosionsbreite, $E_L$ = Erosionslänge, $E_H$ = Erosionslänge, Chalberhönbach in Saanen (Aufnahmedatum: 26. Juni 2015). ....	29
Abbildung 15: Schematische Darstellung der Mündung des Unterlaufs in den Vorfluter. Rot = Mündung, Blau = Fliessgewässer, Schwarz = Geschiebesammler. ....	30
Abbildung 16: Bezeichnung des kleinsten Masses des Durchlasses. Geschiebesammler am Fritzenbach in Leissigen. Durchlass: Breite = 1 m, Höhe = 0.5 m. (Aufnahmedatum: 24. April 2015). ....	31

Abbildung 17: Bezeichnung der vertikalen Orientierung der Öffnung. Schlitzsperre am Melbach in Kerns. Rote Markierung = vertikale Orientierung des Durchlasses. ....	32
Abbildung 18: Bezeichnung der horizontalen Orientierung der Öffnung. Geschiebesammler am Kummetbach in Attinghausen. Rote Markierung = horizontale Orientierung des Durchlasses. ....	32
Abbildung 19: Schematische Darstellung der Messpunkte der dGPS Vermessung in Abschnitten mit Sperren. ....	34
Abbildung 20: Referenzzustand geschiebearme Bedingungen: Ausgeprägte Kolke unterhalb von Sperren am Steinibach in Dallenwil im Abschnitt C. Kreis: Bsp. eines grossen Kolk der nahezu bis zur nächsten Sperre reicht. (Quelle: Swisstopo 2014). ....	41
Abbildung 21: Referenzzustand umlagernde Bedingungen: Umlagerungsstrecke am Rotenbach in Plaffeien. Kreis: grössere Blöcke mit Kolken unterhalb. Pfeile: Ablagerung von grösseren Blöcken (Quelle: Swisstopo 2014). ....	41
Abbildung 22: Referenzzustand ablagernde Bedingungen: Eher ablagernder Abschnitt am Hundschothenbach in Biberegg. Kreis: vergleichsweise kleine Kolke. Pfeile: grössere Blöcke. (Quelle: Swisstopo 2014). ....	42
Abbildung 23: Visuelle Kategorisierung der Unterläufe anhand von Luft- und Satellitenbildern und topographischen Karten an 50 Geschiebesammlern der Datenbank Solid. ....	44
Abbildung 24: Chessibach Altendorf, betonierte Schale in Abschnitt B. (Aufnahmedatum: 17. Juli 2015). ....	46
Abbildung 25: Spissibach Leissigen, Abschnitt A mit Sperrentreppen. Aufnahmedatum: 24. April 2015. ....	49
Abbildung 26: Beurteilung des Gerinne-Indexes der 15 untersuchten Unterläufe der Stufe 2. Die Beurteilung basiert auf den im Feld festgestellten Ausprägungen von Erosionsphänomenen. Die Hintergrundfarben stellen die Klassengrenzen der Ausprägung des Index dar. ....	56
Abbildung 27: Spissibach Lauenen, Aufnahmedatum: 24. April 2015. ....	58
Abbildung 28: Beurteilung des Mündungs-Indexes der 15 untersuchten Unterläufe der Stufe 2. Die Hintergrundfarben stellen die Klassengrenzen der Ausprägung des Index dar. (* Mündung am Hummligenbach aufgrund Renaturierung nicht beurteilt). ....	59
Abbildung 29: Fritzenbach Leissigen, Aufnahmedatum: 24. April 2015. ....	61
Abbildung 30: Schwarzbach Lauenen, Aufnahmedatum: 22. August 2015. ....	62
Abbildung 31: Beurteilung des Rückhalte-Indexes der 15 untersuchten Unterläufe der Stufe 2. Basierend auf dem kleinsten Mass des Rückhaltes, sowie dem Korrekturfaktor der Korngrösse und der Orientierung der Öffnungen. Die Hintergrundfarben stellen die Klassengrenzen der Ausprägung des Index dar. ....	64
Abbildung 32: Geschiebesammler am Kummetbach in Attinghausen. Kleinstes Mass: > 1.5 m. (Aufnahmedatum: 17. Juli 2015). ....	64

Abbildung 33: Beurteilung der Erosionsphänomene im Unterlauf und der Verhältnisse an der Mündung anhand eines Gerinne- und Mündungs-Indexes an 15 Unterläufen der Datenbank Solid. Die Hintergrundfarben stellen die Klassengrenzen der Ausprägung des Index dar. (*die Mündung am Humligenbach wird aufgrund einer Renaturierung nicht beurteilt).....	65
Abbildung 34: Vergleich des Gerinne- Mündungs- und Rückhalte-Indexes der 15 Wildbäche der Stufe 2 der Datenbank Solid. Die Hintergrundfarben stellen die Klassengrenzen der Ausprägung des Index dar. (*Mündung am Hummligenbach aufgrund Renaturierung nicht beurteilt).....	66
Abbildung 35: Vergleich Längenprofile am Chalberhöhibach in Saanen im unverbauten Abschnitt D. Kreuz = Messpunkte, gestrichelte Linie = projektierte Sohle, durchgezogene Linie = Messung, TB = Technischer Bericht (Archivdaten), die Neigung wird pro Abschnitt angegeben. ....	70
Abbildung 36: Vergleich Längenprofile am Steinibach in Dallenwil im unverbauten Abschnitt B. Kreuz = Messpunkte, die Neigung wird pro eingezeichnetem Abschnitt angegeben. ....	71
Abbildung 37: Vergleich der einzelnen Kolk-tiefen unterhalb von Querwerken der untersuchten Unterläufe der Stufe 3. Erklärung der Boxplot-Darstellung von unten nach oben: untere Antenne = min. Wert, unteres Quantil = 25 % der kleinsten Werte, Median, oberes Quantil = 75 % der kleinsten Werte, obere Antenne = max. Wert. ....	72
Abbildung 38: Vergleich der einzelnen Kolkgrößen unterhalb von Querwerken der untersuchten Unterläufe der Stufe 3. Erklärung der Boxplot-Darstellung von unten nach oben: untere Antenne = min. Wert, unteres Quantil = 25 % der kleinsten Werte, Median, oberes Quantil = 75 % der kleinsten Werte, obere Antenne = max. Wert. ....	73

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Visuell identifizierbare Phänomene für geschiebearme, ablagernde oder umlagernde Bedingungen im Unterlauf.....	25
Tabelle 2:	Vorgehen der Beurteilung der Erosion im Gerinne und an der Mündung, sowie der Rückhaltewirkung des Geschiebesammlers der Stufe 2. ....	26
Tabelle 3:	Im Gelände erfasste Phänomene und bewertete Indikatoren der geschiebearmen Bedingungen im Unterlauf (vom Geschiebesammler bis zur Einmündung in den Vorfluter).....	28
Tabelle 4:	Im Gelände erfasstes Phänomen und bewerteter Indikator der Verhältnisse an der Mündung.....	30
Tabelle 5:	Im Gelände erfasste Phänomene und bewertete Indikatoren der Rückhaltewirkung des Geschiebesammlers.....	31
Tabelle 6:	Wildbäche der Stichprobenauswahl der Stufe 1. (*nicht in der Datenbank Solid aufgeführt; Datengrundlage: Datenbank Solid).....	36
Tabelle 7:	Nicht ausgewählte Unterläufe der Stufe 1. 1 = Absperrbauwerk vorhanden, 2 = keine Zuflüsse in den Unterlauf, 3 = Unterlauf länger als 200 m, 4 = mind. 10 Messjahre, 5 = mind. 5 Entnahmen (Datengrundlage: Datenbank Solid). ....	37
Tabelle 8:	Wildbäche der Stichprobenauswahl der Stufe 2. (*nicht in der Datenbank Solid aufgeführt; Datengrundlage Datenbank Solid).....	38
Tabelle 9:	Nicht ausgewählte Unterläufe der Stufe 2. 1 = Kategorie geschiebearm, 2 = nicht alle Abschnitte sind stark verbaut, 3 = Standort des Geschiebesammlers am Kegelhals oder auf dem Kegel, 4 = Verfügbarkeit von Projektdaten zum Geschiebesammler und der Verbauung im Unterlauf, 5 = Sichtbarkeit der Erosionsphänomene im Gelände (Datengrundlage Datenbank Solid).....	38
Tabelle 10:	Wildbäche der Stichprobenauswahl der Stufe 3. (*nicht in der Datenbank Solid aufgeführt; Datengrundlage: Datenbank Solid).....	39
Tabelle 11:	Nicht ausgewählte Unterläufe der Stufe 2. 1 = Verfügbarkeit von Längs- und Querprofilen, 2 = begehbarer Unterlauf für Profilmessung (Datengrundlage: Datenbank Solid).....	39
Tabelle 12:	Visuelle Beurteilung der identifizierten Phänomene in Luft- und Satellitenbildern und topographischen Karten der Stufe 1. ....	40
Tabelle 13:	Unterläufe mit unterschiedlich beurteilten Kategorien nach einheitlich verbauten Abschnitten (A-D). Die Kategorie, welche die grösste Länge einnimmt, wird ausgewählt (hervorgehoben) *Abschnitt D am Humligenbach durch Renaturierung nicht beurteilt. (Datengrundlage: Datenbank Solid). ....	42
Tabelle 14:	Gründe für eine unzureichende Qualität der Luft- und Satellitenbilder am Beispiel der Stichprobe der Identifikation von geschiebearmen Bedingungen (Datengrundlage: Datenbank Solid).....	43
Tabelle 15:	Interpretation des Index-Wertes des Gerinne-, Mündungs- und Rückhalte-Indexes.	46

Tabelle 16:	Erosionsfaktoren zur Kategorisierung des Gerinne-Indexes. Faktor = im Gelände erfasste Erosionsphänomene mit Einbezug des Zustandes der Verbauung, Kategorie der Ausprägung der Erosion: 1 = gering, 2 = mässig, 3 = stark, 4 = sehr stark. Die Beschreibung der jeweiligen Kategorie entspricht den im Gelände festgestellten Phänomenen. ....	48
Tabelle 17:	Verbauungskoeffizient (V) des Gerinne-Indexes in Abhängigkeit der Stärke der Verbauung. Der Korrekturfaktor wird dem Mittelwert der restlichen Faktoren des einheitlich verbauten Abschnittes addiert. ....	48
Tabelle 18:	Beurteilung der Komponenten der Sohle für die Berechnung des Gerinne-Indexes anhand der untersuchten Wildbäche der Stufe 2. ....	50
Tabelle 19:	Beurteilung der Tiefenerosion für die Berechnung des Gerinne-Indexes anhand der untersuchten Wildbäche der Stufe 2. ....	52
Tabelle 20:	Beurteilung der Böschungserosion für die Berechnung des Gerinne-Indexes anhand der untersuchten Wildbäche der Stufe 2. ....	53
Tabelle 21:	Beurteilung der Kolkentiefe bei Sperrentreppen für die Berechnung des Gerinne-Indexes anhand der untersuchten Wildbäche der Stufe 2. ....	54
Tabelle 22:	Beurteilung der untersuchten Unterläufe der Stufe 2 anhand der Verbauung der einzelnen Abschnitte für die Berechnung des Gerinne-Indexes. ....	55
Tabelle 23:	Kategorisierung des Mündungs-Indexes. Untersucher Faktor: Kegelbildung im Vorfluter. Die Beschreibung der jeweiligen Kategorie entspricht den im Feld festgestellten Phänomenen. (* Unter der sogenannten Fahne wird ein durch den Vorfluter verschwemmter Kegel verstanden). ....	57
Tabelle 24:	Beurteilung des Faktors des kleinsten Masses des Durchlasses für den Rückhalte-Index. Die Klassengrenzen werden anhand der untersuchten Unterläufe zugeteilt. ....	60
Tabelle 25:	Korrektur des Rückhalte-Indexes in Abhängigkeit der Orientierung des Durchlasses und der Korngrösse (d90) im Rückhalteraum des Geschiebefaktors. ....	60
Tabelle 26:	Beurteilung des kleinsten Masses des Durchlasses (kleinste Höhe oder Breite) für die Berechnung des Rückhalte-Indexes anhand der untersuchten Wildbäche der Stufe 2. ....	62
Tabelle 27:	Beurteilung der untersuchten Unterläufe der Stufe 2 anhand der Korrekturfaktoren der Orientierung der Öffnung und der Korngrösse für die Berechnung des Rückhalte-Indexes. Bei der Vollsperrung am Dürrbach in Engelberg wird der Korrektur der Korngrösse nicht angewendet. ....	63
Tabelle 28:	Geschiebeentnahmen an den Geschiebesammlern der Stufe 3 gemäss der Datenbank Solid. (*nicht in der Datenbank Solid aufgeführt). ....	86
Tabelle 29:	Übersicht der letzten dokumentierten Ereignisse an den Wildbächen der Stufe 3. Quelle: Technische Berichte und Datenbank Solid. ....	87

## Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung der Kolktiefe am Ende einer Blockrampe. (Quelle: Studer 2010, nach Tschopp / Bisaz, 1972). .....	13
Formel 2: Berechnung der normierten Spannweite der Index-Werte mit einem Korrekturfaktor.....	45
Formel 3: Berechnung des Gerinne-Indexes pro einheitlich verbautem Abschnitt und den gesamten Unterlauf.....	47
Formel 4: Formel zur Berechnung des Mündungs-Indexes .....	57
Formel 5: Formel zur Berechnung des Rückhalte-Indexes.....	60

## Abkürzungen

BAFU	Bundesamt für Umwelt
DB Solid	Datenbank Solid
dGPS	Differenzielles Global Positioning System
FF	Forschungsfrage
GHO	Gruppe für operationelle Hydrologie
GI	Gerinne-Index
GIUB	Geographisches Institut der Universität Bern
GNSS	Global Navigation Satellite System
H	Hypothese
LK 5000	Landesekarte 1:5 000
LP	Längsprofil
MI	Mündungs-Index
QP	Querprofil
RI	Rückhalte-Index
swisstopo	Bundesamt für Landestopographie
TB	Technischer Bericht
VAW	Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie
WSL	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft



## 1. Einleitung

Murgänge und geschiebeführende Hochwasser stellen in Gebirgsregionen eine bedeutende Naturgefahr dar (Gertsch 2009). Um den Schutz vor Sachschäden wiederkehrender Ereignisse zu gewährleisten, werden unterschiedliche wasserbauliche Massnahmen errichtet (Hunzinger und Zarn 1996). Die Hochwasserereignisse im Sommer 1987 waren in vielen Wildbächen der Schweiz der Auslöser für den Bau von weiteren Geschiebesammlern (Haeberli et al. 1990). Der Geschieberückhalt und die aktiven Geschiebeentnahmen führen dabei zu einer erheblichen Beeinträchtigung des Geschiebehaushalts unterhalb vom Sammlern, indem der Feststofftransport durch das nahezu geschlossene Bauwerk stark beeinträchtigt wird (Takahashi 2014). Durch die Auswirkung des Geschiebesammlers treten auf dem Schwemmkegel anstelle von Ablagerungen vermehrt erosive Tendenzen auf (Romang 2004).

Am Chalberhönibach (Saanen, Kanton Bern) können mögliche geomorphologische Auswirkungen eines Geschiebesammlers beispielhaft aufgezeigt werden. Das geschiebeführende Ereignis vom Juli 2010 führte in diesem Wildbach zu grossen Sachschäden. Zur Behebung des Schutzdefizits wurde 2012 am Kegelhals ein Geschiebesammler mit einer Rückhaltekapazität von 9'200 m<sup>3</sup> fertig gestellt (Andres und Meier 2015). Die Verbauung der Unterlaufstrecke konnte aufgrund der laufenden Projektgenehmigung noch nicht realisiert werden. Im Mai 2015 führte ein neuerliches Ereignis dazu, dass der errichtete Sammler wie erwünscht die Feststoffe zurück hielt. Durch den Rückhalt erfolgte jedoch ein geschiebearmerer Abfluss im Unterlauf, welcher zu erheblichen Erosionen in Siedlungsnähe führte. Dieses Beispiel weist deutlich auf das sensitive Gleichgewicht zwischen der Transportleistung und der vorhandenen Geschiebefracht im Bereich des Kegels hin. Um solche instabile Sohlenlagen im Unterlauf zu verhindern, werden Sperrentreppen, Blockrampen, Raubettgerinne oder ähnliche wasserbauliche Massnahmen erstellt (Lehmann 2001).

Ein weiteres aktuelles Beispiel zeigt, dass auch im verbauten Unterlauf Erosionen auftreten können: Am Steinibach (Dallenwil, Kanton Nidwalden) wurde nach dem Ereignis im August 2005 mit der Vergrösserung des Geschiebesammlers einerseits das Schutzdefizit behoben und andererseits ein möglichst ausgeglichener Geschiebehaushalt vom Sammler bis zur Einmündung in die Engelberger Aa angestrebt (Schubiger 2009). In einer zweiten Bauetappe wurden neben dem Bau des Geschiebesammlers auch Ufersicherungen, Ergänzungen der natürlichen Sohlenpflasterung und eine Erweiterung der Sperrentreppen im Unterlauf errichtet. Obwohl Massnahmen gegen die Erosion ergriffen wurden, konnte der beabsichtigte ausgeglichene Geschiebetransport im Unterlauf nicht vollständig erreicht werden. Während dem geschiebeführenden Ereignis im Mai 2015, führte der Geschieberückhalt weiterhin zu erheblicher Böschungs- und Tiefenerosion von mehreren Metern und damit zur Destabilisierung der Ufer und angrenzenden Flächen im Unterlauf (s. Abbildung 1).



Abbildung 1: Erosion der Böschung im Unterlauf des Steinibachs in Dallenwil. (Aufnahmedatum 20. Juli 2015).

Durch Hochwasserereignisse mit unterschiedlicher Feststoffzusammensetzung verändert sich die Sohlenlage in unverbauten und wenig verbauten Abschnitten im Unterlauf von Geschiebesammlern. Eine stabile Sohlenlage im Unterlauf ist jedoch für den Hochwasserschutz und die Stabilität der Infrastruktur von grosser Bedeutung. Der effiziente Rückhalt von Feststoffen in einem Sammler erhöht zwar die Hochwassersicherheit, stellt aber gleichzeitig die Stabilität in Frage. Diese Geschiebeproblematik im Unterlauf ist jedoch kein Untersuchungsschwerpunkt der Forschung (Habersack et al. 2014b). Dem Geschieberückhalt wird in Bezug auf die Erosion im Unterlauf wenig Beachtung geschenkt (Takahashi 2014). Im Gerinne direkt unterhalb von Geschiebesammlern besteht im Bereich der geomorphologischen Ist-Zustandsanalysen somit Handlungsbedarf (Lehmann 2001), da ausführliche Informationen über den Geschiebehaushalt und die Sohlenentwicklung für die Beurteilung der Hochwassersicherheit und Stabilität der Infrastruktur notwendig sind.

## 1.1 Stand der Forschung

Dieses Kapitel erklärt den aktuellen Stand der Forschung des Themenbereichs von Geschiebesammlern in Wildbächen und deren geomorphologische Auswirkungen flussabwärts. Des Weiteren werden die Forschungslücke sowie das Ziel der Arbeit erläutert.

### 1.1.1 Wildbäche und Geschiebetransport

Wildbäche werden als „(...) oberirdische Gewässer mit zumindest streckenweise grossem Gefälle, rasch und stark wechselndem Abfluss und zeitweise hoher Feststoffführung“ definiert (DIN 19663 1985). Der Wildbach ist somit ein andauernd oder phasenweise fliessendes Gewässer (Bergmeister et al. 2009). Der Charakter eines Wildbaches ist von unterschiedlichen Einflussfaktoren abhängig, welche räumlich und zeitlich variabel sind (Kienholz et al. 1998).

In Wildbächen treten saisonal Hochwasser, Geschiebe- und Schwemmh Holztransport sowie Murgänge auf (Böll et al. 2008). Die abgetragenen und transportierten Feststoffe werden im Schwemmkegel abgelagert (Bergmeister et al. 2009).

Die Hochwasserereignisse von 1987 der Schweiz (Haerberli et al. 1990) zeigen, dass ein grosser Teil der Schäden durch Feststoffe zustande kommt. Analysen ergaben, dass Schwebstoffe den Schaden im Vergleich zu Reinwasserüberflutungen bis zu 80% erhöhen (Habersack et al. 2014b). Die Kenntnis des Geschiebetransports auf dem besiedelten Kegel ist für den Schutz vor Murgängen und geschiebeführenden Hochwassern erforderlich.

Die Gesamtheit von Geschiebe, Schwebstoffen und Eis ist unter dem Begriff Feststoffe zusammengefasst (Spreafico et al. 2005). Unter der wasserbaulichen Definition wird Geschiebetransport als rollender, gleitender oder springender Transport im Bereich der Gewässersohle verstanden (Spreafico et al. 2005). Die Geschiebe hat somit während dem Transport Kontakt mit der Gerinnesohle (Charlton 2007).

Der Wildbach weist von der Quelle bis zur Mündung unterschiedliches Fließverhalten auf (Strobl und Zunic 2006). In den Oberlauf münden kleine Nebenflüsse. Durch das grosse Fließgefälle werden Feststoffe erodiert und über einen längeren Zeitraum betrachtet tieft sich der Oberlauf ein. Im Mittellauf werden die erodierten Feststoffe transportiert und umgelagert. Bei ausgeglichenen Verhältnissen finden kaum grössere Erosionen und Auflandungen statt. Der Unterlauf besitzt ein geringeres Gefälle. Dadurch findet in der Regel Auflandung und die Bildung eines Kegels im Vorfluter statt (Strobl und Zunic 2006). Somit nehmen Ablagerungen natürlicherweise flussabwärts zu, da sich der Feststoffgehalt kumuliert (Charlton 2007) und sich die Transportkapazität durch das abnehmende Gefälle verringert.

Die natürliche Flusssohle ist beweglich, falls das Gerinne nicht im Festgestein fliesst, und besteht aus Ablagerungen von Sedimenten. In Abhängigkeit der Beanspruchung der Sohle durch unterschiedliche Abflüsse treten gemäss Strobl und Zunic (2006) drei unterschiedliche Zustände des Gerinnes auf:

- **Auflandungszustand**  
Feststoffablagerungen bzw. Akkumulation entsteht, wenn mehr Feststoffe zugeführt als transportiert werden. Die Sohle hebt sich dadurch an. Mögliche Gründe können die Abnahme des Fliessgefälles oder eine Verbreiterung des Flussbettes sein.
- **Gleichgewichtszustand**  
Ein Feststoffgleichgewicht entsteht, wenn die Menge des zugeführten Materials des Oberlaufs der Menge des weitertransportierten Materials des Unterlaufs entspricht. Aufgrund der ausgeglichenen Feststoffbilanz ist die Höhenlage des Gerinnes stabil.
- **Erosionszustand**  
Ein Feststoffdefizit entsteht, wenn weniger Feststoffe zugeführt als transportiert werden und somit Erosion eintritt.

Die drei beschriebenen Zustände sind vom jeweiligen Abfluss abhängig. Der Transport von Feststoffen in Wildbächen findet nur statt, wenn ausreichend Material und eine ausreichende Fliessgeschwindigkeit vorhanden sind (Charlton 2007). Da die Abflüsse im Wildbach sehr unterschiedlich sind, werden für die Beurteilung der Zustände Zeiträume von mehreren Jahren betrachtet (Strobl und Zunic 2006).

Für eine Abschätzung des Feststofftransportes ist der Beginn der Mobilisierung entscheidend. Das Konzept der kritischen Geschwindigkeit stellt den Zusammenhang der mittleren kritischen Fliessgeschwindigkeit und dem mittleren Korndurchmesser der Sohle dar (Strobl und Zunic 2006). In Abbildung 2 nach Hjulström (1935) ist ersichtlich, dass kleinere Korngrößen bereits durch eine geringere mittlere Fliessgeschwindigkeit mobilisiert werden können. Unter einer Korngrösse von 0.2 mm nimmt die Kohäsion der Partikel durch den Anstieg von kohäsiven Tonpartikel zu und dadurch auch die erforderliche Fliessgeschwindigkeit für eine Erosion. Dieser Ansatz ist für eine erste Abschätzung geeignet.

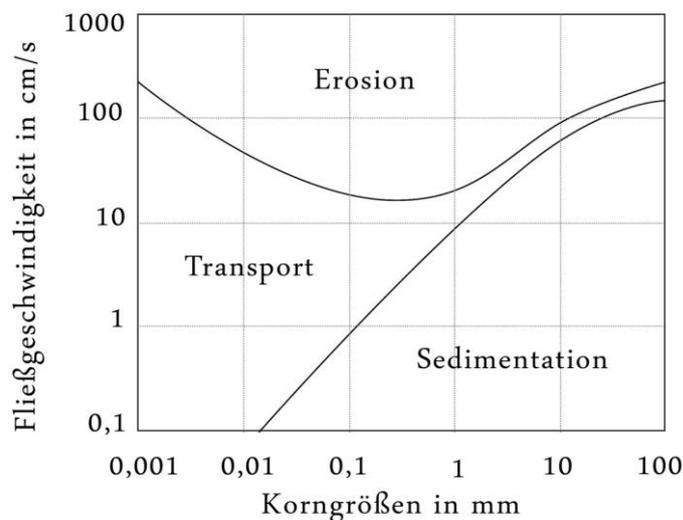


Abbildung 2: Sohlenstabilität in Abhängigkeit der Korngrösse und der Fliessgeschwindigkeit von Fliessgewässern nach Hjulström 1935 (Quelle: Strobl und Zunic 2006).

Aufgrund der zentralen Bedeutung des Geschiebes sind Messungen und Abschätzungsverfahren erforderlich. Für viele Abschätzverfahren ist die Kenntnis der Kornverteilung relevant. Die Korngrößenverteilung der Gerinnesohle kann durch klassische Linienzahlanalysen und Siebanalysen erfasst werden (Fehr 1987). Ein flächendeckendes und kontinuierliches Feststoffmonitoring wird immer wichtiger, um Prozesse der Naturgefahren in den Alpen besser zu verstehen und um Modelle zu kalibrieren und validieren (Habersack et al. 2014b).

Flächendeckende Messungen der Geschiebelieferung in Wildbächen werden nicht systematisch durchgeführt. Der Artikel von Habersack et al. (2014b) zeigt auf, dass Geschiebemesssysteme aus direkten Methoden wie Geschiebefänger und Geschiebefallen sowie aus indirekten Methoden wie bspw. Geophonen bestehen. Wird an Geschiebefängern, Geschiebefallen oder Geschiebesammlern regelmässig Geschiebe entnommen und gemessen, wird dies als quantitative Methode bezeichnet. In Österreich werden momentan drei Messstationen mit Geschiebefallen unterhalten. Die erste Geschiebefalle in einem Wildbach wurde 2010 an der Ursiau in Salzburg in Betrieb genommen. Der Vorteil einer festen Falle ist, dass kontinuierliche und automatische Messungen durchgeführt werden können. Zudem kann zu dem Geschiebetransport und der Textur auch der Bewegungsbeginn und die zeitliche Variabilität erhoben werden. Nachteilig ist, dass die Wartung der Messstation arbeitsintensiv ist. Als qualitative Messmethode gilt die Messung anhand von Hydrophonen, Geophonen, Tracersteinen oder optischen Methoden. Feststoffmessungen mit Geschiebefängern, Geschiebefallen und Geophonen (Habersack et al. 2014b) sind in Bezug auf Abflussmessungen vergleichsweise aufwändig. Diese Messungen sind jedoch wichtig, um weitere Erfahrungen in den Wildbächen zu gewinnen. Indirekte Messungen des Schwebstoffmonitorings werden oft mit direkten Schwebstoffprobeentnahmen kombiniert.

In der Schweiz wurden verschiedene Testgebiete zur Wildbachforschung erstellt (Kienholz et al. 1998). In Alptal am Erlenbach (Kt. Schwyz) betreibt die WSL beispielsweise seit den frühen 1980er Jahren Geschiebemessungen, indem das abgelagerte Sedimentvolumen im Geschiebesammler jährlich vermessen wird. Seit 1986 werden Messungen mit Geophonsensoren durchgeführt. 2008 wurden automatische Fangkörbe oberhalb des Sammlers gebaut, um die Kornzusammensetzung zu ermitteln. Zudem werden in unregelmässigen Abständen Versuche mit Tracersteinen durchgeführt. Das Testgebiet in Plaffeien am Rotenbach und Schwändlibach (Kt. Freiburg) musste wegen technischen Problemen aufgegeben werden (WSL 2011).

Am Spissibach in Leissigen (Kt. Bern) hat das Geographische Institut der Universität Bern (GIUB) 1989 ein weiteres Testgebiet mit einem Hydrophon am Kegelhalbe beim Geschiebesammler aufgebaut. Seit 1992 wird der Geschiebeablagerungsplatz im Geschiebesammler vermessen. (Kienholz et al. 1998). Die Aufzeichnungen der Hydrophone werden zum aktuellen Zeitpunkt nicht mehr durchgeführt.

Im Rahmen des Projektes der Datenbank Solid (s. Kapitel 1.1.2) werden am Erlenbach, Rotenbach, Schwändlibach und Spissibach sowie weiteren Geschiebesammlern der Schweiz die jährlichen Entnahmekubaturen an Geschiebesammlern aufgeführt. Die längsten Messreihen liegen am Rotenbach und Schwändlibach mit einem Messbeginn im Jahre 1953 vor (Grasso et al. 2010).

Das gemessene Resultat der transportierten Feststoffe kann als spezifischer Geschiebetransport [ $\text{kg/ms}$  oder  $\text{m}^3/\text{ms}$ ], als Geschiebetransport [ $\text{kg/s}$  oder  $\text{m}^3/\text{s}$ ] oder als Geschiebefracht [ $\text{kg}$  oder  $\text{m}^3$ ] angegeben werden (Habersack et al. 2014b).

Verschiedene Modelle dienen der Modellierung des Feststofftransports. Die sedFlow Simulation wurde an der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) entwickelt und ist geeignet, um Wildbäche eindimensional abzubilden. Die Simulation hat den Vorteil, dass die Makro-Rauheit und der fraktionsweise Transport berücksichtigt werden (Rickenmann et al. 2014). Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) entwickelte im Jahr 2006 die Software BASEMENT (basic-simulation-environment). Die Software ermöglicht den Sedimenttransport von alpinen Flüssen ein- und zweidimensional zu modellieren. Die Software BASEMENT dient auch der Simulation der zukünftigen Entwicklung von Sedimentablagerungen und der Veränderung der Gerinnesohle (Vetsch et al. 2014).

### 1.1.2 Geschiebesammler und ihre Rückhaltewirkung

In Gebirgsregionen mit intensiver Siedlungsnutzung werden Wildbäche zum Schutz vor geschiebeführenden Hochwasserereignissen stark verbaut (Hunzinger und Zarn 1996). Die Linthkorrektur war ab 1807 der Auftakt für den Bau einer Vielzahl von Geschiebeauffangbecken in der Schweiz (Vischer 2003). Sie verhinderten die Aufschotterung der Linthebene. Seit 1870 führten diese systematischen Verbauungen im Alpenraum zu erheblichen Eingriffen in das Gewässersystem (Bergmeister et al. 2009). Nach den Hochwasserereignissen im Sommer 1987 wurden vermehrt auch Wildbäche zum Schutz vor Murgängen stark verbaut (Haeberli et al. 1990). In Gebirgsregionen wurden oft weiterführende Schutzmassnahmen getroffen, um die Gefahren von Wildbächen einzudämmen. Da es gemäss Hegg et al. (2001) die grossen Feststoffmengen sind, welche für den Menschen und die Infrastruktur gefährlich werden können, sind Wildbäche hauptsächlich zum Schutz vor geschiebeführenden Hochwasserereignissen stark verbaut (Hunzinger und Zarn 1996). Gründe für die Zunahme sind veränderte klimatische Bedingungen und der Anstieg des Siedlungsdrucks, da vermehrt der Kegel der Wildbäche als Siedlungsraum genutzt wird (Hunzinger und Zarn 1996). Zudem ist das Verlangen nach abgedämpften Abflussspitzen gestiegen (Schöberl 1992). Um die Sicherheit vor geschiebeführenden Ereignissen und Murgängen auf dem Schwemmkegel zu erhöhen, wurden je nach Schutzfunktion unterschiedliche Bauwerke errichtet.

Zur Regulierung (Retention und Dosierung) von Feststoffen werden Geschiebesammler mit einem Absperrbauwerk und mit einem Rückhalteraum (Verflachung des Gerinnes) konstruiert (Bergmeister et al. 2009; s. Abbildung 3). Der Geschiebesammler lagert Feststoffe durch die abnehmende Transportkapazität ab (Romang 2004). Je nach Schwemmholzvolumen aus dem Einzugsgebiet wird zudem ein Rechen zum Rückhalt von Schwemmholz integriert (Romang 2004).

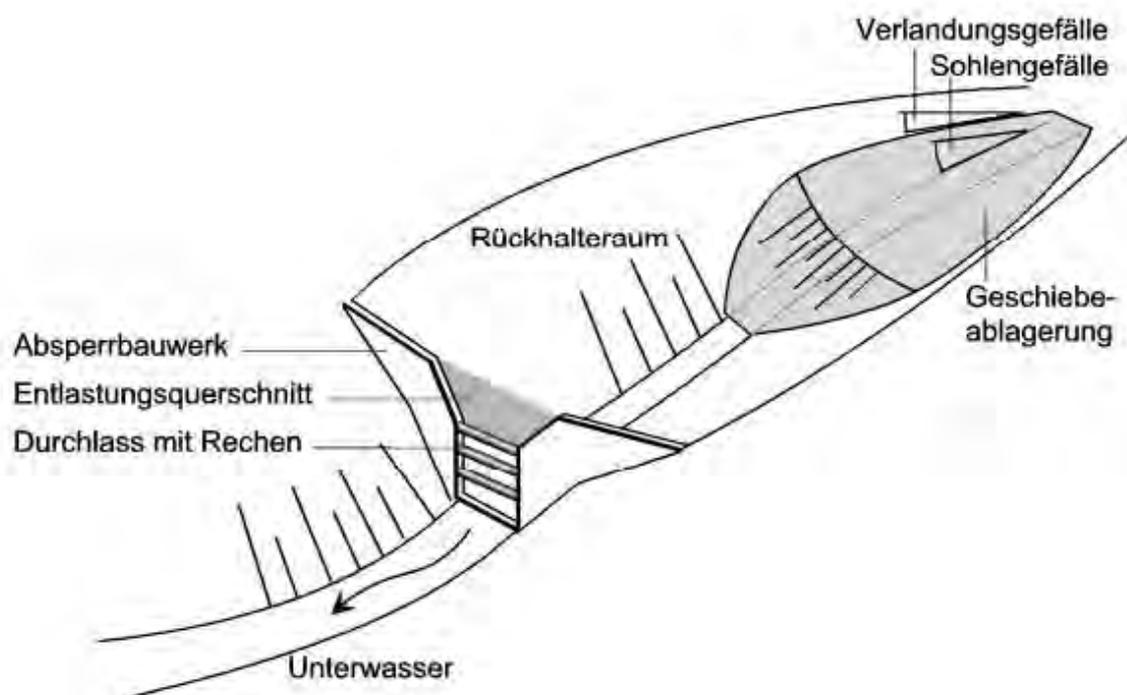


Abbildung 3: Schematische Skizze eines Geschiebesammlers (Promny und Müller 2008)

Gründe für den Bau von Geschiebesammlern sind gemäss Zollinger (1983):

- Der Schutz vor geschiebeführenden Hochwassern, indem der Geschiebesammler gefährliche Ablagerungen unterbindet, welche durch ein Hochwasser mobilisiert werden.
- Der Unterlauf soll nicht mehr mit Geschiebe belastet werden. Der Hochwasserschutz wird gefördert, indem Geschiebeablagerungen in flachen Abschnitten verhindert werden (Schälchli et al. 2005).

Geschiebesammler werden oftmals direkt am Kegelhals oder auf dem Kegel errichtet (Takahashi 2014). In Abhängigkeit der Funktionsweise werden unterschiedliche Wildbachsperren gebaut (Bergmeister et al. 2009). Die unterschiedlichen Bauweisen der Geschiebesammler können anhand der massgebenden Wildbachprozesse, dem Funktionstyp der Sperre, der Anordnung des Bauwerks etc. klassiert werden. Das Absperrbauwerk kann zudem anhand von unterschiedlichen Attributen (Grundriss- und Schlitzform, Anzahl Sperröffnungen etc.) unterschieden werden (Bergmeister et al. 2009). In Abbildung 4 sind unterschiedliche Bautypen von Geschiebesammlern beispielhaft dargestellt.



Abbildung 4: Schematische Darstellung mit Beispielen von unterschiedlichen Absperrbauwerken von Geschiebesammlern nach Soda A-Q: Konsolidierungssperren, D-F: grossdolidge Sperren, G-H Schlitzsperren, I: Schlitzdolen, J: Doppelschlitzsperre mit Mittelscheibe, K: aufgelöste Sperre, L,N: Murbrecher, M,O: aufgelöste Sperre mit Balkenverschluss, P: Netzsperre, Q: Seilsperre.(Quelle: Bergmeister et al. 2009).

Geschiebesammler können anhand von Aspekten des Einzugsgebietes und des Absperrbauwerkes und des Rückhalteraaumes beschrieben werden (Bergmeister et al. 2009). Aspekte des Einzugsgebietes:

- die Korngrössenverteilung und die Korngrösse ( $d_{90}$ )
- die Ereignisgrösse
- die Ereignisart (Zusammensetzung von Feststoffen und Abfluss)

Aspekte des Absperrbauwerkes und Rückhalteraaumes:

- der Ablagerungswinkel
- Form des Ablagerungsraums
- Höhe und Breite des Absperrbauwerkes
- Grösse der Öffnungen
- Anordnung / Form der Öffnungen

Die Rückhaltewirkung bzw. der Durchlass von Feststoffen ist je nach Bauart des Geschiebesammlers unterschiedlich. Die technische Wirksamkeit (Rückhaltewirkung) des Geschiebesammlers beschreibt das Verhältnis zwischen dem Eintrag und dem Rückhalt von Feststoffen (Romang 2004). Offenere Geschiebesammler erlauben den Feststoffen bei normalem Abfluss das Rückhaltewerk durch die Öffnungen zu passieren. Geschiebesammler mit einem nahezu geschlossenen Rückhaltewerk schränken den Geschiebetransport im Unterlauf stark ein (Takahashi 2014). Methoden zur vergleichenden Erfassung von Rückhaltewirkungen sind nicht bekannt. Im Rahmen der laufenden Masterarbeit von Strehl (2016) wird eine Methode zur einheitlichen Abschätzung der Rückhaltewirkung von Geschiebesammlern erarbeitet.

Für die Beurteilung von Geschiebesammlern und deren Wirkung ist zusätzlich zur Rückhaltewirkung die Geschiebeentnahme am Sammler relevant. Vor knapp 30 Jahren wurde die Datenbank Solid (DB Solid) von der GHO (Gruppe für operationelle Hydrologie) ins Leben gerufen. Die Datenbank Solid vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) beinhaltet Aufzeichnungen (zwischen 5 und 60 Jahren) von Entnahmehöhen der Geschiebesammler (Grasso et al. 2010). Dieses Instrument ermöglicht die Geschiebefracht durch die Entleerung und das Wiegen der Lastwagen indirekt zu erfassen und eine Kubatur pro Entleerung in der DB Solid anzugeben. Hierbei muss beachtet werden, dass diese Angaben mit Unsicherheiten der Rückhaltewirkung des Sammlers und dem Verhältnis des effektiven ausgebagerten Feststoffanteils sowie des gesamten Materials im Rückhalteraum behaftet sind. Trotz diesem Nachteil sind die Daten einmalig, da sie Zeitreihen von bis zu 60 Jahren generieren und durch die Mitarbeit von 11 Kantonen und 2 Forschungsinstitutionen mit 108 Geschiebesammlern der Schweiz (GIUB 2015) eine relativ gute Datenbasis darstellen. Zudem sind im Rahmen der Konzeptoptimierung der DB Solid (GIUB 2015) erste Abschätzungen zur Rückhaltewirkung von zuständigen Personen der Geschiebesammler erhoben worden.

Dieses Feststoffmonitoring mit Entleerungskubaturen an Geschiebesammlern der DB Solid dient einerseits als Grundlage für wissenschaftliche Untersuchungen und andererseits für Planungsarbeiten von neuen Schutzmassnahmen (Grasso et al. 2010). Die Geschiebeentnahme ist je nach Materialzusammensetzung auch wirtschaftlich interessant, wenn das Geschiebe durch den Sammler relativ einfach abtransportiert (Üblagger 1973) und vor Ort für das Bauwesen weiterverwertet werden kann.

### 1.1.3 Auswirkung des Geschiebesammlers auf den Unterlauf

Der Geschiebeeintrag aus den Prozessen des Einzugsgebietes beeinflusst die morphologische Struktur des Gerinnes (Mendez 2008). Durch die Entnahme von Material wird das Gleichgewicht zwischen dem Sedimentangebot und der Transportkapazität gestört (Brierley und Fryirs 2004). Dies hat zur Folge, dass der Unterlauf komplett oder teilweise geschiebearm ist und eine erosive Tendenz aufweist (Romang 2004). Da auch während Perioden mit einer ausgeglichenen Geschiebebilanz Material im Ablagerungsraum von Geschiebesammlern abgelagert wird, wirkt sich dies durch einen „Energieüberschuss mit Erosionsfolgen“ negativ auf den Unterlauf aus (Üblagger 1973). Wasserbau kann somit in Abhängigkeit des Baus zu einem erheblichen Eingriff in das natürliche Transportregime führen (Schöberl 1992) und dadurch ein Geschiebemanko verursachen (Zimmermann 1989). Werden Feststoffe während einem geschiebeführenden Ereignis an Absperrbauwerken abgelagert, führt der Abfluss unterhalb des Geschiebesammlers kaum Feststoffe. Unterhalb des Geschiebesammlers kann das geschiebeentlastete Wasser zu Erosion führen. Aufgrund der Beeinträchtigung der Geschiebedurchlässigkeit durch Rückhaltwerke treten Veränderungen in Transportvorgängen auf (Brierley und Fryirs 2004). Diesen Veränderungen des Sedimenttransports und des Abflusses passen sich die geomorphologischen Formen der Gewässer an (Charlton 2007), indem vermehrt Erosion und eine Abnahme von Feststoffablagerungen zu erwarten sind.

Bezüglich des Hochwasserschutzes sind Auflandungen im Unterlauf nachteilig (Schälchli et al. 2005). Auch die daraus entstandenen Erosionstendenzen im Unterlauf (Romang 2004) sind unerwünscht. Gemäss Fahrni (2015) ist Erosion erwünscht, wenn der Hochwasserschutz und wasserbauliche Massnahmen nicht negativ beeinträchtigt werden. Gemäss Zimmermann (1989) wurden vermehrt Sohlenveränderungen, unter anderem durch Entnahmen an Geschiebesammlern festgestellt. Diese Veränderungen im Gerinne können anhand von typischen Prozessen der Erosion festgestellt werden. Typische Formen der Erosion sind die Tiefen- und Böschungserosion, welche oftmals zusammenwirken. Diese werden im Folgenden beschrieben und mit möglichen wasserbaulichen Massnahmen zur Stabilisierung ergänzt.

- Tiefenerosion

Wird aus dem Einzugsgebiet nicht ausreichend Geschiebe aus Runsen, Schutthalden oder Anrissstellen mobilisiert, wird Material aus der Gerinnesohle abgetragen und es kommt zu einer Sohleneintiefung (Schälchli et al. 2005). Unter dem Begriff Sohlenerosion wird eine rasche oder über Jahre beobachtete flächenhafte Absenkung der mittleren Höhenlage des Sohlenniveaus verstanden (Kraus 1998). Ein erhöhtes Gefälle, das Entfernen der natürlichen Grobkorndeckschicht, die Erhöhung des Abflusses, der Rückhalt von Geschiebe und die Eintiefung des Vorfluters sind häufige Ursachen für eine Sohlenerosion. Erkennungsphänomene der linearen Sohlenerosion sind wandernde Erosionsstufen, freigespülte Wurzelstämme, Bauwerke und Drainageneinläufe, instabile Ufer und hochliegende Seitenbänke (Kraus 1998). Folgen der Tiefenerosion sind unterspülte Ufersicherungen, Auengebiete die nicht mehr regelmässig überschwemmt werden und Einwirkungen auf den Grundwasserspiegel (Künzi und Müller 2009).

Gemäss Strobl und Zunic (2006) werden zur Sicherung gegen Tiefenerosion Sohlschwellen quer zur Fliessrichtung konstruiert. Diese führen zu einer Reduktion der Fliessgeschwindigkeit und des Sohlgefälles sowie zu einer Energieumwandlung. Daraus erfolgt eine Reduktion der Geschiebetransportkapazität. Durch den Abfluss über den gesamten Rampenkörper und einer rauen Rampe nimmt die Fliessenergie

ab und die Kolkgrösse wird verringert. Umlagerungen und die Bildung von Kolken sind aus ökologischen Gründen bis zu einem gewissen Ausmass erwünscht. Sohlenpflasterungen haben eine effiziente Wirkung des Erosionsschutzes, sind unter ökologischer Betrachtung weniger sinnvoll. Eine weitere Möglichkeit ist die aktive Kiesrückgabe in Fliessgewässer (Strobl und Zunic 2006). Diese Massnahme kann beispielsweise mit einem Anteil der Entnahmekubatur des Geschiebesammlers an geeigneten Stellen im Unterlauf durchgeführt werden. Die zugeführten Feststoffe können bei höherem Abfluss mobilisiert und abgelagert werden (Schälchli und Kirchhofer 2012).

- Seiten- und Ufererosion

Für die Wirkung der Seitenerosion ist die Schleppspannung [ $\text{N/m}^2$ ], Strömungsleistung [ $\text{W/m}$ ] sowie die Dauer der Strömungsbelastung ausschlaggebend (Hunzinger et al. 2015). Die Seitenerosion ist ein Gerinneprozess, welcher zur Erosion von Böschungsmaterial führt. Anbrüche der Böschung treten durch Erosion am Aussenbogen oder durch eine Verlagerung des Gerinnebettes auf (Bergmeister et al. 2009). Die Ufererosion wirkt ausserhalb des Gerinnes und wird als Gefahrenprozess verstanden (Hunzinger et al. 2015). Uferabbrüche entstehen durch eine Erosion des Böschungsfusses und sind somit das Resultat einer Tiefenerosion (s. Abbildung 5, Loat und Petrascheck 1997). Dies ist in steilen Wildbächen die häufigste Ursache der Sohlenerosion (Hunzinger et al. 2015). Böschungsbrüche entstehen durch gravitationsinduzierte Massenbewegungen (Mendez 2008).

Durch die Ufererosion können Infrastrukturen, Siedlungen und Kulturland gefährdet werden (Bezzola 2002). Klassische Massnahmen zur Ufersicherung sind nach Strobl und Zunic (2006) lückenlose Parallellbauwerke aus Holz, Blöcken oder Beton. Bei geringen Fliessgeschwindigkeiten kann auch die Bepflanzung der Ufer dem Schutz dienen. Kräftige Wurzelwerke sichern hierzu die Ufer. Zur Sicherung des Fusses der Böschung werden Faschinen aus Weidenruten verwendet. Bei steileren Böschungen und stärkerem Geschiebetrieb ist eine Ufersicherung mit Steinen notwendig. Die Blockgrösse wird in Abhängigkeit des Böschungssubstrats und der Schubspannung gewählt. Buhnen und Steinsporne sind eine weitere Möglichkeit zur Sicherung der Ufer (Strobl und Zunic 2006). Diese werden vermehrt in flacheren Gewässern angewendet.

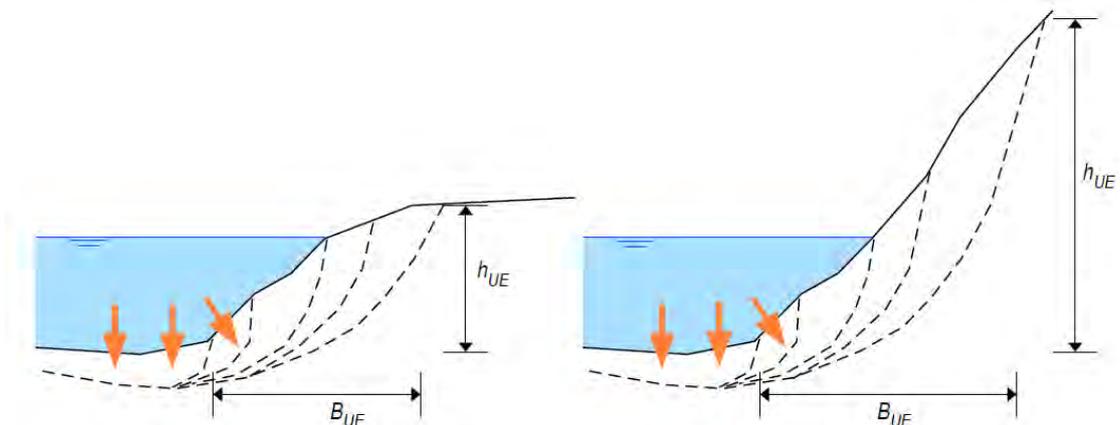


Abbildung 5: Erosion des Böschungsfusses. Links bei niedriger Böschung, rechts bei hoher Böschung.  $B_{UE}$  = Erosionsbreite,  $h_{UE}$  = Erosionshöhe. (Quelle: Hunzinger et al. 2015).

In Abschnitten mit Sperrentreppen ist zudem die Ausprägung der Kolkgrösse ein Indikator für eine allfällige Erosion.

- Kolkbildung bei Sperrentreppen  
 Der Kolk entsteht bei Überfällen der Sperren. Durch den Fließwechsel im Unterwasser des Bauwerks werden Sedimente transportiert und bei der Auftreffstelle entsteht ein Kolk zur Energiedissipation (Bergmeister et al. 2009). Die Wirkungsweise der Sperre ist in Abbildung 6 dargestellt.

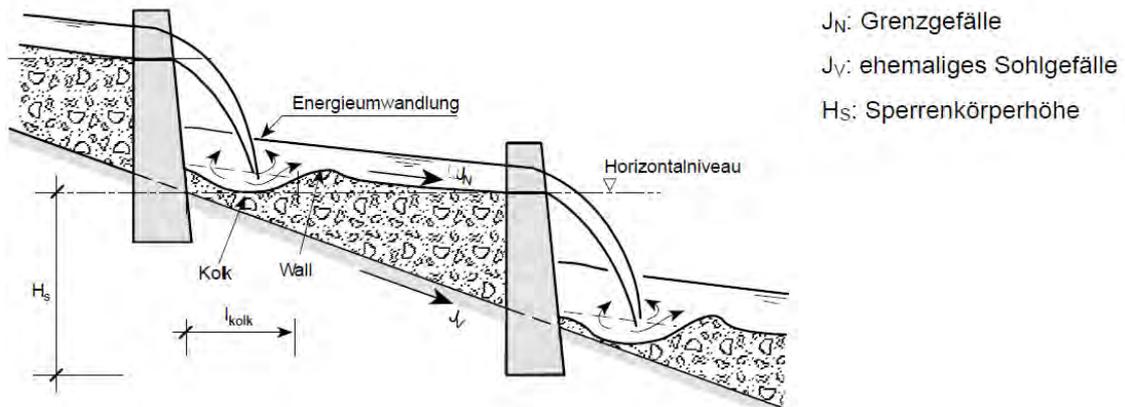


Abbildung 6: Schematische Darstellung im Längsprofil der Kolkbildung unterhalb von Sperrentreppen. (Quelle: Bergmeister et al. 2009, nach Böll 1997).

Die Ausprägung des Kolks am Fuss hängt von dem spezifischen Abfluss, der Überfallhöhe und des Sohlenmaterials ab. Durch den Überfall bilden sich vertikale Wirbel (Deckwalze / Grundwalze) und Randwalzen mit einer Rückströmung (s. Abbildung 7, Bergmeister et al. 2009). Die Bildung von Kolken kann zur Unterspülung und zum Einsturz der wasserbaulichen Massnahme führen (Annandale et al. 2002).

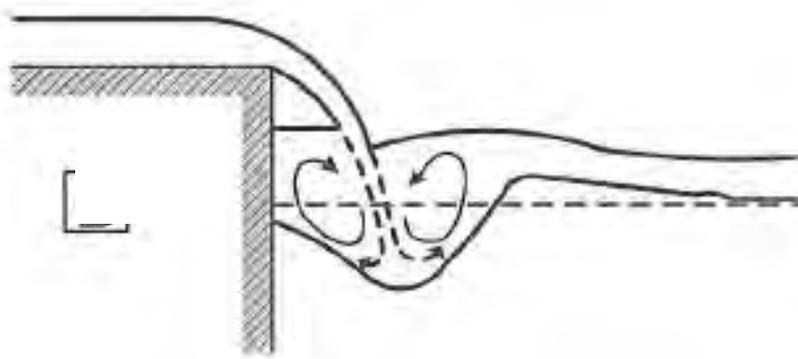


Abbildung 7: Überfall bei beweglicher Sohle im Unterwasserbereich. Quelle: Bergmeister et al. 2009, nach Zeller 1971)

Für die Dimensionierung der Sperre ist der Sperrenabstand sowie die Überfallhöhe relevant (Bergmeister et al. 2009). Eine Möglichkeit der Berechnung der Kolkentiefe ( $S$ , [m]) ist in der modifizierten Formel 1 nach Tschopp / Bisaz (1972) dargestellt (Studer 2010). Die Berechnung erfolgt aufgrund des spezifischen Abflusses ( $q$ , [ $\text{m}^3/\text{ms}$ ]), der Fliessgeschwindigkeit am Ende der Blockrampe ( $V_E$ , [m/s]) und des Korndurchmessers des Sohlenmaterials bei 90 % Siebdurchgang ( $d_{90}$ , [m]). Für die Dimensionierung der Sperre können in Abhängigkeit der Neigung der Sohle der Zuflussgeschwindigkeit die Gleichung nach Angerholzer oder Müller angewendet werden (s. Bergmeister et al. 2009).

$$S = 0.85 \sqrt{q \cdot v_E} - 7.125 d_{90}$$

Formel 1: Berechnung der Kolkentiefe am Ende einer Blockrampe. (Quelle: Studer 2010, nach Tschopp / Bisaz, 1972).

Bauwerke können in Abhängigkeit der Dimensionierung und des Geschiebehaushalts unterspült werden. Dadurch können Bachausbrüche und Verwerfungen entstehen (Habersack et al. 2014a).

- Komponenten der Sohle

Gemäss Strobl und Zunic (2009) besteht eine unbeeinträchtigte Gerinnesohle aus einer Mischung von Sand, Kies, Steinen und gröberen Komponenten. Finden die Prozesse des Transports und der Erosion über einen längeren Zeitraum statt, bildet sich eine Deckschicht aus Grobkomponenten (sog. Sohlpanzerung) über der Grundsicht der natürlichen Flusssohle (Strobl und Zunic 2006; s. Abbildung 8). Diese Selbststabilisierung der Deckschicht verhindert gemäss Weichert (2006) die Sohlenerosion. Wird die Belastungsgrenze der Deckschicht durch Hochwasserabflüsse überschritten, kann auch bei der Deckschicht Erosion eintreffen (Weichert 2006).

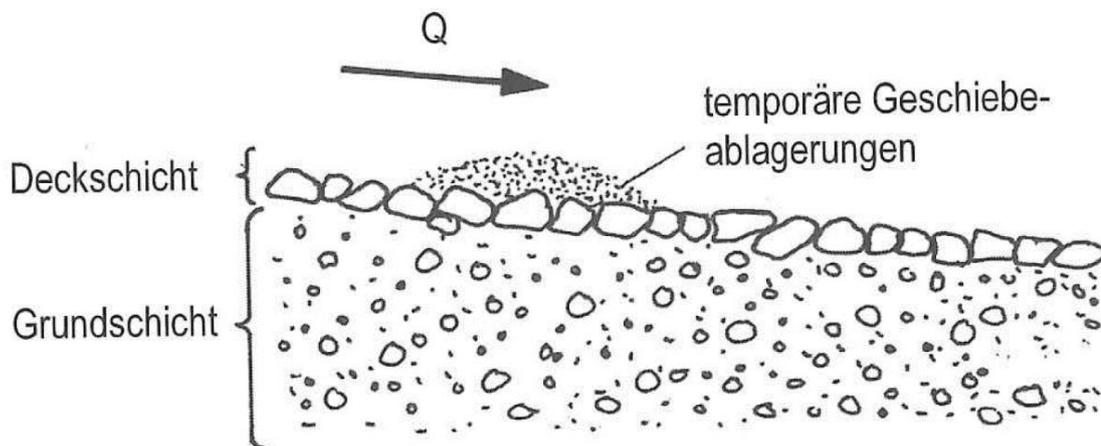


Abbildung 8: Schematische Darstellung Deckschicht durch die passive Anreicherung von Grobkomponenten.  $Q$  = Abfluss. (Quelle: Strobl und Zunic 2006).

Die Einflussfaktoren für das Ausmass der Erosion sind gemäss Lehmann (1996) die Gerinnegeometrie, die Widerstandsfähigkeit des Gerinnes und der Böschung, die Wasserführung (Abflussmenge und Fliessgeschwindigkeit) und die Geschiebeführung. Die unterschiedlichen Formen der Erosion sind oftmals unerwünschte Konsequenzen des Hochwasserschutzes. Sie wirken sich nicht nur auf den Unterlauf, sondern auf das gesamte unterliegende Gewässersystem aus (Brierley und Fryirs 2004).

Durch Hochwasserschutzmassnahmen wie Geschiebesammler wird vor allem die Geschiebeführung stark beeinträchtigt. Gemäss Schälchli et al. (2005) sollte beabsichtigt werden, dass die Gerinnesohle ein stabiles Niveau erreicht.

Zur Stabilisierung der Gerinnesohle werden die folgenden wasserbaulichen Massnahmen erstellt:

- Quer- und Längswerke aus Beton, Blöcken oder Holz (Bergmeister et al. 2009)
- ein Erosionsschutz der Sohle mit Blöcken oder einem Raubettgerinne (Lehmann 2001)
- Aufweitungen und Renaturierungen (Mosimann 1998)

Treten trotz Verbauungen im Unterlauf Schäden an Infrastrukturen wie Bahnlinien, Strassen, Stromleitungen oder Abwasserleitungen auf, sind die erforderlichen Massnahmen kostenintensiv (Künzi und Müller 2009). Um teure Anpassungsmassnahmen durch bauliche Massnahmen zu verhindern, sind Ist-Zustandsanalysen und langfristige Monitoringprogramme vom Feststofftransport gefordert (Habersack et al. 2014b). Auch Jefferson et al. (2013) erläutert die Notwendigkeit, geomorphologische Veränderungen stärker zu untersuchen.

In Österreich wird die aktuelle Geschiebeproblematik im Rahmen des nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans flächendeckend untersucht. Das Projekt SED\_AT verfolgt das Ziel, Gerinne- und Transportveränderungen frühzeitig festzustellen (Habersack et al. 2014c). Durch die Veränderungen werden morphologische Anpassungen wie Sohleneintiefungen, Stauraum- und Hinterlandverlandungen befürchtet, welche für die Hochwassersicherheit zu beachten sind (Habersack et al. 2014b). Das Projekt SED\_AT untersucht anhand von 46 Wildbacheinzugsgebieten Veränderungen des Geschiebehaushaltes. Die Untersuchung zeigt, dass der ökologische Zustand bei mehr als 50 % der untersuchten Gewässer unbefriedigend ist. Das Sedimentdefizit führt meistens zu Sohleneintiefung und Unterspülung von Bauwerken. Diese entstehen hauptsächlich durch Veränderungen des Feststoffhaushalts und der Flussmorphologie durch bauliche Massnahmen. Eine Verbesserung des Sedimentkontinuums könnte das identifizierte Geschiebedefizit vermindern (Habersack et al. 2014c).

Um nicht nur die Auswirkungen, sondern auch das Problem anzugehen, werden heute beispielsweise in Japan, offene und sich selbst entleerende Geschiebesammler konstruiert und getestet, welche lediglich bei Hochwasserereignissen grosse Geschiebemengen zurückhalten sollen. Bei geringer Geschiebeführung sind sie relativ durchlässig (Hasegawa et al. 2004). Anhand dieser Technik wird beabsichtigt, die Beeinträchtigung und das Geschiebedefizit im Unterlauf zu begrenzen.

Der Prozess der verstärkten Erosion im Unterlauf aufgrund der Konstruktion von wasserbaulichen Massnahmen ist auch in der Schweiz bekannt. Ein ähnliches Projekt wie in Österreich zur Erfassung des Ist-Zustandes der geomorphologischen Veränderungen wird in den Wildbächen der Schweiz nicht durchgeführt. Zudem wird weder im Ausland noch in der Schweiz vergleichend untersucht, wie sich der Geschieberückhalt und die -entnahme an Geschiebesammlern auf den Unterlauf auswirken.

Die identifizierte Forschungslücke ist somit eine Abschätzung der Rückhaltewirkung von Geschiebesammlern sowie der Erfassung des geomorphologischen Zustandes der Unterläufe von Geschiebesammlern. Im Rahmen dieser Arbeit, basierend auf der Datengrundlage der Datenbank Solid, wird eine Methode zur Abschätzung der Rückhaltewirkung an unterschiedlichen Typen von Geschiebesammlern und eine vergleichende Methode zur einheitlichen Beurteilung des Ist-Zustands der Sohlenlage im Unterlauf von Geschiebesammlern entwickelt.

Das Ziel der Studie ist das Aufzeigen des Zusammenhangs zwischen der Rückhaltewirkung am Geschiebesammler und dem Geschiebedefizit im Unterlauf.

## 1.2 Hypothesen und Forschungsfragen

Im Rahmen der Arbeit werden zwei Hypothesen (H) mit untergeordneten Forschungsfragen (FF) aufgestellt. Sie basieren auf der Annahme, dass Geschiebesammler die geomorphologischen Prozesse und Formen gerinneabwärts beeinflussen.

### Hypothese 1

**Aufgrund des Baus und des regelmässigen Unterhalts von Geschiebesammlern dominieren im gesamten Unterlauf (vom Geschiebesammler bis zur Einmündung in den Vorfluter) geschiebearme Bedingungen.**

- 1a: Wie können im Unterlauf geschiebearme, umlagernde oder ablagernde Bedingungen visuell identifiziert werden und wo treten diese auf?
- 1b: Wie kann die Erosion in verschiedenen Abschnitten des Unterlaufs sowie zwischen verschiedenen Wildbachgerinnen vergleichend erfasst werden?
- 1c: Wie sind allfällige Feststoffablagerungen zu interpretieren?

### Hypothese 2

**Je effizienter die Rückhaltewirkung des Geschiebesammlers ist, desto ausgeprägter ist die Erosion im Unterlauf.**

- 2a: Wie kann die Rückhaltewirkung der verschiedenen Typen von Geschiebesammlern erfasst werden?
- 2b: Wie kann die Erosion im Unterlauf einheitlich und vergleichend quantifiziert werden?
- 2c: Welche charakteristischen Anpassungen der geomorphologischen Formen wie Tiefenerosion, Ufererosion oder Kolkbildung etc. können im Unterlauf quantifiziert werden?

## 2. Daten

Für die Arbeit werden bereits bestehende Datengrundlagen wie die Datenbank Solid und Projektdaten zu den jeweiligen Geschiebesammlern und Unterläufen verwendet. Informationen zum Ist-Zustand der Unterläufe werden anhand von Luft- und Satellitenbildern, topographischen Karten und Höhenmodellen erhoben. Die verwendeten Datengrundlagen werden im Folgenden erläutert.

### 2.1 Datenbank Solid

Die Datenbank Solid (Grasso et al. 2010) vom Bundesamt für Umwelt beinhaltet Daten von 108 Geschiebesammlern (Stand Januar 2015) in Schweizer Wildbächen (s. Abbildung 9). Die Daten werden von den Kantonen und der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) erfasst und an das BAFU geliefert. Aufgezeichnet werden die jährlichen Entnahmehöhen an Geschiebesammlern. Die DB Solid dokumentiert zurzeit die Feststoffvolumen von 108 Geschiebesammlern; der Beobachtungszeitraum bewegt sich zwischen 5 und 60 Jahren. Diese Feststoffvolumina dienen statistischen Analysen der Feststofflieferung von Wildbacheinzugsgebieten. In der vorliegenden Arbeit werden die Angaben der DB Solid für die Untersuchung des Verhaltens des Gerinnes im Unterlauf des Geschiebesammlers verwendet.

Im Rahmen dieser Arbeit dient die DB Solid der Stichprobenwahl der Geschiebesammler. Die Datengrundlage ermöglicht eine Gegenüberstellung der Bewirtschaftung des Geschiebesammlers bzw. der Rückhaltewirkung mit den geomorphologischen Veränderungen im Unterlauf. Zusätzlich zu den Informationen der Bewirtschaftung sind weitere Informationen wie Ereignisdokumentationen, Einzugsgebietsparameter und des Geschiebesammlers in der DB Solid enthalten. Diese dienen als Informationsgrundlage der Diskussion. Für die vorliegende Arbeit wird der Stand der Entnahmekubaturen der DB Solid vom Januar 2015 verwendet.

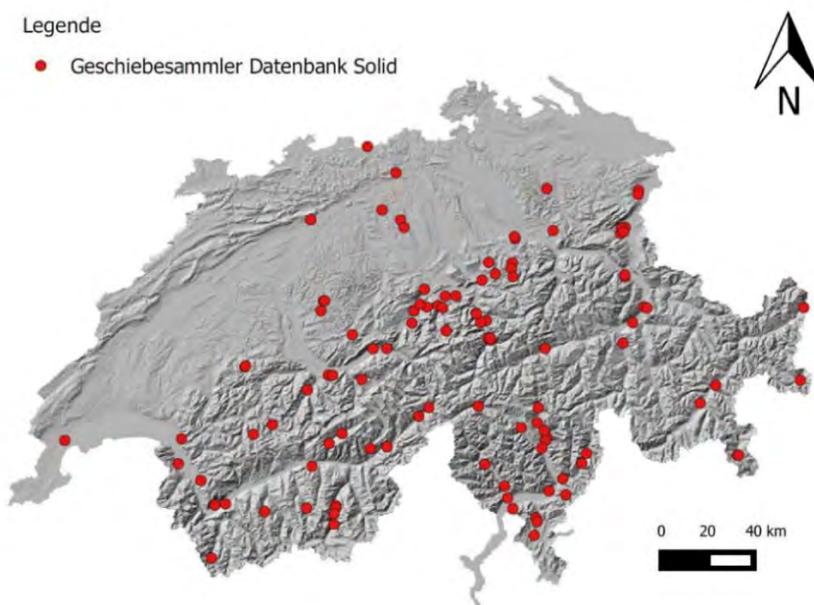


Abbildung 9: Geographische Verteilung der 108 Geschiebesammler der Datenbank Solid (BAFU) in Wildbächen der Schweiz (rote Markierung).

## 2.2 Luft- und Satellitenbilder und topographische Karten

Luftbilder (Swisstopo 2014) und topographische Karten (Swisstopo 2013) vom Geoportal der Bundesverwaltung und Google Earth Bilder (Google Earth 2015a) werden für die visuelle Beurteilung des Gerinnes verwendet. Für die Beurteilung wird jeweils die aktuellste Aufzeichnung verwendet, welche online zugänglich ist. Die topographischen Karten werden im Massstab 1:5000 (LK 5000) beurteilt und die Luftbilder in der grösstmöglichen Auflösung. Das Höhenmodell swissALTI3D (2 m Genauigkeit) vom Bundesamt für Landestopographie (swisstopo) wird für die Standortbestimmung des Geschiebesammlers innerhalb vom Wildbachsystem (Begrenzung Einzugsgebiet und Kegel) verwendet (Swisstopo 2015).

## 2.3 Projektdaten der Geschiebesammler und der Unterläufe

Für die Arbeit sind Projektunterlagen des Absperrbauwerks mit dem Durchlassquerschnitt, Längenprofile der Verbauung im Unterlauf sowie Dimensionierungsangaben zu den wasserbaulichen Massnahmen, wie beispielsweise Sperrenhöhen und Sperrenabstände relevant. Sie ermöglichen anhand von Quer- (QP) und Längenprofilen (LP) die zeitliche Veränderung (nach dem Bau des Geschiebesammlers und Ist-Zustand) der Gerinnesohle darzustellen. Technische Berichte (TB) enthalten zudem Informationen zur Ereignis- und Verbauungsgeschichte sowie dem projektierten Verhalten des Gerinnes. Die Daten werden je nach Verantwortlichkeit über Kantone, Gemeinden oder Schwellenkorporationen angefragt.

### 3. Methoden

Die vorliegende Arbeit ist in drei Stufen gegliedert. Die Stufen stellen den zeitlichen Ablauf, den zunehmenden Detaillierungsgrad des Vorgehens und die Reduktion der Stichprobe dar. Im Kapitel der Methoden wird das Vorgehen der Stufen in das Erfassen der Phänomene und das Bewerten der Indikatoren gegliedert. Die im Rahmen der Arbeit entwickelte Methode zur Beurteilung wird im Kapitel der Resultate erläutert.

Eine Übersicht des methodischen Vorgehens ist in der Abbildung 10 aufgeführt. Anschliessend wird das Vorgehen der Auswahlkriterien und der drei Stufen detailliert erläutert.

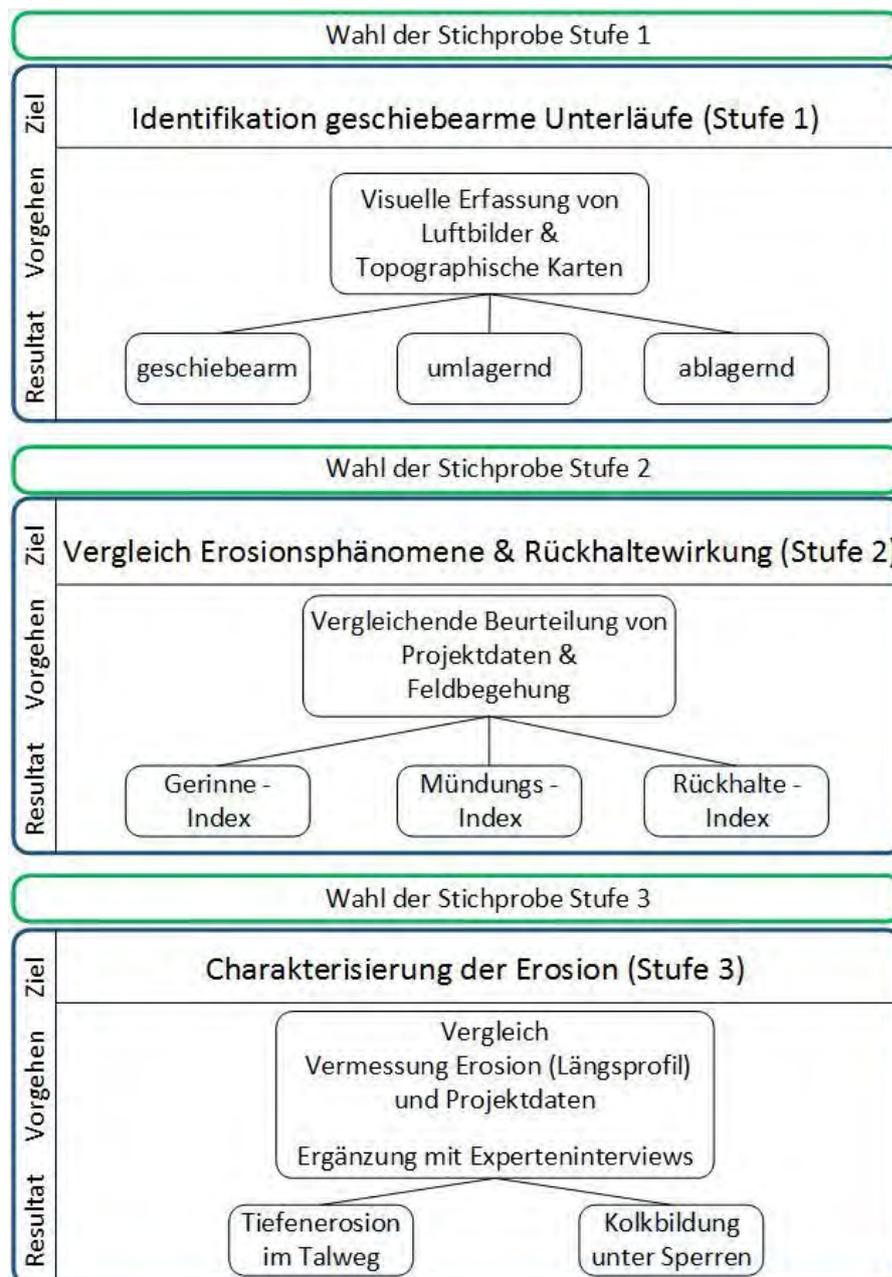


Abbildung 10: Übersicht des dreistufigen Vorgehens der Beurteilung der Erosion im Unterlauf und der Rückhaltewirkung von Geschiebesammlern. Blau: Stufe, Grün: Auswahlkriterien.

Die Geschiebesammler der DB Solid weisen Unterschiede in der Funktionsweise der Rückhaltebauwerke auf, da die Öffnungen der Durchlässe eine unterschiedliche Form, Grösse und Anzahl haben können. Zudem variiert die Qualität der Messperiode (Länge der Messperiode und Regelmässigkeit der Entnahme) zwischen den Sammlern. Um die Rückhaltewirkung der Geschiebesammler und die Erosion im Unterlauf zu vergleichen, wird für jede Stufe eine Auswahl von geeigneten Unterläufen durchgeführt (s. Kapitel 1.3.1).

Die Stufe 1 dient der Identifikation von geschiebearmen Bedingungen im Unterlauf anhand von Luft- und Satellitenbildern und topographischen Karten. Das Resultat ist eine Kategorisierung der geomorphologischen Bedingungen der Unterläufe (s. Kapitel 3.2.1 und 3.2.2).

In Stufe 2 wird die Ausprägung der Erosion im Unterlauf im Vergleich zu der Rückhaltewirkung beurteilt. Hierzu werden Projektdaten analysiert und im Gelände eine geomorphologische Kartierung des Ist-Zustandes des Gerinnes erfasst (s. Kapitel 3.3.1 und 3.3.2).

In der Stufe 3 wird die Erosion im Gerinne vermessen, mit Archivdaten verglichen und mit Einschätzungen aus Experteninterviews ergänzt (s. Kapitel 3.4.1, 3.4.2).

Der Begriff Unterlauf wird in dieser Arbeit nicht gemäss der ursprünglichen Definition von dem Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWG 2003) verwendet. Der verwendete Begriff umschreibt den Abschnitt direkt unterhalb des Geschiebesammlers bis zum Vorfluter (s. Abbildung 11).

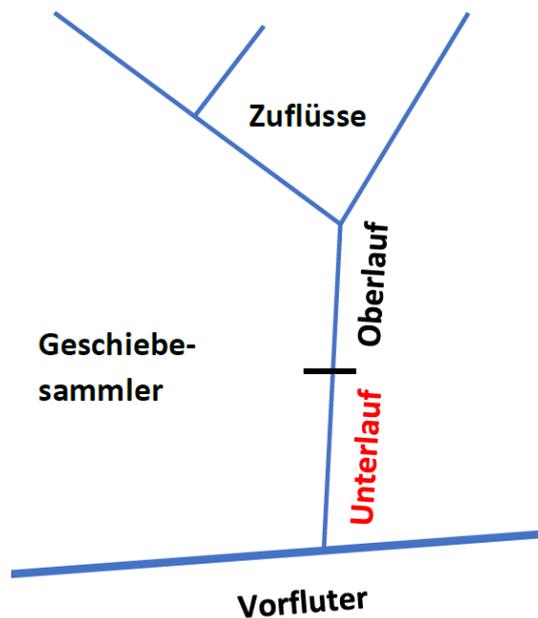


Abbildung 11: Schematische Darstellung des verwendeten Begriffs Unterlauf, Blau = Flusslauf, Schwarz = Geschiebesammler.

### 3.1 Kriterien zur Auswahl geeigneter Unterläufe

Die 108 Geschiebesammler der DB Solid weisen Unterschiede bezüglich der Struktur des Absperrbauwerks und der Datenqualität der Geschiebesammler auf. Um die unterschiedlichen Wildbäche miteinander zu vergleichen und um eine gute Qualität der Aussage zu ermöglichen, werden für jede Stufe geeignete Wildbäche anhand von Auswahlkriterien selektiert (s. Abbildung 12). Erfüllt ein Wildbach ein Kriterium nicht, ist eine Selektion für die nachfolgende Stufe nicht möglich.

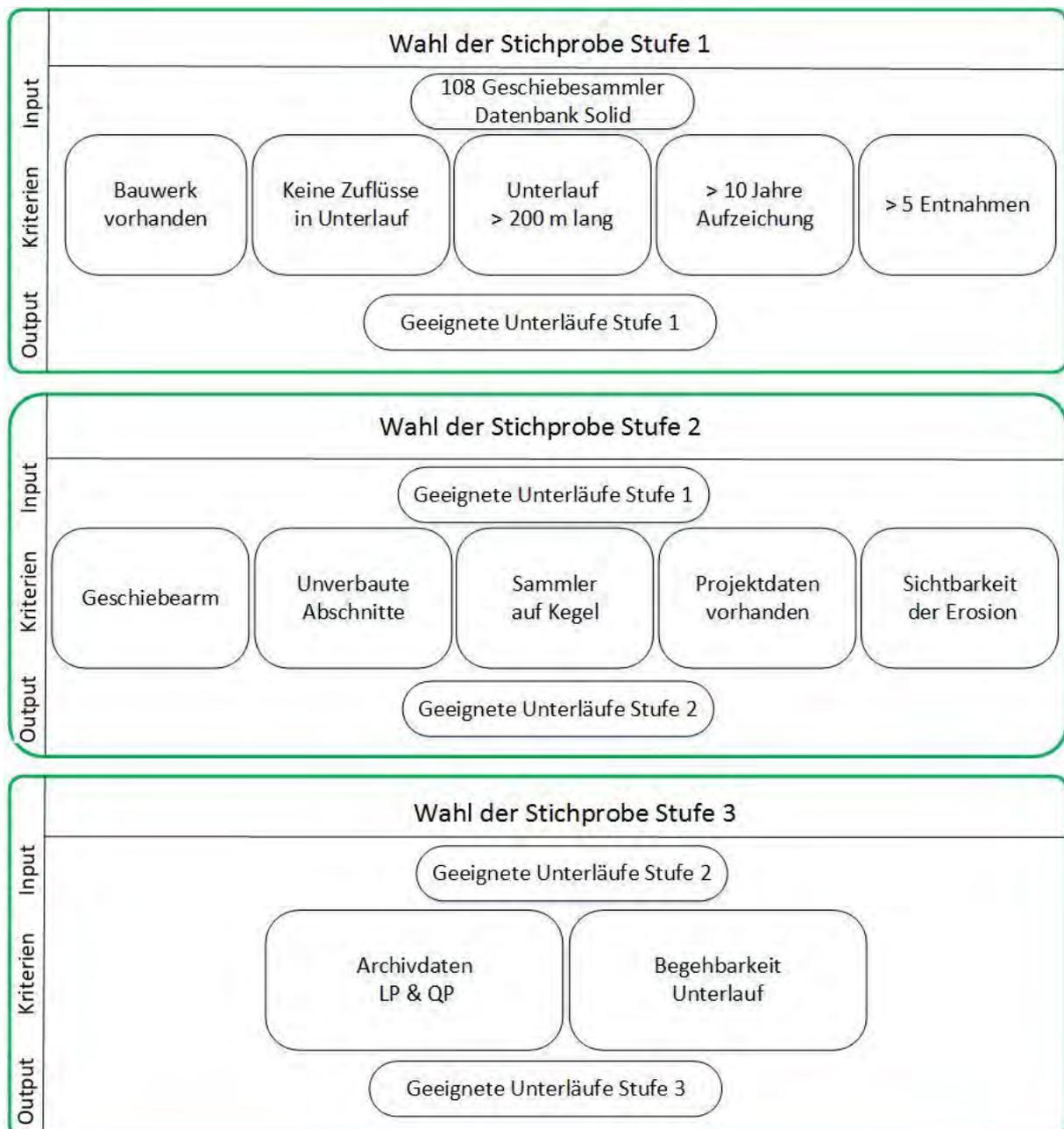


Abbildung 12: Auswahlkriterien pro Stufe für eine geeignete Stichprobe.

Im Folgenden werden die Auswahlkriterien der jeweiligen Stufen erläutert:

### **Auswahlkriterien Stufe 1**

- 1) Bauwerk vorhanden  
Das Absperrbauwerk ist für die Untersuchung notwendig, um die geomorphologischen Erosions- und Ablagerungsphänomene im Unterlauf im Zusammenhang mit der Rückhaltewirkung zu beurteilen. In der DB Solid sind auch Geschiebeablagerungsplätze aufgeführt, welche kein Absperrbauwerk aufweisen.
- 2) Keine Zuflüsse in den Unterlauf  
Zuflüsse mit ausgeprägter Feststoffzufuhr verhindern die Beurteilung der Erosions- und Ablagerungsphänomene im Unterlauf in Zusammenhang mit dem Geschiebesammler.
- 3) Minimale Länge des Unterlaufs von 200 m  
Die Auswirkungen der Erosionsphänomene werden über eine Strecke von mind. 200 m untersucht, damit das zufällige Auftreten eines Phänomens ausgeschlossen werden kann.
- 4) Messperiode von mindestens 10 Jahren  
Damit sich allfällige geomorphologische Veränderungen durch den Bau des Geschiebesammlers entwickeln können, wird eine minimale Messperiode von 10 Jahren festgelegt.
- 5) Mindestens 5 Geschiebeentnahmen  
Durch mind. 5 Entnahmen kann davon ausgegangen werden, dass mehrere Hochwasserereignisse seit dem Bau des Sammlers aufgetreten sind und sich Erosionsphänomene im Unterlauf bilden konnten.

### **Auswahlkriterien Stufe 2**

- 1) Geschiebearm kategorisierte Unterläufe (Stufe 1)  
Die Kategorie geschiebearm in Stufe 1 ist für eine Selektion notwendig, da der Fokus auf eine allfällige Erosion im Unterlauf gelegt wird (s. H2).
- 2) Weniger stark oder nicht verbaute Abschnitte sind vorhanden  
Erosionsphänomene sind in weniger stark verbauten Abschnitten mit Blockrampen / Sperrtreppen oder in nicht verbauten Abschnitten am stärksten ausgeprägt. Durch eine starke Verbauung (befestigte Böschungen mit Sperrtreppen und Schalen) wird die Wirkung der Erosion stark eingeschränkt. Deshalb sind Abschnitte mit einer natürlichen Gerinnesohle notwendig.
- 3) Standort des Geschiebesammlers am Kegelhals oder auf dem Schwemmkegel  
Es werden einzig Geschiebesammler untersucht, welche am Kegelhals oder auf dem Schwemmkegel des Wildbaches liegen, da im unverbauten Wildbach ablagernde Bedingungen auf dem Schwemmkegel erwartet werden. Für die Bestimmung des Standorts des Geschiebesammlers werden die Koordinaten des Sammlers aus der DB Solid, Höhenmodelle (swissALTI3D) sowie topographische Karten verwendet. Die Abgrenzung des Kegels erfolgt visuell basierend auf dem Höhenmodell und den Höhenkurven.

- 4) Verfügbarkeit von Projektdaten  
Technische Berichte zum Bau des Geschiebesammlers und des Unterlaufs sind für die Rekonstruktion der Verbauungsgeschichte und Informationen zur aktuellen Dimensionierung der Verbauung im Unterlauf notwendig. Die Anfrage für Projektdaten erfolgt über die verantwortliche Person des Kantons (s. Anhang A)
- 5) Zugänglichkeit und Sichtbarkeit des Unterlaufs  
Die Böschung und das Gerinne sind begehbar und identifizierbar (kein Verbergen durch Vegetation).

### **Auswahlkriterien Stufe 3**

In der Stufe 3 werden lediglich einzelne Abschnitte mit Sperrentreppen oder unverbauten Abschnitten analysiert. Abschnitte mit verbauter Gerinnesohle (Raubettgerinne oder Schale) werden von der Untersuchung ausgeschlossen, da anhand der Verbauung keine Veränderung der Sohlenlage festgestellt werden kann. Somit müssen die Kriterien der Stufe 3 lediglich für die unverbauten Abschnitte erfüllt sein.

- 1) Verfügbarkeit von Archivdaten des Unterlaufes (QP und LP)  
Bei Kantonen, Gemeinden, Schwellenkorporationen oder Ingenieurbüros ist die Einsicht von Profildaten (LP zwingend) des ausgewählten Unterlaufs möglich. Bedingungen an das Längenprofil sind, dass die Aufnahme nach dem Bau des Geschiebesammlers erfolgte und die aufgeführte Verbauung dem Ist-Zustand entspricht.
- 2) Durchführbarkeit von Feldmessungen  
Ein grosses Böschung Gefälle und stark ausgeprägte Kolke (Abflusshöhe > 1m) schränken die Begehbarkeit des Unterlaufs mit dem Messgerät ein.

Für einen Vergleich ist die Auswahl von geeigneten Unterläufen aufgrund der ausgeprägten Unterschiede der Funktion der Geschiebesammler und Datenqualität der Messperiode notwendig, führt jedoch gleichzeitig zu einer kleineren Stichprobe und somit zu einer geringeren Repräsentativität. Die Resultate sind deshalb nicht für die Gesamtheit der Geschiebesammler der DB Solid repräsentativ.

Der Chalberhöribach in Saanen (Kanton BE) ist in der DB Solid nicht aufgeführt. Im Rahmen der Arbeit wird er als aktuelles Beispiel ergänzt.

## 3.2 Identifikation geschiebearmer Bedingungen im Unterlauf (Stufe 1)

Die Beurteilung der Stufe 1 ermöglicht eine Übersicht der geomorphologischen Bedingungen im Unterlauf. Das Ziel der Beurteilung ist die Identifikation von visuell erkennbaren Erosionsphänomenen im Unterlauf. Diese erste Selektion von geeigneten Unterläufen ist für die nachfolgende Beurteilung der Erosion notwendig.

Die Annahme von vermehrt erosiven Bedingungen auf dem Schwemmkegel wird anhand der visuellen Beurteilung geprüft (FF 1a).

### 3.2.1 Erfassung des geomorphologischen Zustandes im Unterlauf

Luftbilder und topographische Karten vom Geoportal der Bundesverwaltung und Satellitenbilder von Google Earth werden für die Beurteilung des Unterlaufs verwendet. Das Erfassen der Gerinnemorphologie basiert auf visuell identifizierbaren Erosions- und Ablagerungsphänomenen, welche aus der Senkrecht- und Schrägaufnahme der Erdoberfläche sichtbar sind.

Die Auflösung der Luftbilder von swisstopo liegt in Abhängigkeit der Komplexität der Topographie zwischen 0.25 und 2.5 m (Swisstopo 2014) und die Auflösung der Satellitenaufnahmen der Google Earth Bilder zwischen 0.15 und 1 m (Google Earth 2015b). Für die Beurteilung werden jeweils die aktuellsten, öffentlich zugänglichen Bilder verwendet (swisstopo zwischen 2012 und 2014, Google Earth mehrheitlich 2009).

Ein Grossteil der Phänomene kann durch Luft- und Satellitenbilder beurteilt werden. Topographische Karten dienen hauptsächlich der Identifikation von Sperrentreppen und zeigen Ablagerungen sowie Anbruchsflächen. Die Kombination von unterschiedlichen Geodaten ermöglicht eine breit abgestützte Erfassung. Obwohl die visuelle Beurteilung lediglich eine Abschätzung der Gerinnemorphologie ist, weist sie den Vorteil auf, dass geeignete Wildbäche selektiert werden können, bevor zeitaufwändige Feldbegehungen durchgeführt werden. Der Nachteil ist die Darstellung der Phänomene in den Gerinnen anhand von Aufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Bei markanten Unterschieden der geomorphologischen Bedingungen wird die aktuellere Aufzeichnung berücksichtigt, um den Ist-Zustand zu beurteilen. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Aufnahmen lediglich eine Momentaufnahme darstellen, welche von den vorherrschenden Umweltbedingungen abhängig ist.

### 3.2.2 Bewertung des geomorphologischen Zustandes im Unterlauf

In der Tabelle 1 sind die Erosions- und Ablagerungsphänomene aufgeführt, welche für die Kategorisierung verwendet werden. Die Phänomene werden pro Unterlauf erfasst. Die visuelle Identifikation der Phänomene wird als Indikator für geomorphologische Bedingungen verwendet.

<b>Erosions- und Ablagerungsphänomene</b>	<b>Kategorie</b>
Uferanbrüche	geschiebearm
Kein Kegel im Vorfluter	
Grosse, leere Kolke unterhalb von Sperren Koklänge bis zur nächsten Sperre Starke Verbauung (Sperrenabstand < 20 m)	
Kies- und Sandbänke	ablagernd
Viel abgelagertes Material im Gerinne (relativ ebene Sohle) Abgestufte Ablagerungen mit grossen Blöcken	
Kies auf verbauter Sohle sichtbar	
Kegel im Vorfluter	umlagernd
Eindeutige Identifikation von kleinräumig abwechselnden geschiebearmen und ablagernden Bedingungen	

Tabelle 1: Visuell identifizierbare Phänomene für geschiebearme, ablagernde oder umlagernde Bedingungen im Unterlauf.

### 3.3 Beurteilung der Erosion und der Rückhaltewirkung (Stufe 2)

In der Stufe 2 werden unterschiedliche Ausprägungen der Erosionsphänomene im Unterlauf, geschiebearme Verhältnisse an der Mündung und die Rückhaltewirkung des Absperrbauwerkes einheitlich beurteilt und verglichen.

Diese Beurteilung wird in der vorliegenden Arbeit in Methoden und Resultate unterteilt (s. Tabelle 2). Im methodischen Teil werden Phänomene erfasst und anhand von Indikatoren mit Hinweisen der Erosion im Unterlauf, geschiebearmen Verhältnissen bzw. Rückhaltewirkung bewertet. Im Kapitel der Resultate wird die Beurteilung der Faktoren durch die entwickelte Indexierung erläutert und angewendet.

Die Beurteilung der Auswirkung des Geschieberückhalts erfolgt im Unterlauf und an der Mündung. Die separate Beurteilung weist den Vorteil auf, geschiebearme Bedingungen anhand von unterschiedlichen Indikatoren zu erfassen und zu vergleichen. Die Beurteilung der Rückhaltewirkung wird durch einen Index dargestellt.

	Methoden		Resultate
	Erfasste Phänomene	Bewertete Indikatoren	Beurteilung Faktoren
Erosion im Gerinne	Erosions- und Ablagerungsphänomene	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erodierte Deckschicht</li> <li>- Tiefenerosion</li> <li>- Böschungserosion</li> <li>- Kolke</li> </ul>	Gerinne-Index
Verhältnis an der Mündung	Kegel- bzw. Kolkbildung im Vorfluter	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kolkbildung</li> <li>- Keine Ablagerung</li> <li>- Kegel mit erodierten Feststoffen des Unterlaufs</li> </ul>	Mündungs-Index
Rückhaltewirkung	Absperrbauwerk	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kleines Mass des Durchlasses</li> </ul>	Rückhalte-Index

Tabelle 2: Vorgehen der Beurteilung der Erosion im Gerinne und an der Mündung, sowie der Rückhaltewirkung des Geschiebesammlers der Stufe 2.

In einem ersten Schritt werden Erosionsphänomene des Ist-Zustandes im Unterlauf im Gelände vermessen, die Verhältnisse an der Mündung beurteilt und dadurch eine Information der Ausprägung generiert (FF 1b). Durch die Zuteilung des Mobilisierungsortes wird festgelegt, wie allfällige Ablagerungen zu interpretieren sind (FF 1c). Die Erfassung der Rückhaltewirkung von unterschiedlichen Geschiebesammlern zeigt den Zusammenhang zwischen der Erosion und der Rückhaltewirkung (FF 2a).

### 3.3.1 Vergleichende Beurteilung der Erosion und der Rückhaltewirkung

Um eine vergleichende Beurteilung zu ermöglichen, werden drei Indizes erstellt. Je ein Index erfasst die Erosion im Gerinne, die Verhältnisse an der Mündung und die Rückhaltewirkung durch das Absperrbauwerk des Geschiebesammlers. Die vergleichende Beurteilung der Erosion und der Rückhaltewirkung erfolgt an den erfassten Erosions- und Ablagerungsphänomenen und bewerteten Indikatoren (s. Kapitel 3.3.2). Um den Vergleich der unterschiedlichen Wildbäche zu ermöglichen, werden die, gemäss der Literatur, als relevant erachteten Faktoren normiert. Zudem werden Korrekturfaktoren ergänzt, insofern ein weiteres Phänomen die Wirkung der Erosion oder Rückhaltewirkung beeinflusst.

Die Beurteilung wird für alle Wildbäche einheitlich und vergleichend erstellt. Sie soll Aussagen über die Grösse und Häufigkeit des Auftretens von Erosionsphänomenen im Unterlauf und den Verhältnissen an der Mündung im Zusammenhang mit der Rückhaltewirkung ermöglichen.

### 3.3.2 Erfassung und Bewertung der Erosion und der Rückhaltewirkung

Die aktuelle Ausprägung der Erosionsphänomene wird an den selektierten Unterläufen mittels Felderhebung beurteilt. Die Beurteilung im Feld weist im Vergleich zur visuellen Identifikation der Stufe 1 Vorteile bezüglich der Erkennung von kleinräumigen und zusätzlichen Erosionsphänomenen auf. Wie auch bei der Beurteilung von Luftaufnahmen ist es ein Nachteil, dass die Beurteilung im Feld eine Momentaufnahme darstellt. Zudem ist die Beurteilung im Gelände im Vergleich zur visuellen Interpretation von Geodaten zeitintensiv.

#### Erosion im Gerinne

Die Erosion im Gerinne wird im gesamten Unterlauf erfasst. Die Bewertung erfolgt an einheitlichen Abschnitten mit unterschiedlichem Verbauungsgrad (A, B, C usw., s. Abbildung 13). Die Verbauung, welche in den Projektdaten aufgeführt ist, wird mit der aktuellen Verbauung im Gelände verglichen. Entsprechen die Projektdaten nicht der aktuellen Verbauung, werden die Unterschiede auf der LK 5000 eingetragen (Anpassung Abschnitte A, B, C etc.). Sohlgurte sowie Beton-, Block- und Holzsperrern werden unabhängig der Gerinneverbauung einzeln kartiert.

Einheitliche Abschnitte  
(mit unterschiedlichem Verbauungsgrad)

- Renaturiert
- Unverbaut
- Teilweise befestigte Böschung
- Befestigte Böschung
- Raubettgerinne
- Schale

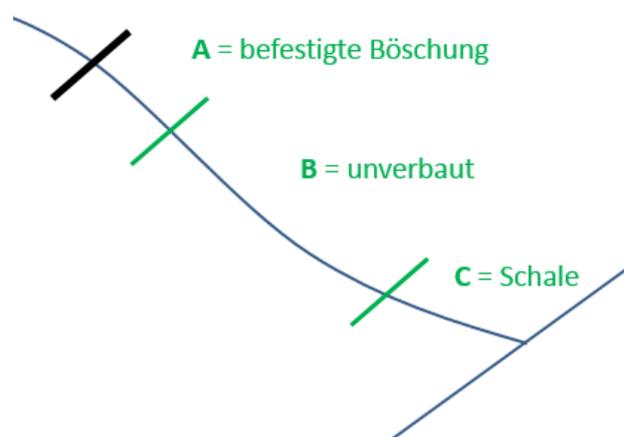


Abbildung 13: Schematische Darstellung der einheitlich verbauten Abschnitte im Unterlauf des Geschiebesammlers. Blau = Fließgewässer, Schwarz = Geschiebesammler, Grün = einheitlich verbauter Abschnitt.

Informationen zur aktuellen Situation des Ist-Zustandes werden durch Geländebegehungen und Informationen zu Sofortmassnahmen aus aktuellen Projektdaten erfasst.

Im Feld werden Erosion- bzw. Ablagerungsphänomene bezüglich ihrer Ausprägung vermessen, kartiert (LK 5000) und fotografiert. Hierzu wird das gesamte Gerinne des Unterlaufs erfasst und mit Fotos die Erosionsphänomene sowie der Zustand der Verbauung dokumentiert. Der Verbauung wird basierend auf der Abschätzung Funktionsfähigkeit und Stabilität beschrieben.

Die Vermessung der Erosions- und Ablagerungsphänomene erfolgt mit einem Jalon (Messstab) und einem daran befestigten Zollstock. Die Kombination der beiden Messwerkzeuge hat den Vorteil, dass bei einem hohen Abfluss (bspw. ein tiefer Kolk unterhalb einer Sperre) der Zollstock durch die Fixierung senkrecht stehen bleibt. Durch den Zollstock ist dennoch die Genauigkeit im Dezimeterbereich gewährleistet. Die identifizierten Phänomene werden in der topographischen Karte (1:5000) eingezeichnet und vermessen.

Indikatoren für eine ausgeprägte Erosion sind pro erfasstes Phänomen in der Tabelle 3 aufgeführt. Die erfassten Phänomene werden pro einheitlich verbautem Abschnitt gemittelt. Das detaillierte Vorgehen ist in den Resultaten im Kapitel 4.3.2 aufgeführt.

<b>Erfasste Phänomene</b>	<b>Bewertete Indikatoren geschiebearme Bedingungen</b>
Komponenten der Sohle	Erodierte Deckschicht (Anreicherung Grobkomponenten)
Tiefenerosion	Starke Eintiefung
Böschungserosion	Rutschungen, Unterscheidung Böschung, Unterspülte Uferverbauungen
Kolk bei Querwerken	Ausgeprägte Kolkiefen, Unterspülung der Sperre

Tabelle 3: Im Gelände erfasste Phänomene und bewertete Indikatoren der geschiebearmen Bedingungen im Unterlauf (vom Geschiebesammler bis zur Einmündung in den Vorfluter).

Im Folgenden wird die Beurteilung der vier Phänomene erläutert:

- **Komponenten der Sohle**  
 Unter dem Begriff Komponenten der Sohle werden Ablagerungen im Gerinne verstanden. Bei erodierenden Bedingungen werden feinere Fraktionen wie bspw. Sand mobilisiert und grössere Komponenten wie Kies bilden eine Deckschicht (Strobl und Zunic 2006). Die Ausspülung dieser Feinfraktion ist im Vergleich zur Ablagerung im Geschiebesammler zu beurteilen, da die Verteilung der Korngrösse von den Einzugsgebietsparametern abhängig ist. Abgestufte Korngrössen deuten auf Ablagerungen hin und ausgespülte Feinfraktion auf eine Erosion. Ablagerungen werden in unmittelbarer Nähe einer Erosion nicht als Indikator der Ablagerung interpretiert. Für die Beurteilung wird gesamte Gerinnebreite erfasst und innerhalb des einheitlich verbauten Abschnitts fotografisch dokumentiert, beschrieben und die Position auf der LK 5000 eingezeichnet.
- **Tiefenerosion**  
 Die Tiefenerosion wird anhand von Referenzhöhen wie Terrassen, unterspülte Vegetation etc. vermessen. Somit wird die effektive Eintiefung der Tiefenerosion verwendet. Ausgespülte Blöcke im Raubettgerinne werden zudem als Indikator der Erosion interpretiert. Pro Abschnitt werden mind. fünf Messungen mit dem Jalon durchgeführt und gemittelt.

- Böschungserosion

Die Böschungserosion wird anhand von Anrisspuren oder erodierten Flächen identifiziert. Als Hilfestellung können die in Stufe 1 bereits identifizierten Anrisse auf der topographischen Karte verwendet werden. Das Ausmass der Erosion soll durch das Erosionsvolumen anhand der Erosionsbreite, -länge und -höhe berechnet werden. Hierzu werden drei Parameter im Gelände gemessen (s. Abbildung 14).

Instabilitäten von Längswerken der Böschung wie unterspülte oder erodierte Stabilisierungsmassnahmen werden dokumentiert.



Abbildung 14: Parameter der Böschungserosion.  $E_B$  = Erosionsbreite,  $E_L$  = Erosionslänge,  $E_H$  = Erosionshöhe, Chalberhönibach in Saanen (Aufnahmedatum: 26. Juni 2015).

- Kolke bei Querwerken

Der Kolk unterhalb von Querwerken (Sperrern) wird durch die maximale Kolkentiefe mit dem Jalon und Zollstock vermessen. Hierzu wird die grösste gemessene Kolkentiefe erfasst. Bei eingeschränkter Begehrbarkeit kann die Kolkentiefe auch von der oberen Sperre aus gemessen werden. Die Kolkentiefe entspricht dem gemessenen Wert zwischen der Gerinnesohle und der Wasseroberfläche. Somit ist die Kolkentiefe von der Abflusshöhe des Feldtages abhängig.

Hinweise auf Instabilitäten der Sperrern wie ausgespülte Blöcke bei Blocksperrern oder unterspülte Sperrern durch ausgeprägte Kolke werden dokumentiert. Instabilitäten der Sperre wie freigelegte Armierungen, abgetragene Blöcke einer Blocksperrern, nachträgliche Stabilisierung der Sperre etc. werden dokumentiert.

**Verhältnis an der Mündung**

Die Untersuchung der Verhältnisse an der Mündung erfolgt an der Einmündung des Unterlaufs in den Vorfluter (s. Abbildung 15). Im Vergleich zur Erosion im Gerinne wird einzig das Phänomen der Kolk- bzw. Kegelbildung untersucht (s. Tabelle 4). Der bewertete Indikator der Verhältnisse an der Mündung ist die Bildung eines Kolkes im Vorfluter oder die Ablagerung von Feststoffen, wenn das Material aus dem Unterlauf mobilisiert wurde. Das Vorgehen der Beurteilung ist in Kapitel 4.3.3 aufgeführt.

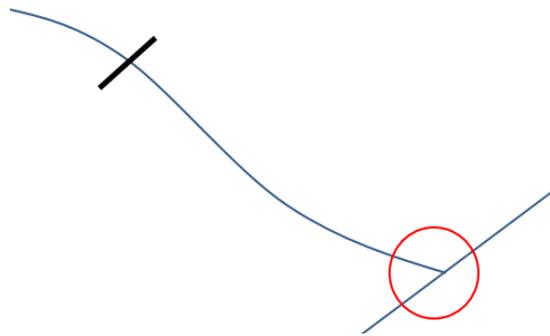


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Mündung des Unterlaufs in den Vorfluter. Rot = Mündung, Blau = Fließgewässer, Schwarz = Geschiebesammler.

Erfasstes Phänomen	Bewertete Indikatoren der Verhältnisse an der Mündung
Kolk- bzw. Kegelbildung im Vorfluter	Kolkbildung
	Kegelbildung aus erodierten Feststoffen des Unterlaufs

Tabelle 4: Im Gelände erfasstes Phänomen und bewerteter Indikator der Verhältnisse an der Mündung.

Das folgende Phänomen wird hierzu im Gelände beurteilt:

- Kolk- bzw. Kegelbildung im Vorfluter

Es wird angenommen, dass geschiebearme Bedingungen im Unterlauf zu einer Kolkbildung im Vorfluter führen und im Gegensatz dazu regelmässiger Geschiebetransport zu einer Kegelbildung durch Feststoffablagerungen. Somit ist die Kolkbildung und die Kegelbildung prinzipiell ein Indikator der Erosion. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass Ablagerungen in Form eines Kegels nur ein Indikator der Ablagerung sind, wenn die Feststoffe im Einzugsgebiet mobilisiert wurden und durch den Geschiebesammler transportiert wurden. Ist das Material der Kegelablagerung aus dem Unterlauf mobilisiert, ist dies ein Hinweis auf ein Geschiebedefizit.

Die Form der allfälligen Ablagerung wird visuell identifiziert und in den Feldnotizen festgehalten. Zur Grösse des Kolkes bzw. Kegels wird keine Angabe gemacht, da sie abhängig von nicht normierten Einzugsgebietsparametern ist.

Der Vorteil der Beurteilung der Kolk- bzw. Kegelbildung ist, dass die Form im Vorfluter eindeutig identifiziert werden kann. Ein Nachteil ist, dass lediglich der aktuelle Zustand beurteilt werden kann, welcher von den Ereignissen des Einzugsgebiets und dem Vorfluter beeinflusst wird.

## Rückhaltewirkung

Die Rückhaltewirkung von Geschiebesammlern ist von diversen Faktoren abhängig. Gemäss Bergmeister et al. (2009) ist vor allem die Form und die Grösse des Durchlasses ein wichtiges Kriterium. Die Beurteilung basiert auf Informationen von Projektdaten (Dimensionierung des Sammlers, Form des Absperrbauwerkes etc.) und Abschätzungen aus dem Gelände.

Um unterschiedliche Geschiebesammler miteinander zu vergleichen, wird die Rückhaltewirkung durch die als relevant erachteten Phänomene (s. Tabelle 5) vereinfacht. Der Nachteil der Vereinfachung ist, dass weitere Faktoren wie die Form und Neigung des Ablagerungsraums, der Schwemmholzanteil, die Dimensionierung des Geschiebesammlers etc. nicht beurteilt werden. Die detaillierte Beurteilung ist in Kapitel 4.3.4 aufgeführt.

Erfasste Phänomene	Bewertete Indikatoren der Rückhaltewirkung
Form der Öffnung	Kleines Mass des Durchlasses
Korngrösse im Ablagerungsraum	Durchmesser der grössten Ablagerungen (d90)
Orientierung der Öffnung	Horizontale Orientierung des Durchlasses

Tabelle 5: Im Gelände erfasste Phänomene und bewertete Indikatoren der Rückhaltewirkung des Geschiebesammlers.

Die folgenden Phänomene werden hierzu im Gelände beurteilt:

- **Kleinstes Mass des Durchlasses auf der Gerinnesohle**  
Die Rückhaltewirkung wird durch die Form der Öffnungen des Absperrbauwerkes beurteilt. Hierbei wird nicht die Fläche, sondern die Form der Öffnung erfasst, da diese für die Beurteilung der Rückhaltewirkung relevant ist. Die Öffnung wird anhand der kleinsten Höhe oder Breite (sog. kleinstes Mass) des Durchlasses auf der Höhe der Gerinnesohle beurteilt. Das kleinste Mass wird grundsätzlich aus den Plänen des Absperrbauwerkes entnommen. Im Falle eines veränderten Absperrbauwerkes werden die Öffnungen im Gelände neu vermessen. Der Entlastungsquerschnitt wird nicht beurteilt, da angenommen wird, dass die Dimensionierung des Geschiebesammlers auch für grössere Ereignisse ausreichend ist.  
Beim Beispiel vom Geschiebesammler am Spissibach in Leissigen entspricht das kleinste Mass 0.5 m (s. Abbildung 16).



Abbildung 16: Bezeichnung des kleinsten Masses des Durchlasses. Geschiebesammler am Fritzenbach in Leissigen. Durchlass: Breite = 1 m, Höhe = 0.5 m. (Aufnahmedatum: 24. April 2015).

- Abschätzung der Korngrösse ( $d_{90}$ ) im Ablagerungsraum des Geschiebesammlers  
Durch die Abschätzung der Korngrösse im Geschiebesammler wird der Aspekt der Verschliessung der Öffnung durch Feststoffe erfasst. Je grösser die Korngrösse ist, desto wahrscheinlicher ist eine Versperrung der Öffnung. Somit sind die grössten Komponenten für die Abschätzung der Öffnung des Durchlasses ausschlaggebend. Die Korngrösse wird im Gelände im Ablagerungsraum des Geschiebesammlers abgeschätzt. Die Abschätzung basiert auf der Annahme, dass die grössten Komponenten ( $d_{100}$ ) durch Überprägung im Ablagerungsraum nicht sichtbar sind. Basierend auf dieser Annahme entspricht die visuell identifizierte grösste Komponente dem  $d_{90}$ . Dadurch wird nicht ausgeschlossen, dass grössere Komponenten bis zum Geschiebesammler mobilisierbar sind. Der grösste Durchmesser der identifizierten Blöcke wird vermessen.
- Orientierung des Durchlasses  
Eine vertikale Orientierung der Öffnung entspricht einer klassischen Schlitzsperre (s. Abbildung 17). In der Abbildung 18 ist eine horizontale Öffnung dargestellt. Im Ereignisfall werden durch die vertikale Orientierung mehr Feststoffe als durch die horizontal orientierten Öffnungen transportiert. Dadurch wird die Effizienz der Rückhaltewirkung vermindert.



Abbildung 17: Bezeichnung der vertikalen Orientierung der Öffnung. Schlitzsperre am Melbach in Kerns. Rote Markierung = vertikale Orientierung des Durchlasses.



Abbildung 18: Bezeichnung der horizontalen Orientierung der Öffnung. Geschiebesammler am Kummetbach in Attinghausen. Rote Markierung = horizontale Orientierung des Durchlasses.

### 3.4 Semi-quantitative Erfassung der Erosion im Unterlauf (Stufe 3)

Die Erosionsphänomene des aktuellen Zustandes der Sohlenlage werden semi-quantitativ anhand von Vermessungen der Gerinneprofilen und Experteninterviews beurteilt. Die Erosion wird im Unterlauf einheitlich vermessen (FF 2b) und aufgrund von charakteristischen geomorphologischen Formen bestimmt (FF 2c).

#### 3.4.1 Vermessung der Erosion im Gerinne

Die Tiefenerosion wird erfasst, da die Sohlenlage ein direkter Indikator für ablagernde, bzw. erodierende Bedingungen ist. Der Mehrwert zur Beurteilung der Tiefenerosion in der Stufe 2 (s. Kapitel 3.3.1) ist, dass die Tiefenerosion nicht relativ zur Referenzhöhe gemessen wird, sondern die absolute Sohlenlage erfasst wird. Zudem kann der vermessene Ist-Zustand mit Archivdaten verglichen werden.

Die Beurteilung von einzelnen unverbauten Abschnitten anstelle des gesamten Unterlaufs hat den Vorteil, dass eine starke Ausprägung der Erosion zu erwarten ist. Nachteilig ist, dass die Stichprobe und auch die Genauigkeit der Aussage von der Qualität der Archivdaten abhängig sind.

#### **Vorbereitende Bearbeitung** *preprocessing*

Die Sohlenlage des aktuellen Zustandes wird durch Vermessungen des Gerinnes im Frühjahr 2015 erhoben. Mit dem verwendeten differentiellen Global Positioning System (dGPS) von Trimble (Geo7X) kann eine horizontale und vertikale Genauigkeit des Messpunktes von bis zu 2 cm erreicht werden. Die dGPS Messung kann zudem im Vergleich zu digitalen Höhenmodellen wie bspw. das swissalti3D die Position der Sohle unter der Wasseroberfläche aufnehmen. Ein letzter wesentlicher Vorteil im Vergleich zu automatisierten Messungen ist, dass die Standorte der Messpunkte im Gelände gewählt werden können. Dadurch werden die tiefsten Punkte erfasst.

Im Folgenden wird auf die vorgenommenen Voreinstellungen des Gerätes und Punkte, welche vor jeder Messung zu überprüfen sind.

Voreinstellungen am dGPS:

- Für jeden Wildbach bzw. Unterlauf wird eine neue Datei eröffnet
- Der Dateityp *Rover* wird gewählt
- Die Antennenhöhe beträgt 2 m. Der Messpunkt wird auf das untere Ende der Antenne am Boden berechnet.
- Für die Vermessung wird die Standardvorlage *Point\_generic* verwendet, welche pro Messpunkt mind. 5 Messungen aufzeichnet und mittelt.

Zu überprüfende Punkte:

- Verbindung mit dem Global Navigation Satellite System (GNSS) vorhanden
- Echtzeit-Korrektur aktiviert
- Horizontale und vertikale Genauigkeit innerhalb 0.02 und 0.2 m

Unzureichender Empfang (Genauigkeit > 0.2 m) kann durch schlechte Satellitenverbindung (Laubblätter, Brücken, Schluchten etc.) entstehen. Bei schlechtem Empfang wird max. 5 Minuten für ein besseres Satellitensignal abgewartet. Verbessert sich der Satellitenempfang nicht, wird der Punkt dennoch aufgenommen, jedoch nicht ausgewertet. Jede dGPS Messung wird fortlaufend nummeriert und mit Kommentaren zu den jeweiligen Standorten (wie bspw. Geschiebesammler, Brücken, Kolk etc.) ergänzt. Dies erleichtert die Überprüfung der Koordinaten und die nachfolgende Datenaufbereitung.

### **Vermessung: Tiefenerosion in unverbauten Abschnitten**

In unverbauten Abschnitten wird der Talweg gemessen. Dies ist die Verbindungslinie der tiefsten Punkte eines Fließgewässers im Unterlauf (BWG 2003). Werden im Gelände markante Gefälls- und Richtungsänderungen (wie bspw. Kurven im Flusslauf, natürliche Überfälle etc.) visuell identifiziert, werden Messpunkte aufgenommen. Somit sind die Abstände der Messpunkte nicht regelmässig, sondern variieren in Abhängigkeit der Komplexität der Topographie. Der maximale Abstand der Messpunkte wird auf 20 m festgelegt.

Der Vorteil der Aufnahme von unregelmässigen Abständen ist, dass bei Abschnitten mit einer stark ausgeprägten Erosion mehr Messpunkte aufgenommen werden können und zudem der tiefste Punkt visuell identifiziert und gemessen werden kann.

Es ist zu beachten, dass pro einheitlich verbautem Abschnitt mindestens zehn Messpunkte aufgenommen werden, um die Repräsentativität zu gewährleisten.

### **Vermessung: Kolkgrösse unterhalb von Querwerken**

In Abschnitten mit Sperrentreppen wird die Grösse der Kolke unmittelbar unterhalb der Sperre vermessen (s. Abbildung 19).

Gemessen wird je ein Messpunkt:

- der oberen und unteren Sperrenkrone
- des tiefsten Punktes im Kolken
- des Beginns des Kolks (Gefällsknick)

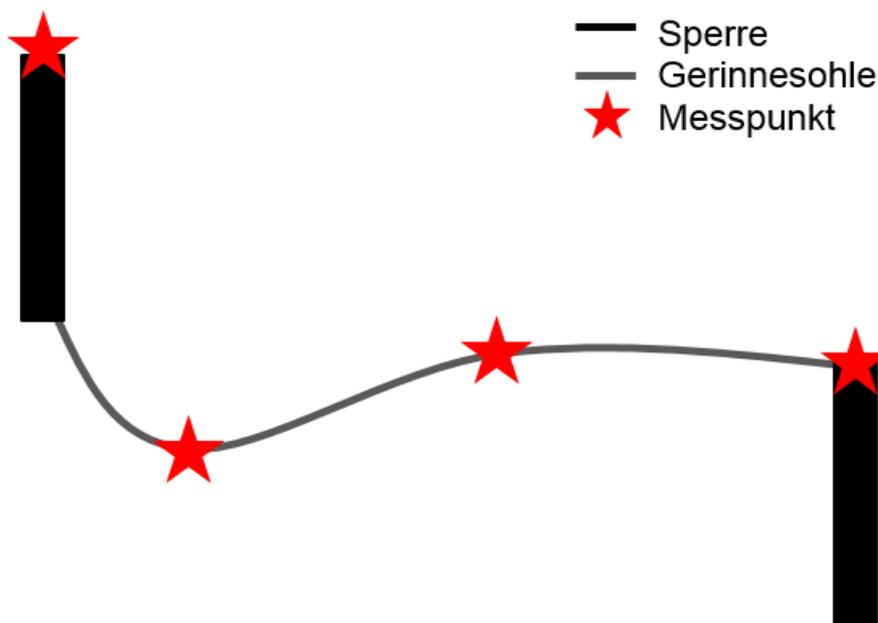


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Messpunkte der dGPS Vermessung in Abschnitten mit Sperren.

Sind die Abschnitte aufgrund des Empfangs, des Böschungsgefälles, der Höhe der Querwerke oder des Wasserstandes nicht vermessbar, wird die Kolktiefe mit dem Jalon von der oberen Sperre aus erhoben (s. Kapitel 3.3.2). Die Kolkbreite wird anhand der mittleren, benetzten Breite vermessen. Die Berechnung des Kolkvolumen basiert auf der Kolkbreite (benetzter Querschnitt), der mittleren Kolklänge (flussabwärts) und der Kolktiefe.

### **Datenaufbereitung**

Für die Datenaufbereitung werden die dGPS Messpunkte anhand der Software GPS Pathfinder in ein *shapfile* konvertiert. Beim Export werden Messungen mit einem Genauigkeitsintervall innerhalb von 0–0.2 m (X, Y, Z Koordinate) gefiltert. Eine nachträgliche Korrektur der Daten ist aufgrund der Echtzeit-Korrektur des GPS nicht notwendig. Die Überarbeitung der Daten erfolgt einzig insofern, dass die mit dem Jalon gemessenen Kolkiefen im GIS konstruiert werden.

Bei der Datenaufbereitung der Längenprofile (dGPS Messung und Archivdaten) wird darauf geachtet, dass jeder einheitlich verbaute Abschnitt durch mindestens zehn Punkte (mit guter Datenqualität) repräsentiert ist. Bei Profilen mit weniger Messpunkten wird der Vergleich aufgrund von zu grossen Unsicherheiten bezüglich der effektiven Position der Sohlenlage nicht durchgeführt.

### **Experteninterview**

Zur Ergänzung und Plausibilisierung der Vermessung werden Leitfadeninterviews mit unterschiedlichen Personen der kantonalen oder kommunalen Ebene (Gemeinde und Schwellenkorporationen) geführt (s. Leitfaden im Anhang B).

Die Interviews werden einerseits mit zuständigen Personen der Geschiebesammler der ausgewählten Wildbäche der Stufe 3 geführt. Um die geomorphologischen Bedingungen im Unterlauf in einen grösseren Kontext einzuordnen, werden andererseits Interviews mit Personen geführt, welche in unterschiedlichen Regionen im Kanton Bern tätig sind (OIK I, II und IV in Bern).

## **3.4.2 Bewertung der erfassten Erosion**

Die Höhe der im Frühjahr 2015 gemessenen dGPS Tiefenlinie wird, insofern die Qualität der Archivdaten ausreichend ist, mit Angaben zur Sohlenlage bzw. Längenprofilen aus Projektdaten verglichen. Durch den Vergleich von zeitlich unterschiedlichen Längenprofilen können Veränderungen der Sohlenlage festgestellt werden (Ahnert 2009). Um geringe Höhenunterschiede zu erkennen, wird die Y-Achse (Höhe) des Diagramms gegebenenfalls überhöht dargestellt. Die gemessene Höhe des technischen Berichtes wird als Referenz verwendet. Liegt die aktuelle Sohlenlage höher als der Referenzzustand, finden ablagernde Bedingungen statt. Dementsprechend finden bei einer tieferen Sohlenlage geschiebearme Bedingungen statt.

## 4. Resultate

Dieses Kapitel ist in die Selektion von geeigneten Unterläufen, die Resultate der als geschiebearm identifizierten Unterläufe (Stufe 1), die Indexierung der Erosion und der Rückhaltewirkung (Stufe 2) sowie die Charakterisierung der Erosion in unverbauten Abschnitten (Stufe 3) unterteilt.

### 4.1 Selektion geeigneter Unterläufe

Pro Stufe werden mit den angegebenen Kriterien die Unterläufe selektiert (s. Kapitel 3.1). Die Nicht-Selektion von einzelnen Fällen wird mit den nicht erfüllten Kriterien begründet.

#### 4.1.1 Unterläufe Stufe 1

Für die Stufe 1 werden die folgenden Auswahlkriterien angewendet:

- 1) Bauwerk vorhanden
- 2) Keine Zuflüsse in den Unterlauf
- 3) Minimale Länge des Unterlaufs von 200 m
- 4) Messperiode von mindestens 10 Jahren
- 5) Mindestens 5 Geschiebeentnahmen

Durch fünf Kriterien werden von 108 Geschiebesammlern der DB Solid 50 geeignete Unterläufe ausgewählt. Die in Tabelle 6 aufgeführten Wildbäche erfüllen alle Auswahlkriterien und werden selektiert. Die Stichprobe der Stufe 1 deckt alle 11 Kantone und die Forschungsinstitution WSL der DB Solid ab. Sie wird durch den Chalberhönibach in Saanen ergänzt (s. Kapitel 3.1).

AG04	Sissle Sisslen	OW04	Dürnbach Engelberg
AG05	Wyna Menziken	SG01	Widenbach Altstätten
BE02	Fritzenbach Leissigen	SG03	Simmi Hasengut
BE03	Spissibach Leissigen	SG05	Steinbach Kaltbrunn
BE04	Büetschli graben Schangnau	SZ01	Nietenbach Seewen
BE07	Dorfbach Oberbipp	SZ02	Hundschottenbach Biberegg
BE11	Leimbach Frutigen	SZ04	Nidlaubach Unteriberg
BE13	Schwarzbach Lauenen	SZ05a	Chessibach Altendorf
BE14	Eistlenbach Hofstetten	SZ05b	Chessibach unten
GR01a	Dorfruefe Trimmis(a)	SZ06	Filderenbach Unteriberg
GR01b	Dorfruefe Trimmis(b)	TI01	Riale Tiglia/Leontica
GR02	Tomilsertobel Rothenbrunnen	TI03	Valle di Gerra/Gambarogno
GR03	Muranzina Sta. Maria	TI04	Brima Losone
GR04	Valparghera Chur	TI05	Riale di Sementina
GR05	Val Zuondra Celerina	TI06	Riale Cusello Sigirino
GR07	Val Punteglias Trun	TI17	Ticino Airolo
GR11a	Val Pednal Poschiavo(a)	UR01	Gangbach Gangbach
GR11b	Val Pednal Poschiavo(b)	UR02	Kummetbach Attinghausen
NW01	Steinibach Dallenwil	UR06	Schipfenbach Silenen
NW02	Humligenbach Wolfenschiessen	VD01	Croisette Bex
NW03	Mühlebach Beckenried	VS01	Drance de Ferret Orsière
NW05	Steinibach Hergiswil	VS11	Peterey Zinal
OW01	Bitzighoferbach Sarnen	WSL02	Rotenbach Plaffeien
OW02	Melbach Kerns	WSL03	Schwändlibach Plaffeien
OW03	Grosse Schliere Alpnach	BE	Chalberhönibach Saanen*

Tabelle 6: Wildbäche der Stichprobenauswahl der Stufe 1. (\*nicht in der Datenbank Solid aufgeführt; Datengrundlage: Datenbank Solid).

In der Tabelle 7 sind die restlichen Wildbäche der DB Solid aufgeführt, welche einzelne Kriterien nicht erfüllten und somit nicht selektiert werden.

Das ausschlaggebende Kriterium für den Ausschluss von 39 Wildbächen ist die mangelnde Anzahl von Entnahmen während der Messperiode (Kriterium 5). Hierbei sind hauptsächlich Geschiebesammler betroffen, welche vor 10–15 Jahren gebaut wurden. Ein weiteres wichtiges Kriterium für den Ausschluss von 15 Wildbächen ist das Kriterium 3 der minimalen Länge des Unterlaufs von 200 m. Obwohl die DB Solid eine Datenbank von Geschiebesammlern ist, wird das Kriterium 1 des vorhandenen Absperrbauwerkes an neun Geschiebesammlern nicht erfüllt, weil bei diesen nur ein Ablagerungsraum vorhanden ist, jedoch kein Absperrbauwerk gebaut wurde.

		Kriterien							Kriterien				
		1	2	3	4	5			1	2	3	4	5
AG01	Wyna Reinach	x	✓	✓	✓	✓	TI11	Riale Grande Lumino	✓	x	✓	x	x
AG02	Rüederchen	x	✓	✓	✓	✓	TI12	Maggia Avegno	x	✓	✓	✓	✓
AG03	Schinznach Dorf	✓	x	✓	✓	✓	TI13	Brenno Olivone	✓	✓	✓	✓	x
BE01	Blindlauigraben Lütschental	✓	✓	✓	✓	x	TI14	Brenno Dongio	✓	✓	✓	✓	x
BE05	Steinenbach Bowil	✓	✓	x	✓	✓	TI15	Brenno Foce Biasca	x	✓	x	✓	x
BE07	Dorfbach Oberbipp	✓	✓	x	✓	✓	TI16	Ticino Lavorgo	✓	✓	✓	✓	x
BE08a	Längenb.graben Lauperswil	✓	✓	x	✓	✓	UR03	Poeschrueti Seedorf	x	✓	✓	✓	✓
BE08b	Längenb.mühle Lauperswil	✓	✓	✓	✓	x	UR04	Fischlauwi Seedorf	x	✓	✓	✓	✓
BE09	Grosse Bachtale Brienz	✓	✓	x	✓	✓	UR05	Opplibach Gurtellen	x	✓	✓	✓	✓
BE12	Wallbach Lenk	✓	✓	✓	✓	x	UR07	Kirchbach Silenen	✓	x	✓	x	x
GR06	Val Grevas Madulain	✓	✓	✓	✓	x	VD02	Tinière Villeneuve	✓	✓	✓	✓	x
GR08	Val GrondaTschlin	✓	✓	✓	✓	x	VD03	Promentouse Embouchure	✓	✓	x	✓	x
GR09	Riale de Rasch Lostalio	✓	✓	x	✓	✓	VS02	Lonza Ferden	✓	✓	✓	✓	✓
GR10	Riale Molera Lostalio	✓	✓	x	✓	x	VS03	Bielzug St.Niklaus	✓	✓	x	✓	x
NW04	Rübibach Buochs	✓	✓	✓	✓	x	VS04	Täschbach	✓	✓	✓	x	x
OW05	Edisriedbach Sachseln	✓	✓	✓	✓	x	VS05	Minstigerbach Münster	✓	✓	✓	x	x
SG02	Aubach Eichberg	✓	✓	✓	✓	x	VS06	Fossé des Talons	✓	✓	✓	x	x
SG04a	Viltiserbach	✓	✓	✓	✓	x	VS07	Sempbach Blatten	✓	✓	x	✓	✓
SG04b	Viltersbach	✓	✓	✓	✓	x	VS08	Fallzug St.Niklaus	✓	✓	x	✓	✓
SG06a	Gasenzenbach Gams	✓	✓	✓	x	x	VS09	Beattligraben	✓	✓	x	✓	✓
SG06b	Gasenzenbach Gams	✓	✓	✓	✓	x	VS10	Meretschibach	✓	✓	✓	✓	x
SG06c	Felsbach Gams	✓	✓	✓	x	x	VS12	Bruchji Naters	✓	✓	✓	✓	x
SG07	Simmi Wider Gams	✓	✓	✓	✓	x	VS13	Bajin Hérménence	✓	✓	x	✓	x
SZ03	Ahornweidbach Einsiedeln	✓	✓	✓	✓	x	VS14	Milibach Obergesteln	✓	✓	✓	✓	x
TI02	Riale Crosa/Riveo	✓	✓	✓	✓	x	VS15	Vella Saxon	✓	x	x	✓	✓
TI07	Val Maggiore Torricella	✓	✓	✓	x	x	VS16	Dorfbach Randa	✓	✓	✓	✓	x
TI08	Riana Bioggio	✓	✓	✓	✓	x	VS17	Bossey Fully	✓	✓	✓	✓	x
TI09	Riale Fragiatora Malvaglia	✓	✓	✓	x	x	WSL01	Erlenbach Alpthal	✓	✓	x	✓	✓
TI10a	Leggiuna Malvaglia	x	✓	✓	✓	✓	WSL04	Melera Val Morobbia	✓	✓	✓	✓	x
TI10b	Brenno Malvaglia	x	x	✓	✓	✓	Nicht erfüllte Kriterien		9	5	15	9	39

Tabelle 7: Nicht ausgewählte Unterläufe der Stufe 1. 1 = Absperrbauwerk vorhanden, 2 = keine Zuflüsse in den Unterlauf, 3 = Unterlauf länger als 200 m, 4 = mind. 10 Messjahre, 5 = mind. 5 Entnahmen (Datengrundlage: Datenbank Solid).

### 4.1.2 Unterläufe Stufe 2

Für die Stufe 2 werden die folgenden Auswahlkriterien angewendet:

- 1) Geschiebearm kategorisierte Unterläufe (Stufe 1)
- 2) Weniger stark oder nicht verbaute Abschnitte sind vorhanden
- 3) Standort des Geschiebesammlers am Kegelhalbs oder auf dem Schwemmkegel
- 4) Verfügbarkeit von Projektdaten
- 5) Zugänglichkeit und Sichtbarkeit des Unterlaufs

Aus den 50 ausgewählten Unterläufe der Stufe 1 können 15 Unterläufe für die nachfolgende Stufe 2 selektiert werden (s. Tabelle 8). Die Stichprobe ist lediglich aus Geschiebesammlern von fünf Kantonen zusammengesetzt. Wiederum wird der Chalberhönibach in Saanen ergänzt, welcher nicht in der DB Solid aufgeführt ist. Für die nachfolgende Untersuchung ist zu beachten, dass durch das Auswahlkriterium 1 die Beurteilung der Stufe 2 und 3 auf geschiebearme Verhältnisse beschränkt ist.

BE02	Fritzenbach Leissigen	NW01	Steinibach Dallenwil	OW04	Dürrbach Engelberg
BE03	Spissibach Leissigen	NW02	Hummiligenbach Wolfenschiessen	SZ04	Nidlaubach Unteriberg
BE04	Büetschligraben Schangnau	NW05	Steinibach Hergiswil	SZ05	Chessibach Altendorf
BE11	Leimbach Frutigen	OW01	Bitzighoferbach Sarnen	UR02	Kummetbach Attinghausen
BE13	Schwarzbach Lauenen	OW02	Melbach Kerns	BE	Chalberhönibach Saanen*

Tabelle 8: Wildbäche der Stichprobenauswahl der Stufe 2. (\*nicht in der Datenbank Solid aufgeführt; Datengrundlage Datenbank Solid).

In der Tabelle 9 sind die restlichen Wildbäche der Stufe 1 aufgeführt, welche einzelne Kriterien nicht erfüllen. Die Reduktion der Stichprobe erfolgt grösstenteils durch das Auswahlkriterium 4 der Verfügbarkeit von Projektdaten. Massgebend sind zudem die Kategorisierung von erosiven Bedingungen (Kriterium 1) und das Vorhandensein von nicht verbauten Abschnitten (Kriterium 2). Obwohl die Kriterien des Standorts des Geschiebesammlers und der Sichtbarkeit der Erosionsphänomene nur in einzelnen Fällen nicht erfüllt werden, ist die Reduktion für die Beurteilung des Ist-Zustandes relevant.

		Kriterien							Kriterien				
		1	2	3	4	5			1	2	3	4	5
AG04	Sissle Sisslen	x	x	✓	x	✓	SZ01	Nietenbach Seewen	✓	x	✓	x	✓
AG05	Wyna Menziken	x	x	✓	✓	✓	SZ02	Hundschottenbach Biberegg	x	✓	✓	x	✓
BE07	Dorfbach Oberbipp	✓	x	✓	x	✓	SZ05b	Chessibach unten	✓	✓	✓	x	✓
BE14	Eistlenbach Hofstetten	✓	✓	✓	x	✓	SZ06	Fildererbach Unteriberg	✓	✓	✓	x	✓
GR01a	Dorfruefe Trimmis(a)	✓	✓	✓	x	✓	TI01	Riale Tiglia/Leontica	x	✓	✓	x	✓
GR01b	Dorfruefe Trimmis(b)	x	✓	✓	x	✓	TI03	Valle di Gerra Gambarogno	x	✓	✓	x	✓
GR02	Tomilsertobel Rothenbrunnen	✓	✓	✓	x	✓	TI04	Brima Losone	✓	x	✓	x	✓
GR03	Muranzina Sta. Maria	x	✓	✓	x	✓	TI05	Riale di Sementina	✓	✓	✓	x	✓
GR04	Valparghera Chur	✓	x	✓	x	✓	TI06	Riale Cusello Sigirino	✓	✓	✓	x	✓
GR05	Val Zuondra Celerina	✓	✓	✓	x	✓	TI17	Ticino Airolo	x	✓	✓	x	✓
GR07	Val Punteglias Trun	x	✓	✓	x	✓	UR01	Gangbach Gangbach	✓	✓	✓	x	✓
GR11a	Val Pednal Poschiavo(a)	x	✓	✓	x	✓	UR06	Schipfenbach Silenen	✓	✓	✓	✓	x
GR11b	Val Pednal Poschiavo(b)	✓	✓	✓	x	✓	VD01	Croisette Bex	✓	x	✓	x	✓
NW03	Mühlebach Beckenried	✓	✓	✓	x	✓	VS01	Drance de Ferret Orsière	✓	✓	✓	x	✓
OW03	Grosse Schliere Alpnach	✓	x	✓	x	✓	VS11	Peterey Zinal	✓	✓	✓	x	✓
SG01	Widenbach Altstätten	✓	x	✓	x	✓	WSL02	Rotenbach Plaffeien	x	✓	x	x	✓
SG03	Simmi Hasengut	✓	x	✓	x	✓	WSL03	Schwändlibach Plaffeien	x	✓	x	x	✓
SG05	Steinbach Kaltbrunn	✓	x	✓	x	✓	Nicht erfüllte Kriterien		12	11	2	33	1

Tabelle 9: Nicht ausgewählte Unterläufe der Stufe 2. 1 = Kategorie geschiebearm, 2 = nicht alle Abschnitte sind stark verbaut, 3 = Standort des Geschiebesammlers am Kegelhalbs oder auf dem Kegel, 4 = Verfügbarkeit von Projektdaten zum Geschiebesammler und der Verbauung im Unterlauf, 5 = Sichtbarkeit der Erosionsphänomene im Gelände (Datengrundlage Datenbank Solid).

### 4.1.3 Unterläufe Stufe 3

Für die Stufe 3 werden die folgenden Auswahlkriterien angewendet:

- 1) Verfügbarkeit von Archivdaten des Unterlaufes (QP und LP)
- 2) Durchführbarkeit von Feldmessungen

Aus den 15 Unterläufen der Stufe 2 werden sechs geeignete Unterläufe für die Stufe 3 selektiert (s. Tabelle 10). Fünf der sechs Wildbäche liegen im Kanton Bern und lediglich der Steinibach im Kanton Nidwalden. Die Stichprobe der sechs Wildbäche ist nicht repräsentativ für die Gesamtheit der Unterläufe der DB Solid.

BE02	Fritzenbach Leissigen	BE11	Leimbach Frutigen
BE03	Spissibach Leissigen	NW01	Steinibach Dallenwil
BE04	Büetschligraben Schangnau	BE	Chalberhönibach Saanen*

Tabelle 10: Wildbäche der Stichprobenauswahl der Stufe 3. (\*nicht in der Datenbank Solid aufgeführt; Datengrundlage: Datenbank Solid).

Die Auswahl der Unterläufe der Stufe drei bedingt lediglich zwei Kriterien. Vor allem das Kriterium 1 der Verfügbarkeit von Längs- und Querprofilen ist für die Selektion der Unterläufe relevant. Dieses Kriterium trifft bei 8 von 15 Unterläufen ein (s. Tabelle 11). Der Bitzighoferbach in Sarnen kann aufgrund der erschwerten Begehbarkeit nicht untersucht werden, obwohl die notwendigen Projektdaten vorhanden sind.

		Krit.	
		1	2
BE 13	Schwarzbach Lauenen	x	✓
NW02	Hummligenbach Wolfenschiessen	x	x
NW05	Steinibach Hergiswil	x	x
OW01	Bitzighoferbach Sarnen	✓	x
OW02	Melbach Kerns	x	✓
OW04	Dürrbach Engelberg	x	✓
SZ 04	Nidlaubach Unteriberg	x	✓
SZ05a	Chessibach Altendorf	x	✓
UR 02	Kummetbach Attinghausen	x	✓
Nicht erfüllte Kriterien		8	3

Tabelle 11: Nicht ausgewählte Unterläufe der Stufe 2. 1 = Verfügbarkeit von Längs- und Querprofilen, 2 = begehbarer Unterlauf für Profilmessung (Datengrundlage: Datenbank Solid).

#### *Fazit Stichprobenauswahl*

*Anhand der Auswahlkriterien können für die Stufe 1 50 Unterläufe, für die Stufe 2 15 und für die Stufe 3 sechs geeignete Unterläufe selektiert werden. Durch das Kriterium der geschiebearmen Unterläufe sind geschiebearme Bedingungen in der Stufe 2 und 3 zu erwarten. Die Stichprobe ist nicht repräsentativ für die Geschiebesammler der Datenbank Solid, erfüllt jedoch die Kriterien der Beurteilung der Erosion.*

## 4.2 Geomorphologische Bedingungen (Stufe 1)

Im Folgenden wird die entwickelte Methode der visuellen Identifikation der geomorphologischen Bedingungen anhand von Luft- und Satelliten und topographischen Karten erläutert. Allfällige Einschränkungen sowie die erfolgte Kategorisierung der jeweiligen Unterläufe sind aufgeführt.

### 4.2.1 Beurteilung der Kategorie geschiebearm, umlagernd und ablagernd

Die Beurteilung von geschiebearmen, umlagernden und ablagernden Unterläufen der Stufe 1 wird in den einheitlich verbauten Abschnitten beurteilt und anschliessend als Überblick für den gesamten Unterlauf dargestellt.

#### **Beurteilung einheitliche Abschnitte**

Die Beurteilung erfolgt durch die visuelle Identifikation (++) bzw. den Ausschluss (-) der Phänomene anhand von drei Bedingungen (s. Tabelle 12). Kann ein Phänomen in einem Abschnitt eindeutig identifiziert bzw. ausgeschlossen werden, wird die entsprechende Beurteilung (++/+-) festgelegt. Die Kategorien (geschiebearm, umlagernd, ablagernd) werden einheitlich verbauten Abschnitten aufgrund der Häufigkeit und Ausprägung der gewählten Bedingungen innerhalb des Abschnittes zugewiesen. Die Beurteilung des einheitlich verbauten Abschnittes erfolgt somit anhand der dominierenden Kategorie innerhalb des Abschnittes.

<b>Beurteilung</b>		<b>Bedingung</b>
<b>++</b>	trifft zu	Mehrere oder ein stark ausgeprägter Indikator ist identifizierbar
<b>+</b>	trifft eher zu	Ein Indikator ist identifizierbar
<b>-</b>	trifft nicht zu	Kein Indikator ist identifizierbar

Tabelle 12: Visuelle Beurteilung der identifizierten Phänomene in Luft- und Satellitenbildern und topographischen Karten der Stufe 1.

Um eine einheitliche Beurteilung zu ermöglichen, wird pro Kategorie ein Referenzzustand definiert:

- Als geschiebearmer Referenzzustand werden die Abschnitte A und C im Steinibach in Dallenwil festgelegt (s. Abbildung 20). Unterhalb der Sperren bilden sich deutliche Kolke, welche teilweise nahezu bis zur unterliegenden Sperre reichen. Der geschiebearme Zustand wird von Herrn Fessler (Kt. Nidwalden) bestätigt (Fessler 2015).



Abbildung 20: Referenzzustand geschiebearme Bedingungen: Ausgeprägte Kolke unterhalb von Sperren am Steinibach in Dallenwil im Abschnitt C. Kreis: Bsp. eines grossen Kolk der nahezu bis zur nächsten Sperre reicht. (Quelle: Swisstopo 2014).

- Für umlagernde Bedingungen werden die beiden Unterläufe des Schwändlibachs und Rotenbachs in Plaffeien verwendet (s. Abbildung 21). Im dargestellten Abschnitt im Rotenbach sind grössere Blöcke und Kolke unterhalb von diesen Blöcken zu erkennen. Im Gelände können die umlagernden Bedingungen bestätigt werden.



Abbildung 21: Referenzzustand umlagernde Bedingungen: Umlagerungsstrecke am Rotenbach in Plaffeien. Kreis: grössere Blöcke mit Kolken unterhalb. Pfeile: Ablagerung von grösseren Blöcken (Quelle: Swisstopop 2014).

- Als ablagernder Referenzzustand wird der Abschnitt A unterhalb des Geschiebesammlers des Hundschottbachs in Biberegg verwendet (s. Abbildung 22). Auf dem untenstehenden Luftbild sind bspw. grössere Blöcke und nur kleine Kolke unterhalb der Sperrn identifizierbar. Erosionsphänomene der Ufer wie Rutschungen oder Böschungserosion werden keine identifiziert.



Abbildung 22: Referenzzustand ablagernde Bedingungen: Eher ablagernder Abschnitt am Hundschottenbach in Biberegg. Kreis: vergleichsweise kleine Kolke. Pfeile: grössere Blöcke. (Quelle: Swisstopop 2014).

### Beurteilung des gesamten Unterlaufs

Für die Beurteilung des gesamten Unterlaufs wird die anhand der Länge dominierende Kategorie gewählt. In der Tabelle 13 sind die Unterläufe aufgeführt, welche Abschnitte mit unterschiedlichen Bedingungen aufweisen. Die Kategorie mit der grössten Abschnittslänge wird stellvertretend für den gesamten Unterlauf ausgewählt.

	<b>Abschnitt A</b>	<b>Abschnitt B</b>	<b>Abschnitt C</b>	<b>Abschnitt D</b>
Val Punteglias Trun	<b>umlagernd (660 m)</b>	geschiebearm (310 m)		
Steinibach Dallenwil	<b>geschiebearm (250 m)</b>	<b>geschiebearm (365 m)</b>	<b>geschiebearm (295 m)</b>	umlagernd (435 m)
Humligenbach Wolfenschiessen	umlagernd (350 m)	<b>geschiebearm (340 m)</b>	<b>geschiebearm (360 m)</b>	Nicht beurteilt* (100 m)
Riale Tiglia Leontica	<b>umlagernd (540 m)</b>	geschiebearm (380 m)		
Riale di Sementina	umlagernd (240 m)	<b>geschiebearm (600 m)</b>	<b>geschiebearm (290 m)</b>	

Tabelle 13: Unterläufe mit unterschiedlich beurteilten Kategorien nach einheitlich verbauten Abschnitten (A-D). Die Kategorie, welche die grösste Länge einnimmt, wird ausgewählt (hervorgehoben) \*Abschnitt D am Humligenbach durch Renaturierung nicht beurteilt. (Datengrundlage: Datenbank Solid).

#### 4.2.2 Einschränkungen der visuellen Identifikation

Je nach Aufnahmedatum, Sonnenstand, Lichtbedingungen, Vegetation, Topographie etc. ist die Interpretation von Luft- und Satellitenbildern eingeschränkt. Die visuelle Identifikation der Erosions- und Ablagerungsphänomene kann an 43 Unterläufen vorgenommen werden. In sieben Fällen ist die Beurteilung anhand der vorhandenen Luft- und Satellitenbilder nicht möglich. In Tabelle 14 sind die Gründe für die mangelnde Bildqualität pro Sammler aufgeführt. Die Beurteilung ist hauptsächlich durch dichte Vegetation und die Auflösung des Luftbildes eingeschränkt.

	<b>Grund für die unzureichende Bildqualität</b>
Fritzenbach Leissigen	Vegetation
Büetschli graben Schangnau	Schatten, Vegetation
Schwarzbach Lauenen	Auflösung Luft- und Satellitenbild
Hummligenbach Wolfenschiessen	Schatten, Vegetation
Melbach Kerns	Auflösung Luft- und Satellitenbild, Vegetation
Kummetbach Attinghausen	Auflösung Luft- und Satellitenbild, Vegetation
Schipfenbach Silenen	Auflösung Luft- und Satellitenbild, Vegetation

Tabelle 14: Gründe für eine unzureichende Qualität der Luft- und Satellitenbilder am Beispiel der Stichprobe der Identifikation von geschiebearmen Bedingungen (Datengrundlage: Datenbank Solid).

Sind die Erosions- bzw. Ablagerungsphänomene aufgrund von unzureichender Bildqualität nicht eindeutig erkennbar, wird der Unterlauf anhand des identischen Beurteilungsrasters im Gelände in sieben Fällen beurteilt. Die Beurteilung im Gelände ist vergleichsweise zeitaufwändig. Sie ist jedoch zur Vermeidung von Fehlinterpretationen notwendig.

### 4.2.3 Übersicht der Kategorisierung der untersuchten Unterläufe

Die visuelle Interpretation von Luft- und Satellitenbildern und topographischen Karten zeigt, dass in 72 % der 50 untersuchten Unterläufe geschiebearme Bedingungen identifiziert werden. Insgesamt werden 36 Unterläufe als erodierend und 14 als umlagernden kategorisiert (s. Abbildung 23). In keinem der Unterläufe kann eine dominierende ablagernde Tendenz festgestellt werden. Die Kategorisierung der einzelnen Wildbäche ist im Anhang C aufgeführt und die detaillierte Beurteilung anhand des Beurteilungsrasters im digitalen Anhang.

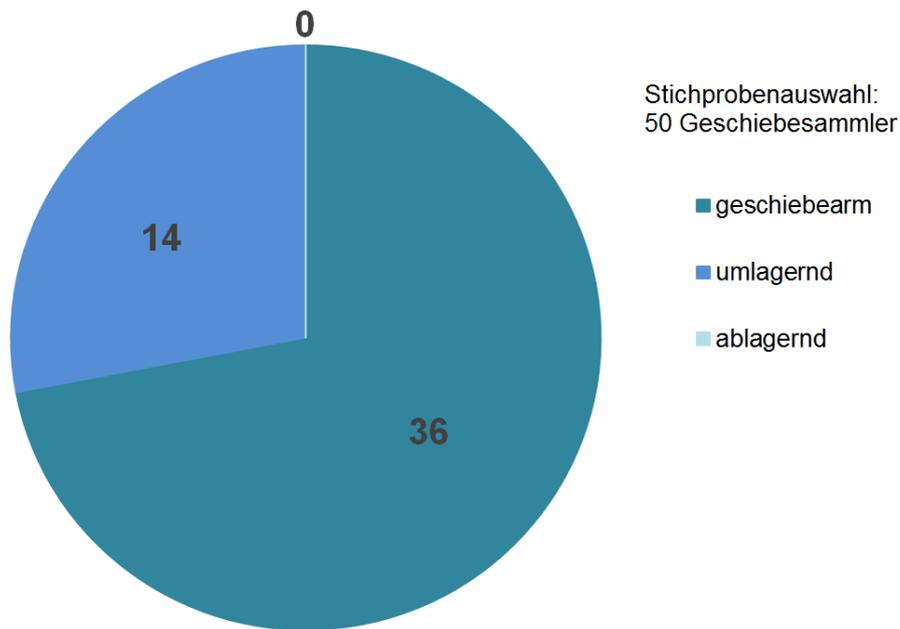


Abbildung 23: Visuelle Kategorisierung der Unterläufe anhand von Luft- und Satellitenbildern und topographischen Karten an 50 Geschiebesammlern der Datenbank Solid.

#### *Fazit Stufe 1*

*Aufgrund der visuellen Interpretation von Luft- und Satellitenbildern und topographischen Karten können von 50 Unterläufen der Datenbank Solid 36 als geschiebearm, 14 als umlagernd und keiner als ablagernd beurteilt werden. Somit weist die Kategorisierung auf die zu erwartende Erosion im Unterlauf von Geschiebesammlern.*

## 4.3 Indexierung der Erosion und der Rückhaltewirkung

In diesem Kapitel wird anhand der entwickelten Methode die Festlegung die Indexierung erläutert. Pro Index wird die Berechnung der Indizes, die Beurteilung der Wildbäche der Stufe 2 sowie der dominierende Faktor der Stichprobe aufgeführt. Schlussendlich werden die Beurteilungen der drei Indices anhand der Stichprobe verglichen.

### 4.3.1 Festlegung der Indexierung

Im folgenden Kapitel wird aufgezeigt, wie durch die Festlegung der Indexierung die drei Indizes vereinheitlicht werden und somit der Vergleich der Rückhaltewirkung des Geschiebesammlers, der Erosion im Unterlauf sowie den Verhältnissen an der Mündung möglich ist.

#### **Index-Werte**

Die Indexierung basiert auf den in Kapitel 3.3.2 erfassten Phänomenen und bewerteten Indikatoren (s. Tabelle 2). Jedes erfasste Phänomen wird mit einem Index-Wert zwischen 1–4 (1 = geringe Ausprägung, 4 = sehr starke Ausprägung) definiert. Die Ausprägung der Indikatoren der drei Indizes ist auf die untersuchten Eigenschaften der Stichprobe der Wildbäche normiert. Dadurch ist die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Wildbäche gewährleistet.

#### **Normierung-Spannweite**

Durch Korrekturfaktoren des Gerinne- (s. Kapitel 4.3.2) und Rückhalte-Indizes (s. Kapitel 4.3.4) können sich Werte ausserhalb der Spannweite (1–4) ergeben. Beim Gerinne-Index (GI) können sich Werte von 1-5 und beim Rückhalte-Index (RI) Werte von 0-4 bilden. Damit die Indices miteinander verglichen sind, werden sie wiederum auf die gleiche Spannweite (1-4) normiert. Das Ziel der Normierung ist, dass bspw. beim Gerinne-Index der kleinste Wert 1 beibehalten wird und der grösstmögliche Wert 5 auf den Wert 4 reduziert wird. Die lineare Normierung ist in der Formel 2 dargestellt. Die Normierung der Spannweite der einzelnen Abschnitte ist im digitalen Anhang aufgeführt.

Formel 2: Berechnung der normierten Spannweite der Index-Werte mit einem Korrekturfaktor.

$$F(x) = ax + b$$

a = Steigung  
x = Beurteilter Index-Wert (GI 1–5, RI 0–4)  
b = Schnittpunkt y-Achse

$$a = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$\Delta y$  = definierte Spannweite (1–4)  
 $\Delta x$  = mögliche Spannweite (zwischen 0–5)

**Bsp. Berechnung Normierung-Spannweite: Chessibach Altendorf**



(Kt. SZ, Abbildung 24)

Faktor der Verbauung = + 1 → Mögliche Spannweite GI = 1 – 5

$$x = ((4+1+1)/3)+1 = 3$$

$$a = 3 / 4 = 0.75$$

$$b = 0.25$$

$$f(3) = (0.75*3)+0.25 = 2.5$$

Abbildung 24: Chessibach Altendorf, betonierte Schale in Abschnitt B. (Aufnahmedatum: 17. Juli 2015).

**Festlegung Klassengrenzen**

Die Index-Werte werden interpretiert, indem die Ausprägung klassiert wird (s. Tabelle 16). Der Index 1 spricht für eine geringe und der Wert 4 für eine sehr starke Ausprägung der Rückhaltewirkung des Geschiebesammlers bzw. der Erosion im Unterlauf oder geschiebearmen Verhältnissen im Vorfluter.

Die Klassengrenzen sind in Anlehnung an Schälchli et al. (2005) gesetzt. Die Index-Werte 1 und 4 repräsentieren je 20 % und die Indizes 2 und 3 je 30 % der Stichprobe. Eine Überbewertung von allfälligen Ausreißern wird dadurch verhindert. Basierend auf dieser Verteilung wird die Klassierung erstellt (s. Klassierung Tabelle 15).

Index-Wert	1	2	3	4
Ausprägung	gering	mässig	stark	sehr stark
Klassierung	≤1.6	1.6–2.5	≥ 2.5–3.4	≥3.4

Tabelle 15: Interpretation des Index-Wertes des Gerinne-, Mündungs- und Rückhalte-Indexes.

### 4.3.2 Gerinne-Index: Ausprägung der Erosionsphänomene

Im folgenden Kapitel wird die entwickelte Methode der Berechnung des Gerinne-Indexes aufgezeigt. Zudem sind die Resultate der Beurteilung und die Erkenntnisse der Stichprobe der Stufe 2 aufgeführt.

#### Berechnung Gerinne-Index

Der Gerinne-Index basiert auf vier Faktoren (F) und einem Korrekturfaktor der Verbauung (V, s. Kapitel 3.3.2). Die Formel 3 beschreibt die Berechnung der Faktoren pro einheitlich verbautem Abschnitt ( $GI_A$ ,  $GI_B$ ,  $GI_C$  etc.). Um den  $GI_{tot}$  für den gesamten Unterlauf zu berechnen, wird der Gerinne-Index des Abschnittes mit der Abschnittslänge gewichtet.

Formel 3: Berechnung des Gerinne-Indexes pro einheitlich verbautem Abschnitt und den gesamten Unterlauf.

$GI_A = \bar{x} (F1_A + F2_A + F3_A + F4_A) + V$	$GI_{A,B,C} =$ Gerinne-Index pro Abschnitt [1–4]
	F1 = Faktor der Sohle [1–4]
$GI_B = \bar{x} (F1_B + F2_B + F3_B + F4_B) + V$	F2 = Faktor der Tiefenerosion [1–4]
	F3 = Faktor der Böschungserosion [1–4]
$GI_C = \bar{x} (F1_C + F2_C + F3_C + F4_C) + V$	F4 = Faktor der Kolkbildung [1–4]
	A, B, C = einheitlich verbauter Abschnitt
	V = Faktor der Verbauung [0-1]
	$\bar{x}$ = Mittelwert
$GI_{tot} = \frac{((GI_A * L) + (GI_B * L) + (GI_C * L))}{L_{tot}}$	$GI_{tot} =$ Gerinne-Index des Unterlaufs [1-4]
	L = Länge [m]

Für die Berechnung des einzelnen Abschnittes wird jedem Faktor (F1 bis F4) ein Kategorienwert (1 bis 4) zugewiesen (s. Tabelle 16). Die jeweiligen Grenzen zwischen den Kategorien sind anhand der Stichprobe der 15 Unterläufe normiert.

Die Erfassung der Böschungserosion wird im Vergleich zu der beschriebenen Methode angepasst. Sie wird auf die Erosionshöhe und -länge reduziert, da im Laufe der Untersuchung im Gelände festgestellt wurde, dass die Erosionsbreite nicht eindeutig abgrenzbar ist. Somit wird nicht das Erosionsvolumen, sondern die Erosionsfläche berechnet.

<b>Faktor</b> <b>Kategorie</b>	<b>Komponenten der Sohle (F1)</b>	<b>Tiefenerosion (F2)</b>	<b>Böschungserosion (F3)</b>	<b>Sperrentreppen mit Kolk (F4)</b>
1	Fein- und Grobkomponenten	Keine sichtbare Erosion	Keine sichtbare Erosion	Kein Kolk
2	Feinfraktion der Komponenten ausgespült	Kleinere Erosionsspuren ( $\leq 0.25$ m)	Kleine Anbrüche ( $\leq 0.5$ m <sup>2</sup> )	$\leq 0.25$ m Kolktiefe
3	Passive Anreicherung von Grobkomponenten oder Hinweis auf Erosion in Raubettgerinne oder nahezu leere Schale	Mittlere Erosionsspuren ( $\leq 0.5$ m) oder Hinweis auf Erosion an Längswerk	Häufige, deutliche Anbrüche ( $\leq 1$ m <sup>2</sup> )	$\leq 0.5$ m Kolktiefe, nachträglicher Kolkschutz oder Hinweis auf Erosion an Verbauung
4	Erodierte Deckschicht oder Blöcke aus Raubettgerinne ausgespült oder leere Schale	Grosse Erosionsspuren ( $> 0.5$ m) oder Längswerk unterspült / eingestürzt	Grosse Anbrüche ( $> 1$ m <sup>2</sup> )	$> 0.5$ m Kolktiefe oder Sperre unterspült / beschädigt

Tabelle 16: Erosionsfaktoren zur Kategorisierung des Gerinne-Indexes. Faktor = im Gelände erfasste Erosionsphänomene mit Einbezug des Zustandes der Verbauung, Kategorie der Ausprägung der Erosion: 1 = gering, 2 = mässig, 3 = stark, 4 = sehr stark. Die Beschreibung der jeweiligen Kategorie entspricht den im Gelände festgestellten Phänomenen.

Der Mittelwert der Faktoren des jeweiligen Abschnitts wird mit einem Koeffizienten der Wirkung der Verbauung (s. Tabelle 17) addiert. Die Korrektur ist notwendig, da ohne die starke Verbauung Erosion vermutlich stattfinden würde. Diese ist nicht erkennbar. Deshalb werden die möglichen Auswirkungen der Erosion ohne Verbauung abgeschätzt. Durch die Korrektur kann ein Index-Wert zwischen 1–5 entstehen. Somit ist eine lineare Korrektur in Abhängigkeit des grössten Wertes notwendig (s. Kapitel 4.3.1).

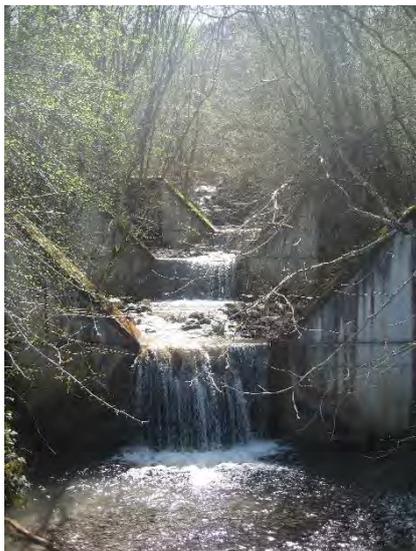
	<b>natürliches Gerinne</b>	<b>gering verbaut</b>	<b>mässig verbaut</b>	<b>stark verbaut</b>	<b>sehr stark verbaut</b>
Indikator	keine Verbauung	Einzelne Blockrampe, Sohlengurt / Böschung tw. verbaut	Regelm. Abstand Sperrentreppe oder befestigte Böschung	Sperrentreppe oder Raubettgerinne & befestigte Böschung	Schale
Faktor der Verbauung (V)	0	+ 0.25	+ 0.5	+ 0.75	+ 1

Tabelle 17: Verbauungskoeffizient (V) des Gerinne-Indexes in Abhängigkeit der Stärke der Verbauung. Der Korrekturfaktor wird dem Mittelwert der restlichen Faktoren des einheitlich verbauten Abschnittes addiert.

In den folgenden Situationen ist eine Anpassung des Beurteilungsrasters für einzelne Abschnitte oder Faktoren notwendig:

- Ablagerungen im Gerinne  
Werden im Gerinne Ablagerungen identifiziert, ist für eine korrekte Interpretation auszuschliessen, dass die Feststoffe aus dem Gerinne des Unterlaufs mobilisiert wurden (bspw. Rutschungen). Ist der Ausschluss von Erosionsspuren im unmittelbaren Oberlauf nicht möglich, sind die Ablagerungen als Resultat einer oberhalb stattfindenden Erosion zu interpretieren. Ablagerungen werden somit in unmittelbarer Nähe einer Erosion nicht als Indikator der Ablagerung interpretiert.
- Abschnitt ohne Sperrentreppen  
Sind in einem Abschnitt keine Sperrentreppen gebaut, wird der Faktor 4 nicht beurteilt.
- Bauarbeiten am Geschiebesammler oder im Unterlauf  
Ist der Unterlauf während der Geländebegehung durch den Umbau oder Unterhaltsarbeiten des Geschiebesammlers, technischen Massnahmen im Unterlauf beeinflusst, ist eine Beurteilung zum aktuellen Zustand nicht oder nur eingeschränkt möglich.

Bsp. Berechnung Gerinne-Index: Spissibach Leissigen (Kt. BE, s. Abbildung 25)



F1 = Anreicherung von Grobkomponenten  
→ Wert 3

F2 = > 0.5 m  
→ Wert 4

F3 = ≤ 1 m<sup>2</sup>  
→ Wert 3

F4 = > 0.5 m  
→ Wert 4

V = mässig verbaut  
→ Wert 0.5

$$GI = ((3+4+3+4)/4)+0.5 = 4$$

Abbildung 25: Spissibach Leissigen, Abschnitt A mit Sperrentreppen. Aufnahmedatum: 24. April 2015.

### Beurteilung Gerinne-Index pro Abschnitt

Im Folgenden wird auf die Beurteilung der Erosionsphänomene pro Abschnitte und der daraus erfolgten Berechnung des Gerinne-Indexes eingegangen.

Um den Gerinne-Index zu beurteilen, werden die untersuchten Unterläufe in einem ersten Schritt in einheitlich verbaute Abschnitte unterteilt und fotografisch dokumentiert. Ergänzende Informationen zur Beurteilung der jeweiligen Abschnitte sind im Anhang D aufgeführt. Die Berechnungen der Normierung der Spannweite und des Gerinne-Index des gesamten Unterlaufs sind im digitalen Anhang aufgeführt. Die detaillierte Kategorisierung der Faktoren welche als Input für die Indexberechnung verwendet werden, ist im digitalen Anhang zu finden. Insgesamt werden 46 einheitlich verbaute Abschnitte in 15 Unterläufen beurteilt. Die wesentlichen Aspekte der Beurteilung sind untenstehend anhand der beurteilten Faktoren zusammengefasst.

#### Komponenten der Sohle (F1)

Die Komponenten der Sohle weisen grösstenteils eine Erosion der Deckschicht bzw. keine Ablagerung in befestigten Sohlen auf und eine Anreicherung von Grobkomponenten auf (s. Tabelle 18).

Komponenten der Sohle (F1)	Abschnitte [n]	Fein- und Grobkomponenten vorhanden	Feinfraktion ausgespült	Anreich. von Grobkomponenten	Erosion der Deckschicht / keine Ablagerung
Chalberhönibach Saanen	4		1	3	
Fritzenbach Leissigen	3			2	1
Spissibach Leissigen	2			2	
Büetschligraben Schangnau	1			1	
Leimbach Frutigen	3		1		2
Schwarzbach Lauenen	3	2	1		
Steinibach Dallenwil	4			2	2
Hummligenbach Wolfenschiessen	2 (+1 renaturiert)			1	1
Steinibach Hergiswil	2				2
Bitzighoferbach Sarnen	3	1			2
Melbach Kerns	3		3		
Dürrbach Engelberg	3			2	1
Nidlaubach Unteriberg	4	1		1	2
Chessibach Altendorf	4			2	2
Kummetbach Attinghausen	4			2	2
<b>Total Komponenten der Sohle [n]</b>	<b>45 (+1)</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>18</b>	<b>17</b>

Tabelle 18: Beurteilung der Komponenten der Sohle für die Berechnung des Gerinne-Indexes anhand der untersuchten Wildbäche der Stufe 2.

Die folgenden Punkte erläutern die Resultate der Beurteilung zusammenfassend und weisen auf Einzelfälle hin:

- **Anreicherung von Grobkomponenten**  
Nahezu in allen Unterläufen wird in einzelnen Abschnitten eine passive Anreicherung von Grobkomponenten identifiziert. Lediglich am Schwarzbach werden nahezu über den gesamten Unterlauf Fein- und Grobkomponenten abgelagert, welche nicht durch Erosion im Unterlauf mobilisiert werden. Die Ablagerungen am Steinibach in Dallenwil und Chalberhönibach in Saanen werden durch die Erosion im Unterlauf werden nicht als Indikator für Ablagerung beurteilt.
- **Erosion der Deckschicht**  
Die passiv angereicherte Deckschicht mit Grobkomponenten ist am Steinibach in Hergiswil unterhalb der Sperren erodiert. Am Nidlaubach ist die Erosion der Deckschicht oberhalb der Sperre erkennbar.
- **Kaum Feststoffablagerungen in Schalen**  
Mit Ausnahme vom Spissibach sind in Abschnitten mit einer Schale keine Feststoffe abgelagert.
- **Renaturierter Abschnitt wird nicht beurteilt**  
Der Abschnitt C am Hummligenbach in Wolfenschiessen ist kürzlich renaturiert worden. Da anzunehmen ist, dass die Ablagerungen und Kiesbänke künstlich aufgeschüttet sind, werden die Komponenten der Sohle nicht beurteilt.
- **Sichtbarkeit der Gerinnesohle durch Trübung eingeschränkt**  
Durch Schwebstoffe ist die Gerinnesohle des Dürrbachs in Engelberg bei der Begehung vor Ort nicht eindeutig identifizierbar, deshalb wird der Faktor der Komponenten der Sohle nicht beurteilt. Eine Erklärung für den hohen Feinstoffanteil am Dürrbach ist die Bildung von Turbulenzen durch die touristische Nutzung des Sees als Badeort sowie im Rückhalteraum des Geschiebesammlers. Zudem weisen Kieshaufen und Bagger auf eine kürzliche Geschiebeentnahme hin.
- **Beurteilung Komposition der Sohle und der Tiefenerosion auf anstehendem Gestein**  
Der Abschnitt B am Chalberhönibach verläuft auf anstehendem Gestein. Natürliche *steps* und *pools* haben sich gebildet. Aufgrund der geringen Neigung des Abschnittes wird eine Ablagerung bzw. Füllung der *pools* als möglich erachtet. Da keine Komponenten im Gerinne abgelagert sind, wird der Abschnitt wie eine leere, verbaute Schale mit dem Wert 4 beurteilt. Der unterschiedliche Erosionswiderstand des anstehenden Gesteins und Lockermaterial wird in diesem Einzelfall nicht beurteilt.

Tiefenerosion (F2)

Die Beurteilung der Tiefenerosion zeigt in den einzelnen Abschnitten, dass aufgrund der Häufigkeit eine mässige Erosion dominiert (s. Tabelle 19). Keine Erosion entsteht in 8 der 45 beurteilten Abschnitte hauptsächlich durch die Verbauung der Gerinnesohle.

Tiefenerosion (F2)	Abschnitte [n]	Keine Erosion	Geringe Erosion (≤ 0.5 m)	Mässige Erosion (≤ 0.5 m)	Starke Erosion (> 0.5 m)
Chalberhönibach Saanen	4			2	2
Fritzenbach Leissigen	3		1	2	
Spissibach Leissigen	2	1			1
Büetschli graben Schangnau	1			1	
Leimbach Frutigen	3	1	1	1	
Schwarzbach Lauenen	3		3		
Steinibach Dallenwil	4				4
Hummli genbach Wolfenschiessen	2 (+1 renaturiert)	1		1	
Steinibach Hergiswil	2	1			1
Bitzighoferbach Sarnen	3			3	
Melbach Kerns	3		1	1	1
Dürrbach Engelberg	3		2	1	
Nidlaubach Unteriberg	4	2		2	
Chessibach Altendorf	4	1	2	1	
Kummetbach Attinghausen	4	1		1	2
<b>Total Tiefenerosion [n]</b>	<b>45 (+1)</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>16</b>	<b>11</b>

Tabelle 19: Beurteilung der Tiefenerosion für die Berechnung des Gerinne-Indexes anhand der untersuchten Wildbäche der Stufe 2.

Die folgenden Punkte erläutern die Beurteilung von unterschiedlichen Abschnitten:

- **Verbaute Gerinnesohle**  
Abschnitte mit einer verbauten Gerinnesohle (bspw. Abschnitte in einer Schale) werden mit der Kategorie keine Erosion (Index-Wert 1) beurteilt. Die erstaunlich hohe Anzahl von acht Abschnitten ohne Erosion wird in sechs Fällen an Abschnitten mit einer verbauten Gerinnesohle identifiziert, da durch die Verbauung die Erosion unterbunden wird. Es ist zu beachten, dass dies durch den Faktor der Verbauung korrigiert wird (s. Formel 3).
- **Vegetation als Referenzhöhe in stark verbautem Abschnitt**  
Die unterspülte Vegetation am Dürrbach wird als Referenzhöhe für die Vermessung der Tiefenerosion im kanalisierten Abschnitt verwendet.
- **Interpretation von einem Schluchtabschnitt**  
Der Abschnitt B am Fritzenbach verläuft in einer ca. 10 m tiefen Schlucht. Die Eintiefung und Instabilitäten der Böschung werden als Relikt der Bildung der Schlucht interpretiert und nicht als aktive Tiefenerosion.

## Böschungserosion (F3)

Die Kategorie 1 (Keine Böschungserosion) dominiert (s. Tabelle 20). 26 der 45 beurteilten Abschnitte weisen eine starke Verbauung der Böschung und somit keine Erosion auf. Abgesehen von den Abschnitten mit einer verbauten Böschung treten vermehrt deutliche und grosse Anbrüche der Böschung auf.

Böschungserosion (F3)	Abschnitte [n]	Keine Erosion	Kleine Anbrüche ( $\leq 0.25 \text{ m}^2$ )	Deutliche Anbrüche ( $\leq 1 \text{ m}^2$ )	Grosse Anbrüche ( $> 1 \text{ m}^2$ )
Chalberhöhibach Saanen	4				4
Fritzenbach Leissigen	3		1	2	
Spissibach Leissigen	2	1		1	
Büetschli graben Schangnau	1		1		
Leimbach Frutigen	3	1	1		1
Schwarzbach Lauenen	3		1	2	
Steinibach Dallenwil	4	2		1	1
Hummligenbach Wolfenschiessen	2 (+1 renaturiert)	2			
Steinibach Hergiswil	2	2			
Bitzighoferbach Sarnen	3	3			
Melbach Kerns	3	1		1	1
Dürrbach Engelberg	3	3			
Nidlaubach Unteriberg	4	4			
Chessibach Altendorf	4	3		1	
Kummetbach Attinghausen	4	4			
<b>Total Böschungserosion [n]</b>	<b>45 (+1)</b>	<b>26</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>7</b>

Tabelle 20: Beurteilung der Böschungserosion für die Berechnung des Gerinne-Indexes anhand der untersuchten Wildbäche der Stufe 2.

Die folgenden Punkte erläutern die Resultate der Beurteilung zusammenfassend und weisen auf Einzelfälle hin:

- Einzelne grosse Anbrüche  
Einzelne Anbrüche überschreiten die Grösse von  $1 \text{ m}^2$  deutlich. Dies trifft beispielsweise am Chalberhöhibach, Steinibach und Chessibach und Melbach ein.
- Rutschungen  
Am Chalberhöhibach treten im Abschnitt A unmittelbar unterhalb des Sammlers auf beiden Uferseiten Rutschungen von 8–10 m Höhe auf. Die Massnahmen durch Befestigungen mit Blöcken am Gerinneufer vermögen die Rutschung nicht zu stabilisieren. Direkt unterhalb der einzelnen Sperren werden durch weitere Rutschungen Blöcke aus der stabilisierten Böschung mobilisiert. Am Schwarzbach treten trotz Holzmassnahmen kleinere Rutschungen auf. Am Chessibach sind einzelne Rutschungen auf der orographisch rechten Seite von 2–3 m Erosionshöhe sichtbar.

- **Erosion der Böschung**  
Im Abschnitt B am Steinibach in Dallenwil stehen die Böschungen durch die Erosion senkrecht. Die erhebliche Erosion erstreckt sich an beiden Ufern mit einer Höhe von ca. 5–9 m über ca. 250 m. Auch am Melbach werden im Abschnitt A ausgeprägte Erosionen der Böschung anhand einer Erosionshöhe von ca. 1–2 m gemessen.
- **Unterspülte Längswerke und Blocksätze**  
Längswerke und Blocksätze sind am Chalberhönibach unterspült. Die befestigte Böschung am Leimbach bei der Sperre 11 ist im Abschnitt A unterspült.
- **Verbaute Böschung**  
Abschnitte mit einer verbauten Böschung (bspw. ein Abschnitt mit einer Schale) werden in der Kategorie 1 (keine Böschungserosion) beurteilt. Die erstaunlich hohe Anzahl von 26 Abschnitten ohne Erosion wird in 17 Fällen an Abschnitten mit einer verbauten Gerinnesohle identifiziert, da durch die Verbauung die Erosion unterbunden wird. Durch den Faktor der Verbauung wird dies korrigiert (s. Formel 2).

**Kolktiefe (F4)**

21 Abschnitte sind mit Sperrentreppen verbaut. Innerhalb dieser Abschnitte dominieren eindeutig Kolkiefen über 0.5 m. In keinem der 21 Abschnitte konnten Sperren ohne ausgeprägten Kolk identifiziert werden (s. Tabelle 21).

Kolktiefe (F4)	Abschnitte [n]	Kein Kolk	≤ 0.25 m	≤ 0.5 m, Kolkschutz, Erosion an der Sperre	> 0.5 m, Sperre unterspült, eingestürzt
Chalberhönibach Saanen	1 (+3)			1	
Fritzenbach Leissigen	1 (+2)				1
Spissibach Leissigen	1 (1)				1
Büetschligraben Schangnau	1				1
Leimbach Frutigen	2 (+1)			1	1
Schwarzbach Lauenen	1 (+2)		1		
Steinibach Dallenwil	2 (+2)				2
Hummligenbach Wolfenschiessen	1 (+2)		1		
Steinibach Hergiswil	1 (+1)				1
Bitzighoferbach Sarnen	1 (+2)				1
Melbach Kerns	2 (+1)		2		
Dürrbach Engelberg	1 (+2)		1		
Nidlaubach Unteriberg	2 (+2)			1	1
Chessibach Altendorf	1 (+3)				1
Kummetbach Attinghausen	3 (+1)			1	2
<b>Total Kolkiefen [n]</b>	<b>21 (+25)</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>12</b>

Tabelle 21: Beurteilung der Kolktiefe bei Sperrentreppen für die Berechnung des Gerinne-Indexes anhand der untersuchten Wildbäche der Stufe 2.

Die folgenden Punkte erläutern die Resultate der Beurteilung zusammenfassend und weisen auf Einzelfälle hin:

- Grösstenteils ausgeprägte Kolkiefen  
Die grössten Kolkiefen von bis zu 1 m Tiefe werden am Spissibach gemessen. Mit Ausnahme vom Schwarzbach weisen alle Sperren mittlere Kolkiefen zwischen 0.4 und 1 m auf. Bei der Sperre 10 am Steinibach in Hergiswil erstreckt sich der Kolk bis zur nächsten Sperre. Dies wird anhand des Faktors der Tiefenerosion beurteilt.  
Am Hummligenbach treten nur kleine Kolke auf, weil die Gerinnesohle direkt unter dem Absturz befestigt ist und dadurch die Kolkbildung verhindert wird.
- Einzelne Instabilitäten der Sperren  
In den untersuchten Abschnitten sind einzelne Fundamente der Sperren unterspült (Spissibach, Steinibach Dallenwil, Leimbach). Eine eingestürzte Holzsperrre wird am Melbach und Büetschli graben beobachtet und eingestürzte Blocksperrren am Kummetbach und Leimbach. Am Büetschli graben ist eine Holzsperrre seitlich umpült.

#### Korrekturfaktor der Verbauung (V)

Die Festlegung der Verbauung der einzelnen Abschnitte ist in Tabelle 22 dargestellt. Ca. 60 % der beurteilten Abschnitte sind stark bis sehr stark verbaut. Somit dominieren stark verbaute Abschnitte. Im Unterlauf der Geschiebesammler sind 7 Abschnitte nicht verbaut. Diese zeigen mit Ausnahme vom Abschnitt am Nidlaubach und vom kürzlich renaturierten Abschnitt am Hummligenbach keine ausgeprägte Erosion auf.

Verbauung (V)	Abschnitte [n]	natürliches Gerinne	leicht verbaut	mässig verbaut	stark verbaut	sehr stark verbaut
Chalberhönbach Saanen	4	1		2	1	
Fritzenbach Leissigen	3	1		1		1
Spissibach Leissigen	2			1		1
Büetschli graben Schangnau	1			1		
Leimbach Frutigen	3			1	1	1
Schwarzbach Lauenen	3		2	1		
Steinibach Dallenwil	4	2			2	
Hummligenbach Wolfenschiessen	3	1				2
Steinibach Hergiswil	2				1	1
Bitzighoferbach Sarnen	3				3	
Melbach Kerns	3	1		1	1	
Dürrbach Engelberg	3				3	
Nidlaubach Unteriberg	4	1			2	1
Chessibach Altendorf	4			1	2	1
Kummetbach Attinghausen	4				3	1
<b>Total Beurteilung Verbauung [n]</b>	<b>46</b>	<b>7</b>	<b>2</b>	<b>9</b>	<b>19</b>	<b>9</b>

Tabelle 22: Beurteilung der untersuchten Unterläufe der Stufe 2 anhand der Verbauung der einzelnen Abschnitte für die Berechnung des Gerinne-Indexes.

### Beurteilung des Gerinne-Index pro Wildbach

Die Auswertung des Gerinne-Indexes des gesamten Unterlaufs ergibt grösstenteils hohe Index-Werte (2.5–4). Das Auftreten der Erosion ist zu erwarten, da für die Stufe 2 geschiebearme Unterläufe verwendet werden (s. Kapitel 3.1). Die Abbildung 26 stellt die Beurteilung des  $GI_{tot}$  des jeweiligen Unterlaufs dar. 14 von 15 Unterläufen weisen auf stark bis sehr stark ausgeprägte Erosionsphänomene im Gerinne. Davon werden acht Unterläufe mit einer sehr starken Ausprägung beurteilt und sechs mit einer starken Ausprägung. Einzig der Unterlauf am Schwarzbach in Lauenen stellt anhand des  $GI_{tot}$  eine mässige Ausprägung der Erosion dar. Dies kann durch die Abschätzung im Gelände bestätigt werden.

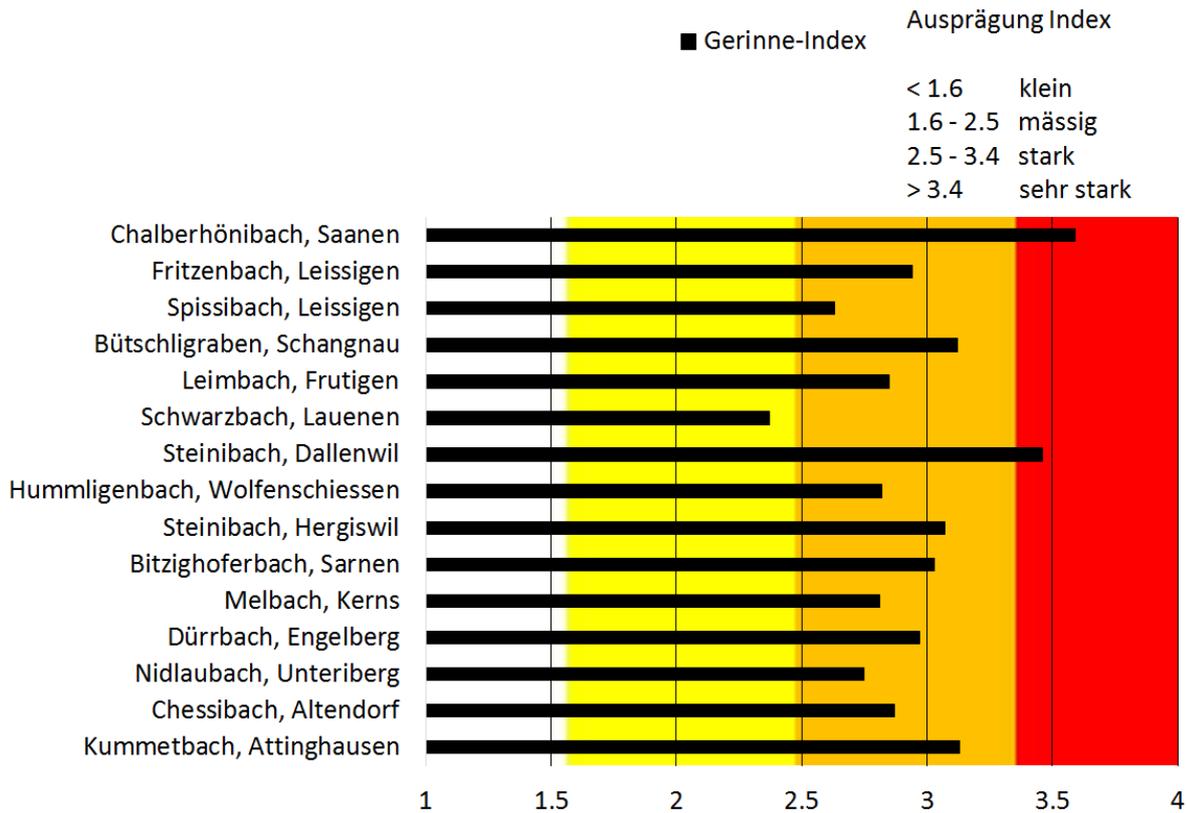


Abbildung 26: Beurteilung des Gerinne-Indexes der 15 untersuchten Unterläufe der Stufe 2. Die Beurteilung basiert auf den im Feld festgestellten Ausprägungen von Erosionsphänomenen. Die Hintergrundfarben stellen die Klassengrenzen der Ausprägung des Index dar.

### 4.3.3 Mündungs-Index: Kolk- bzw. Kegelbildung im Vorfluter

Im Folgenden sind die Berechnung des Mündungs-Indexes sowie die Beurteilung der 15 Unterläufe der Stufe 2 aufgeführt.

#### Berechnung Mündungs-Index

Der Mündungs-Index basiert einzig auf dem Faktor der Verhältnisse der Kegel- bzw. Kolkbildung im Vorfluter. Eine Anpassung der Verbauung, Korrektur der Länge und eine Normierung der Kategorien ist nicht notwendig (s. Formel 4). Das Resultat der Beurteilung kann wiederum anhand der Festlegung der Indexierung (s. Kapitel 4.3.1) interpretiert werden.

Formel 4: Formel zur Berechnung des Mündungs-Indexes

$$MI = M$$

MI = Mündungs-Index  
M = Faktor der Kegelbildung [1-4]

In der Tabelle 23 sind die festgelegten Kategorien der Beurteilung der Verhältnisse der Kolk bzw. Kegelbildung an der Mündung des Mündungs-Indexes dargestellt. Die Ablagerung von Feststoffen in Form eines Kegels ist ein Indikator für Geschiebetransport, insofern das Material durch den Geschiebesammler transportiert wurde. Wurde das Material im Kegel aus dem Unterlauf erodiert, ist dies ein Indikator für ein Geschiebedefizit (s. Kapitel 3.3.2, Verhältnis an der Mündung). Eine sogenannte Fahne weist auf eine mässige Erosion des Kegels hin und kann wiederum je nach Ursprungsort des Materials ein Indikator für eine Ablagerung oder ein Geschiebedefizit sein. Der Ursprungsort des Materials ist somit zu prüfen. Keine Ablagerung weist eindeutig auf ein Defizit im Unterlauf hin. Die Bildung eines Kolks stellt ein ausgeprägtestes Geschiebedefizits dar.

Kategorie \ Faktor	Kegelbildung
1	Kegel
2	sog. Fahne*
3	keine Ablagerung
4	Kolk

Tabelle 23: Kategorisierung des Mündungs-Indexes. Untersuchter Faktor: Kegelbildung im Vorfluter. Die Beschreibung der jeweiligen Kategorie entspricht den im Feld festgestellten Phänomenen. (\* Unter der sogenannten Fahne wird ein durch den Vorfluter verschwemmter Kegel verstanden).

Für die Beurteilung des Mündungs-Indexes ist zu beachten:

- Beurteilung von Feststoffablagerungen  
Bei Ablagerungen im Vorfluter in Form eines Kegels oder einer Fahne ist der Ursprung des Materials zu prüfen. Ablagerungen weisen nur auf Geschiebetransport hin, wenn im Unterlauf anhand des Gerinne-Index keine starken Erosionen festgestellt werden. Wird im Unterlauf jedoch eine ausgeprägte Erosion festgestellt, ist die Kegelbildung ein Indikator für ein Geschiebedefizit.

Bsp. Berechnung Mündungs-Index: Spissibach Lauenen (Kt. BE, s. Abbildung 27)



M = keine Ablagerung

→ Wert 3

MI = 3

Abbildung 27: Spissibach Lauenen,  
Aufnahmedatum: 24. April 2015.

### Beurteilung Mündungs-Index

Im Folgenden wird auf die Beurteilung der Verhältnisse an der Mündung und der daraus erfolgten Berechnung des Mündungs-Indexes eingegangen. Allfällige Besonderheiten von einzelnen Unterläufen werden zusammenfassend erläutert.

Die folgenden Punkte Erläutern die Beurteilung von speziellen Verhältnissen an der Mündung

- Interpretation der Feststoffablagerung im Vorfluter  
Die Fahne am Schwarzbach kann durch die mässige ausgeprägte Erosion im Unterlauf als Ablagerung interpretiert werden.
- Beurteilung der aktuellsten Form  
Es wird die aktuellste Form des Kegels bzw. des Kolks beurteilt, um den Ist-Zustand des Unterlaufs darzustellen. Bildet sich bspw. ein Kolk auf dem ursprünglichen Kegel, ist der Kolk für die Beurteilung massgebend, insofern der Kolk tiefer liegt als die Sohlenlage des Vorfluters. Dies trifft am Kummetbach in Attinghausen ein.
- Beurteilung bei turbulenter Strömung an der Mündung  
Die Gerinnesohle ist durch Turbulenzen an der Mündung des Dürrbachs in Engelberg nicht sichtbar. Deshalb wird die Form der Ablagerung durch punktuell Abtasten der Wassertiefe mit einem Jalon erfasst.
- Eingeschränkte Beurteilung bei befestigter Gerinnesohle des Vorfluters  
Der Vorfluter des Nidlaubachs weist ein gepflastertes Gerinne auf. Dadurch ist die Bildung eines Kolks nicht möglich. Flussauf und -abwärts der Mündung sind Ablagerungen von kleinen Kiesbänken am Ufer zu erkennen. Da auf der Höhe der Mündung des Nidlaubachs keine Ablagerungen vorzufinden sind, wird die Mündung mit einem Index der Kategorie „keine Ablagerung“ beurteilt.
- Keine Beurteilung einer renaturierten Mündung  
In Einzelfällen ist der Abschnitt der Mündung renaturiert (s. Hummligenbach). Durch die Aufweitung und Aufschüttung von Kiesbänken ist anzunehmen, dass ein Grossteil der Ablagerung künstlich ist. Deshalb kann der Mündungs-Index am Hummligenbach nicht beurteilt werden.

In der Abbildung 28 ist die Beurteilung der Kegel- bzw. Kolkbildung an der Mündung der 15 Unterläufe der Stufe 2 dargestellt. In der Stichprobe ist zum Zeitpunkt der Feldbegehung in keinem Unterlauf ein eindeutiger Kegel erkennbar. An einem Unterlauf ist eine Fahne (welche auf Geschiebetransport hinweist), an acht weder eine Ablagerung noch eine Erosion und an fünf Unterläufen die Bildung eines Kolkes erkennbar. Es dominiert somit ein Geschiebedefizit im Unterlauf.

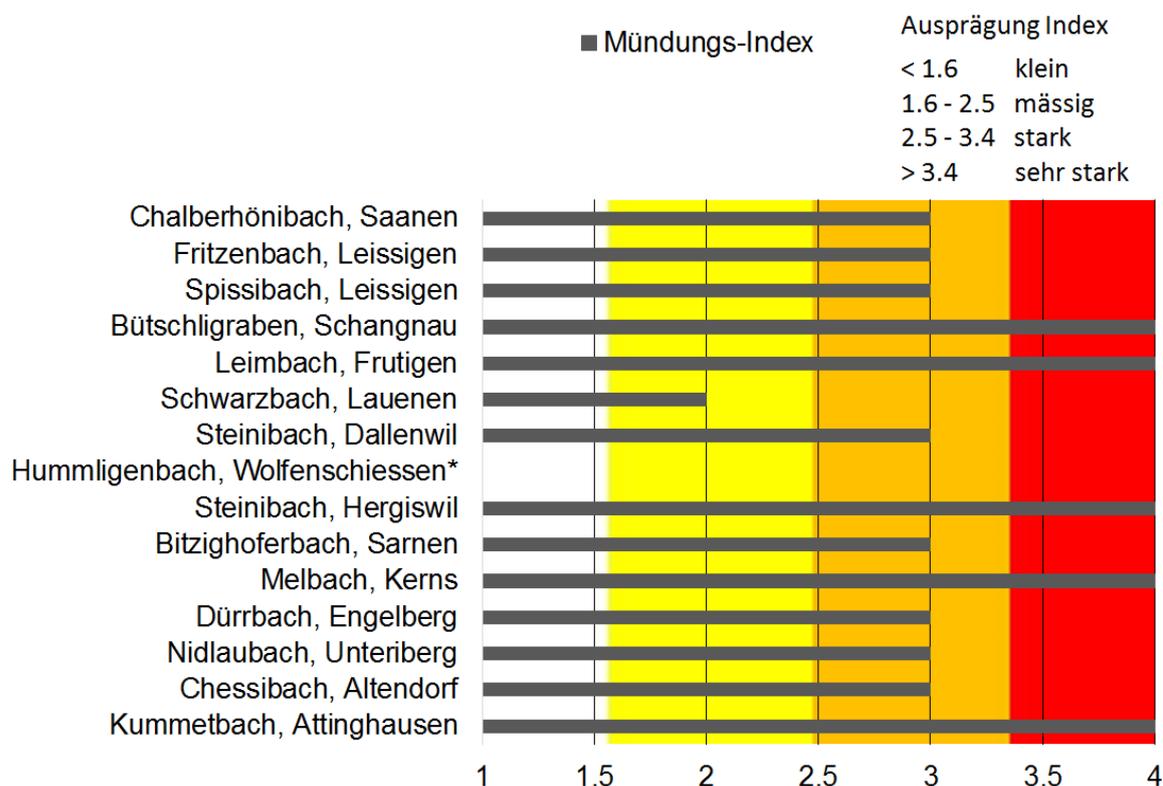


Abbildung 28: Beurteilung des Mündungs-Indexes der 15 untersuchten Unterläufe der Stufe 2. Die Hintergrundfarben stellen die Klassengrenzen der Ausprägung des Indexes dar. (\* Mündung am Hummligenbach aufgrund Renaturierung nicht beurteilt).

#### 4.3.4 Rückhalte-Index: Rückhaltewirkung der Absperrussbauwerke

Der Rückhalte-Index wird anhand der Berechnung des Indexes und der Beurteilung der Faktoren der Stichprobe aufgezeigt.

##### Berechnung Rückhalte-Index

Der Rückhalte-Index basiert auf dem Faktor des kleinsten Masses des Durchlasses (kleinste Höhe oder Breite der Öffnung) des Absperrbauwerks und den beiden Korrekturfaktoren der Korngrösse im Ablagerungsraum des Geschiebesammlers und der Orientierung der Öffnung (s. Formel 5).

Formel 5: Formel zur Berechnung des Rückhalte-Indexes.

$$RI = FR - K - O$$

RI = Rückhalte-Index [1–4]  
 FR = Faktor des Kleinstes Mass des Durchlasses [1–4]  
 K = Faktor der Korngrösse [0–0.5]  
 O = Faktor der Orientierung der Öffnung [0–0.5]

Die vier Kategorien des Faktors des kleinsten Masses des Durchlasses sind in Tabelle 24 dargestellt. Die Abgrenzungen der Kategorien sind durch Unterschiede des kleinsten Masses des Durchlasses auf jeweils 0.5 m gesetzt. Die Spannweite (<0.5–>1.5) entspricht der Stichprobe der 15 Geschiebesammler.

Kategorie \ Faktor	Kleinstes Mass des Durchlasses (FR)
1	≥ 1.5 m
2	> 1 – < 1.5 m
3	> 0.5 – ≤ 1 m
4	≤ 0.5 m

Tabelle 24: Beurteilung des Faktors des kleinsten Masses des Durchlasses für den Rückhalte-Index. Die Klassengrenzen werden anhand der untersuchten Unterläufe zugeteilt.

Der Rückhalte-Index wird durch die Korrekturfaktoren der Orientierung des Durchlasses und der Korngrösse (d90) korrigiert (s. Tabelle 25). Die Grenze der Korngrösse von 0.5 m wird mit der kleinsten Öffnung des Abschlussbauwerkes abgestimmt. Insgesamt kann eine Korrektur (O und K) zwischen 0 und - 1 Index-Wert erfolgen. Aufgrund des Korrekturfaktors können Werte zwischen 0 und 4 entstehen. Deshalb ist wiederum eine lineare Normierung auf die definierte Spannweite (1–4) notwendig (s. Kapitel 4.3.1).

Indikator	Orientierung des Durchlasses (O)		Korngrösse (K)	
	vertikal	horizontal	≤ 0.5 m	> 0.5 m
Korrekturfaktor	- 0.5	0	- 0.5	0

Tabelle 25: Korrektur des Rückhalte-Indexes in Abhängigkeit der Orientierung des Durchlasses und der Korngrösse (d90) im Rückhalteraum des Geschiebefaktors.

Für eine einheitliche Beurteilung des Rückhalte-Indexes sind folgende Aspekte zu beachten:

- **Beurteilung der Öffnung auf Gerinnesohle**  
Das kleinste Mass wird bei der Öffnung auf der Höhe der Gerinnesohle beurteilt, da die höher gelegenen Öffnungen nur im Ereignisfall relevant sind. Kleine Durchlässe für die Entwässerung werden nicht beurteilt.
- **Entlastungsquerschnitt**  
Der Entlastungsquerschnitt (s. Abbildung 3) wird nicht beurteilt, da er nur im Ereignisfall relevant ist.
- **Holzrechen**  
Ein vor- oder nachgelagerter Holzrechen wird nur insofern beurteilt, als das kleinste Mass geringer als der Durchlass des Absperrbauwerks ist.
- **Definition der vertikalen Orientierung**  
Die Korrektur des Faktors der vertikalen Orientierung trifft nur ein, wenn die Öffnung mind. 50 % der Höhe des Sammlers umfasst. Bei einem geringeren Anteil, wird aufgrund des vernachlässigbaren Einflusses keine Korrektur vorgenommen.

Bsp. Berechnung Rückhalte-Index | Definition vertikale Orientierung:

Fritzenbach in Leissigen (Kt. BE, S. Abbildung 29)



FR = 0.5 m  
→ Wert = 4

O = „vertikal“  
nicht 50 % der Höhe  
→ Korrektur = 0

K = > 0.5 m  
→ Korrektur = 0

RI = 4-0-0 = 4

Abbildung 29: Fritzenbach Leissigen, Aufnahmedatum: 24. April 2015.

Bsp. Berechnung Rückhalte-Index II Anwendung Korrekturfaktoren:  
Schwarzbach Lauenen (Kt. BE, s. Abbildung 30)



FR = 0.5 m  
→ Wert = 4

O = vertikal  
→ Korrektur = - 0.5

K = < 0.5 m  
→ Korrektur = - 0.5

RI = 4-0.5-0.5 = 3

Abbildung 30: Schwarzbach Lauenen, Aufnahmedatum: 22. August 2015.

### Beurteilung Rückhalte-Index

Im Folgenden wird anhand der beurteilten Faktoren der Rückhalte-Index erläutert. Die Beschreibung der Beurteilung der einzelnen Geschiebesammler ist im Anhang D aufgeführt und das detaillierte Beurteilungsraster im digitalen Anhang.

#### Faktor des kleinsten Masses des Durchlasses (FR)

Von den 15 Geschiebesammlern werden insgesamt 11 Absperrbauwerke mit einem kleinen Mass des Durchlasses beurteilt (s. Tabelle 26). Somit dominieren in der Stichprobe eindeutig kleine Öffnungen. Das grösste Mass wird am Kummetbach mit 1.5 m gemessen und das kleinste am Hummligenbach mit 0.1 m.

Kleinstes Mass des Durchlasses [m]	≥ 1.5	1 –1.5	0.5 – 1	≤ 0.5
Chalberhönibach Saanen				1
Fritzenbach Leissigen				1
Spissibach Leissigen				1
Büetschliqraben Schangnau				1
Leimbach Frutigen			1	
Schwarzbach Lauenen				1
Steinibach Dallenwil			1	
Hummligenbach Wolfenschiessen				1
Steinibach Hergiswil				1
Bitzighoferbach Sarnen				1
Melbach Kerns			1	
Dürrbach Engelberg				1
Nidlaubach Unteriberg				1
Chessibach Altendorf				1
Kummetbach Attinghausen	1			
<b>Total der Beurteilung [n]</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>11</b>

Tabelle 26: Beurteilung des kleinsten Masses des Durchlasses (kleinste Höhe oder Breite) für die Berechnung des Rückhalte-Indexes anhand der untersuchten Wildbäche der Stufe 2.

Die folgenden Punkte erläutern die Beurteilung von speziellen Abschlussbauwerken:

- Beurteilung mobile Öffnung  
Der Durchlass am Chalberhönibach ist verstellbar (s. Anhang D1). Das kleinste Mass des Durchlasses wird anhand der aktuellen Einstellung erfasst, im Wissen, dass die Beurteilung lediglich dem aktuellen Zustand entspricht.
- Beurteilung von mehreren Absperrbauwerken  
Am Steinibach in Hergiswil sind drei identische Absperrbauwerke im Abstand von 10 und 20 m gebaut (s. Anhang D9). Erklärungen für das dreifache Bauwerk sind nicht bekannt. Zwischen den einzelnen Absperrbauwerken wird keine Entnahme durchgeführt. Aufgrund der Annahme einer verzögerten, aber nicht erhöhten Rückhaltewirkung wird die Beurteilung auf das oberste Absperrbauwerk vereinfacht.

Korrekturfaktor der Orientierung des Durchlasses (O) und der Korngrösse (K)

Eine Korrektur aufgrund der vertikalen Orientierung wird an 6 Absperrbauwerken vorgenommen. Eine Korrektur der Korngrösse wird bei 5 von 15 Geschiebesammlern angewendet (s. Tabelle 27).

	Orientierung der Öffnung (O)		Korngrösse (K)	
	horizontal	vertikal	> 0.5 [m]	≤ 0.5 [m]
Chalberhönibach Saanen	1			1
Fritzenbach Leissigen	1		1	
Spissibach Leissigen		1		1
Büetschli graben Schangnau		1	1	
Leimbach Frutigen		1	1	
Schwarzbach Lauenen		1		1
Steinibach Dallenwil	1		1	
Hummli genbach Wolfenschiessen	1		1	
Steinibach Hergiswil	1			1
Bitzighoferbach Sarnen	1		1	
Melbach Kerns		1	1	
Dürnbach Engelberg	1		1	
Nidlaubach Unteriberg	1			1
Chessibach Altendorf	1		1	
Kummetbach Attinghausen		1	1	
<b>Total der Beurteilung [n]</b>	<b>9</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>5</b>

Tabelle 27: Beurteilung der untersuchten Unterläufe der Stufe 2 anhand der Korrekturfaktoren der Orientierung der Öffnung und der Korngrösse für die Berechnung des Rückhalte-Indexes. Bei der Vollsperr am Dürnbach in Engelberg wird der Korrektur der Korngrösse nicht angewendet.

Der folgenden Punkt erläutert die Beurteilung des Korrekturfaktors der Orientierung

- Keine Korrektur der vertikalen Orientierung  
Die Öffnung des Geschiebesammlers am Fritzenbach in Leissigen ist vertikal orientiert. Aufgrund der geringen Höhe der Öffnung im Vergleich zur gesamten Höhe des Absperrbauwerkes (s. Anhang D2) wird gemäss der Definition der vertikalen Öffnung keine Korrektur vorgenommen.

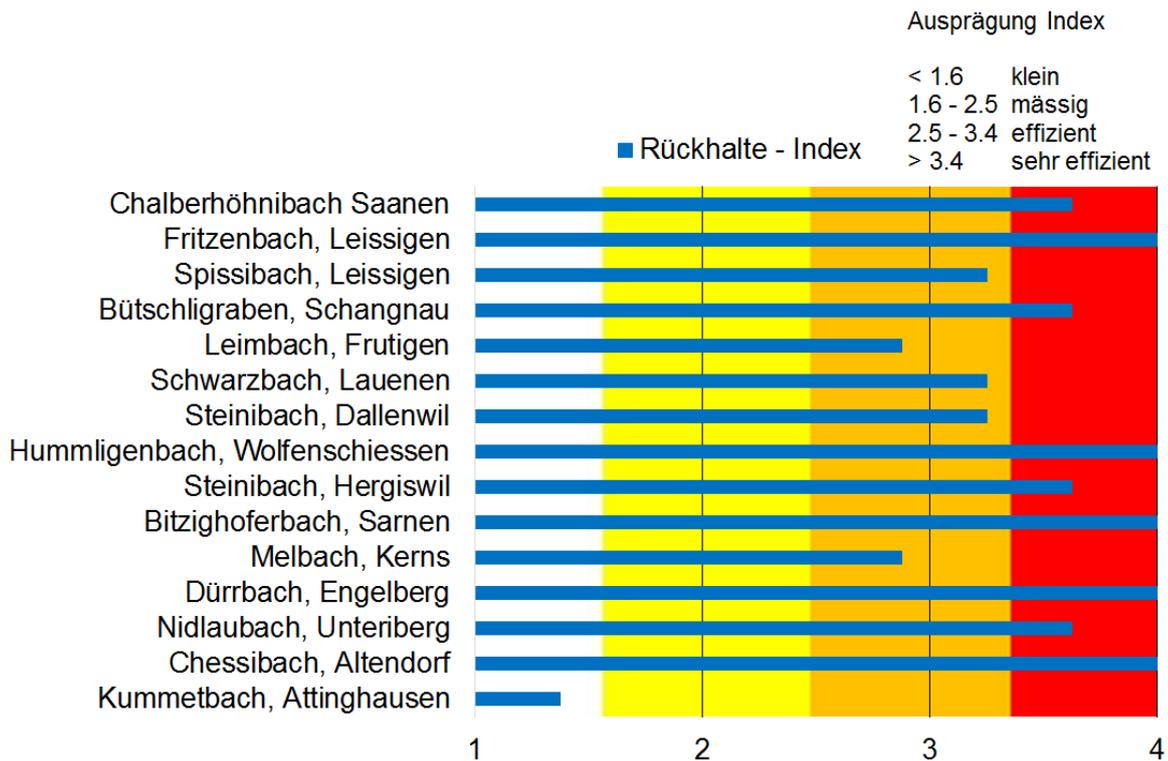


Abbildung 31: Beurteilung des Rückhalte-Indexes der 15 untersuchten Unterläufe der Stufe 2. Basierend auf dem kleinsten Mass des Rückhaltes, sowie dem Korrekturfaktor der Korngrösse und der Orientierung der Öffnungen. Die Hintergrundfarben stellen die Klassengrenzen der Ausprägung des Index dar.

In der obenstehenden Abbildung 31 ist das Resultat des berechneten Rückhalte-Indexes der Geschiebesammler der Stufe 2 dargestellt. Geschiebesammler mit einer effizienten Rückhaltewirkung dominieren. Neun Geschiebesammler werden mit einer sehr effizienten Rückhaltewirkung beurteilt, fünf mit einer effizienten. Anhand der Berechnung weist lediglich ein Geschiebesammler, der Sammler am Kummetbach in Attinghausen, einen geringen Rückhalte-Index auf. Dies kann dadurch erklärt werden, dass der Geschiebesammler in Attinghausen der einzige ist, welches ein kleinstes Mass über 1 m aufweist (s. Abbildung 32).



Abbildung 32: Geschiebesammler am Kummetbach in Attinghausen. Kleinstes Mass: > 1.5 m. (Aufnahmedatum: 17. Juli 2015).

### 4.3.5 Vergleich der Indizes: Übereinstimmung der Beurteilung

Die Resultate der 15 Wildbäche werden in diesem Kapitel verglichen. In einem ersten Schritt werden die beiden Indizes im Unterlauf und an der Mündung (Gerinne- und Mündungs-Index) verglichen und in einem zweiten Schritt alle drei Indizes.

Der Vergleich basiert auf der Annahme, dass eine effizientere Rückhaltewirkung zu ausgeprägten Phänomenen der Erosion bzw. zu einem ausgeprägten Geschiebedefizit führt (s. Hypothese 2). Eine gute Übereinstimmung (✓✓) trifft innerhalb einer Abweichung der Indizes von 0.5 Index-Werten auf, eine zufriedenstellende Übereinstimmung (✓) bei 1 Index-Wert Abweichung und keine Übereinstimmung (x) bei einer Abweichung > 1 Index-Wert. Diese Abweichung wird im Folgenden bei jedem untersuchten Wildbach untersucht.

#### Vergleich Gerinne- und Mündungs-Index

In der Abbildung 33 ist der Gerinne- und Mündungs-Index aufgeführt. Grundsätzlich gilt folgende Annahme: Die Beurteilung der beiden Indizes kann als korrekt erachtet werden, wenn die Indizes übereinstimmend sind oder nur geringfügig voneinander abweichen.

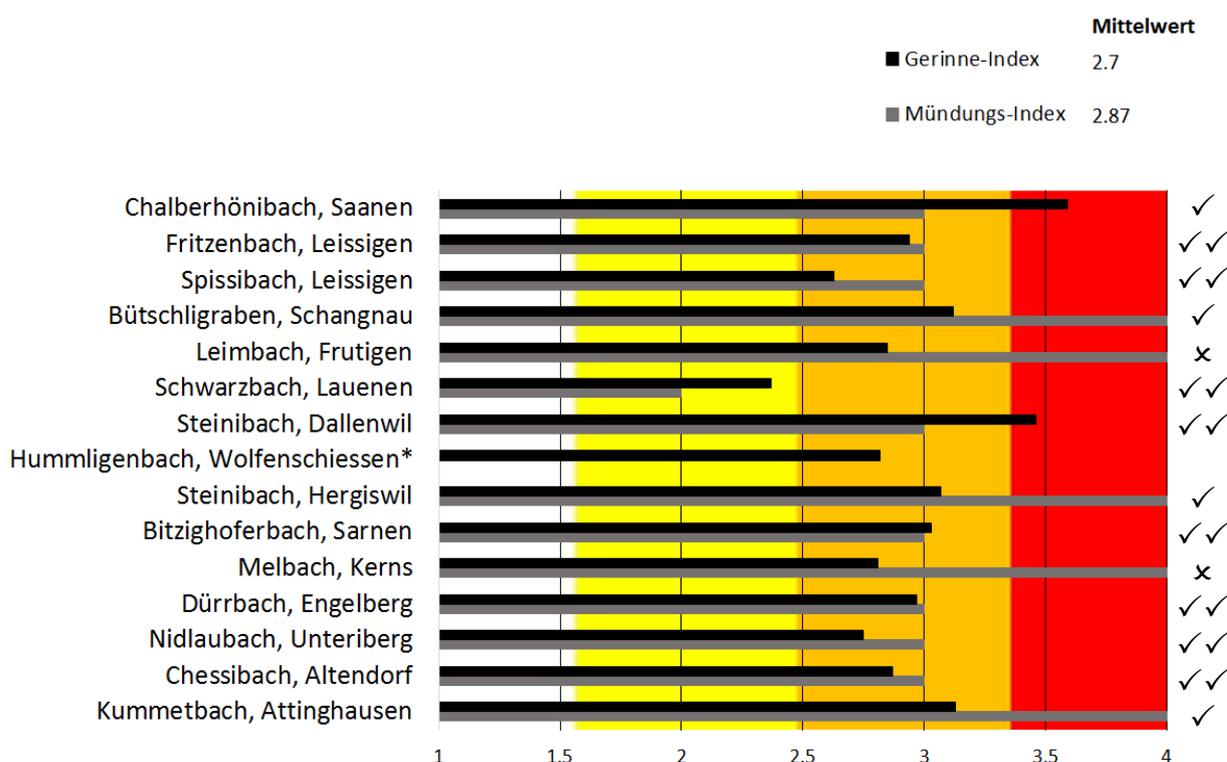


Abbildung 33: Beurteilung der Erosionsphänomene im Unterlauf und der Verhältnisse an der Mündung anhand eines Gerinne- und Mündungs-Indexes an 15 Unterläufen der Datenbank Solid. Die Hintergrundfarben stellen die Klassengrenzen der Ausprägung des Index dar. (\*die Mündung am Hummligenbach wird aufgrund einer Renaturierung nicht beurteilt).

Der Mittelwert des Gerinne-Index beträgt unter Berücksichtigung aller 15 Unterläufe 2.7. Dem gegenüber ist der Mittelwert für den Mündungs-Index (14 Unterläufe) mit 2.87 geringfügig höher. Werden die einzelnen Wildbäche betrachtet, variiert der Gerinne-Index zwischen 2.37 und 3.46 und der Mündungs-Index zwischen 2 und 4.

Werden alle Unterschiede der Indizes betrachtet, können 12 Unterläufe gezählt werden, welche innerhalb von 1 Index-Wert und acht welche innerhalb von 0.5 Index-Werten variieren. Der Unterschied der Beurteilungen am Leimbach und Melbach sind grösser als 1 Index-Wert.

Die schwach ausgeprägte Erosion am Schwarzbach in Lauenen wird durch den tiefen Gerinne- und Mündungs-Index bestätigt. Die Beurteilung zeigt zudem, dass die Identifikation eines Kolks im Vorfluter nicht mit sehr hohen Gerinne-Indexwerten deckungsgleich ist. Geringfügige Unterschiede treten bei sehr stark ausgeprägten Mündungs-Indexen (Wert 4) auf. Dem gegenüber sind die Erosionsphänomene im Unterlauf weniger stark ausgeprägt. Wesentlich zur Erklärung dieses Unterschieds trägt der Umstand bei, dass der Mündungs-Index nur aus einem Faktor hergeleitet wird, jener für den Gerinne-Index aus vier Faktoren besteht. Der gemittelte Wert des Gerinne-Indexes ist von Ausreißern mit kleineren Werten beeinflusst.

Grundsätzlich kann bestätigt werden, dass anhand der Beurteilung des Gerinne- und Mündungs-Indexes einheitliche bzw. ausgeprägte erosive Tendenzen in 12 von 15 Unterläufen evaluiert werden.

**Vergleich Gerinne-, Mündungs- und Rückhalte-Index**

In der Abbildung 34 ist basierend auf der Darstellung des Vergleichs des Gerinne- und Mündungs-Indexes zudem der Rückhalte-Index aufgeführt. Der Vergleich der Indizes erfolgt wiederum anhand der Annahme der definierten übereinstimmenden und nicht übereinstimmenden Beurteilungen.

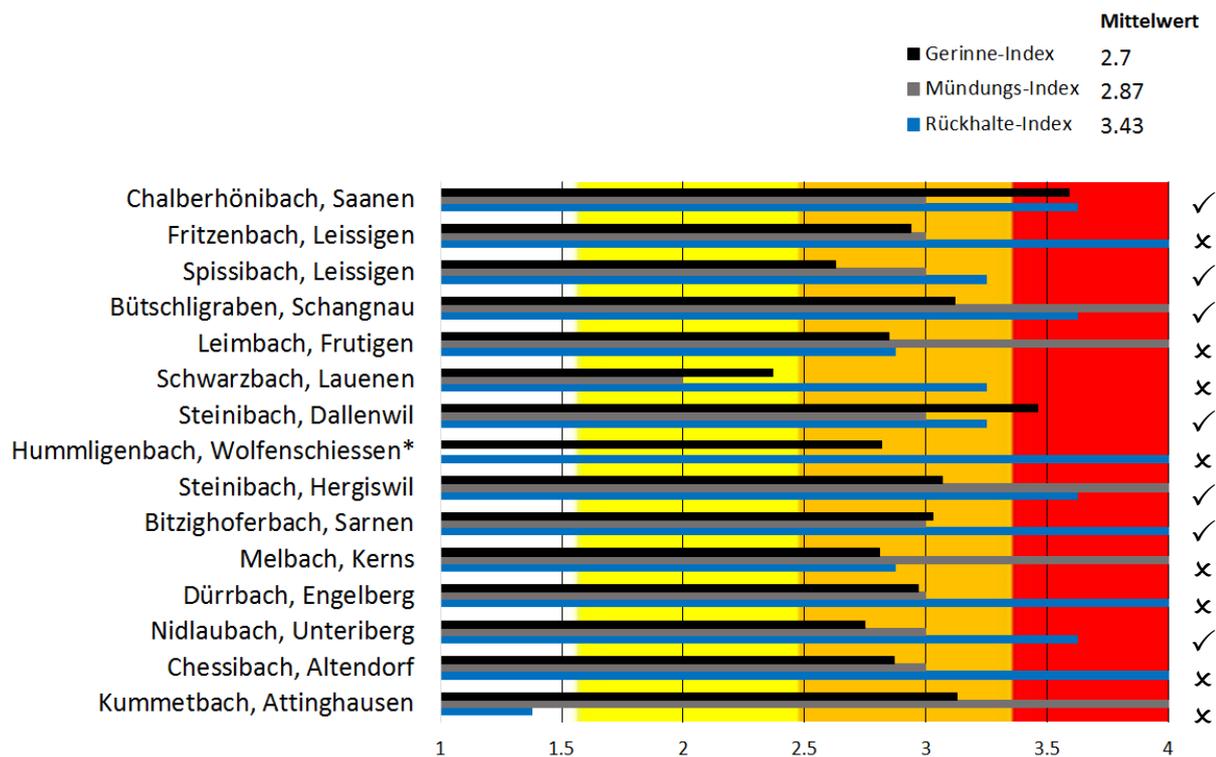


Abbildung 34: Vergleich des Gerinne- Mündungs- und Rückhalte-Indexes der 15 Wildbäche der Stufe 2 der Datenbank Solid. Die Hintergrundfarben stellen die Klassengrenzen der Ausprägung des Index dar. (\*Mündung am Hummligenbach aufgrund Renaturierung nicht beurteilt).

Der Mittelwert des Rückhalte-Index liegt bei 3.43 und somit mit ca. 0.6 Index-Werten wiederum geringfügig höher als der Mündungs-Index. Der Rückhalte-Index variiert zwischen 1.375 und 4.

Ein übereinstimmender Zusammenhang (0.5 Index-Werte Abweichung) zwischen der Rückhaltewirkung und den Verhältnissen am Unterlauf kann an keinem Wildbach festgestellt werden. Eine Variation der Indizes innerhalb von 1 Index-Wert ist an sieben Unterläufen festzustellen. Mit Ausnahme vom Schwarzbach und Kummetbach sind die Unterschiede nur geringfügig höher als jene der Toleranzgrenze der Abweichung 1. Die mässig ausgeprägte Erosion im Unterlauf und die Bildung einer Fahne im Vorfluter am Schwarzbach kann durch die effiziente Rückhaltewirkung nicht bestätigt werden. Zudem entspricht die sehr starke Ausprägung der Erosion im Unterlauf und der Kolkbildung im Vorfluter am Kummetbach nicht der geringen Rückhaltewirkung des Geschiebesammlers. Mögliche Erklärungen werden in Kapitel 5.2.4 aufgeführt. Dennoch entspricht in 7 von 15 Wildbächen die Beurteilung der Rückhaltewirkung den Verhältnissen Unterlauf.

#### *Fazit Stufe 2*

*Die Auswirkungen der Rückhaltewirkung von Geschiebesammlern auf den Unterlauf können durch die Indexierung vergleichend erfasst werden. Die Beurteilung zeigt bei 7 von 15 Wildbächen eine Übereinstimmung der effizienten Rückhaltewirkung mit den stark ausgeprägten Erosionsphänomenen im Unterlauf und dem Geschiebedefizit an der Mündung.*

## 4.4 Ausprägung der Tiefenerosion im Gerinne (Stufe 3)

In diesem Kapitel werden die Tiefenerosion in unverbauten Abschnitten und die Kolkbildung unterhalb von Querwerken aufgezeigt. Die Veränderung der Sohlenlage wird überprüft mit Rückmeldungen aus Experteninterviews. Als erstes wird auf die Datenqualität und mögliche Fehlerquellen der Längenprofile (dGPS Messungen und Archivdaten) eingegangen.

### 4.4.1 Datenqualität der Längenprofile

Die Datenqualität der aufgenommenen Punkte variiert zwischen den Unterläufen der Wildbäche, aber auch zwischen den einzelnen Abschnitten der Unterläufe. Im Folgenden wird die Qualität der dGPS Messungen und der Archivdaten zusammenfassend besprochen.

#### **Datenqualität der dGPS Messungen**

Die verwendeten dGPS Messpunkte des Talwegs mit einer guten horizontalen und vertikalen Qualität liegen innerhalb einer Genauigkeit von 20 cm (s. Kapitel 4.4.1).

Gründe für unzureichende Datenqualität von einzelnen Punkten sind:

- **Eingeschränkte Begehbarkeit**  
Die hohe Abflusshöhe schränkt die Begehung mit dem dGPS Gerät ein. Einzelne Kolk-tiefen sind deshalb am Fritzenbach (2 Sperren) und Spissibach (3 Sperren) in Leissigen nicht vermessbar.  
Aufgrund von hohen Sperrhöhen und steilen Böschungen sind am Leimbach 3 Kolke und am Steinibach 2 Kolke nicht vermessbar.
- **Unzureichender Satellitenempfang**  
Der Satellitenempfang ist durch bewaldete Abschnitte am Chalberhönibach in Abschnitt A–D gering und schränkt die Aufzeichnung von Messpunkten mit ausreichender Datenqualität ein. Im unverbauten Abschnitt B am Fritzenbach können lediglich fünf Punkte mit einer ausreichenden Genauigkeit aufgezeichnet werden. Deshalb kann der Abschnitt nicht beurteilt werden (s. Kapitel 3.4.1).  
Unterhalb von Brücken kann die Kolk-tiefe am Büetschligraben und Steinibach in Dallenwil nicht vermessen werden.

### Datenqualität der Archivdaten

Die Qualität der Archivdaten ist ein wichtiger Aspekt für die Erklärung der kleinen Stichprobe der Stufe 3. Bezüglich der vorhandenen Längenprofilen der Archivdaten bestehen folgende Unsicherheiten:

- Keine Angabe des Messinstruments und Genauigkeit  
Ein bedeutsamer Nachteil der Datenqualität ist, dass bei den verwendeten Archivdaten das verwendete Messinstrument und der Messfehler nicht bekannt sind.
- Interpolierte Höhen des Gerinnes  
In unverbauten Abschnitten (Steinibach Dallenwil und Chalberhönbach) wird der Talweg nicht gemessen, sondern die Sohlenlage aus Messpunkten im Bachbett interpoliert. Die Darstellung der interpolierten Messpunkte hat zur Folge, dass die Sohlenlage allenfalls im Vergleich zur Vermessung des Talweges mit dem dGPS zu hoch dargestellt wird. Somit wird gegebenenfalls die Erosion überschätzt (s. Kapitel 4.4.2).
- Einzelne Projektdaten stellen die projektierte Sohlenlage dar  
In einzelnen Abschnitten mit Sperrentreppen entspricht die Sohlenlage zwischen den Sperren der projektierten und nicht der gemessenen Sohlenhöhe. In einzelnen Fällen wurden die Sperren jedoch nicht gemäss der Projektdaten erstellt. Somit entspricht die dargestellte projektierte Sohlenlage nicht der Sohlenlage im Gelände. Ausführungspläne sind teilweise nicht vorhanden. Deshalb kann die aktuelle Kolktiefe nicht mit gemessenen Archivdaten verglichen werden, sondern lediglich mit der projektierten Sohlenlage und die aktuelle Situation anhand der Höhe des Sperrfundaments beschrieben werden.

Mit Ausnahme von einzelnen Abschnitten weisen die dGPS Messungen genaue Profile über den gesamten Unterlauf auf. Insgesamt ist festzustellen, dass die Qualität der Archivdaten sehr unterschiedlich ist. Somit ist grösstenteils die Qualität der Projektdaten der einschränkende Faktor.

#### 4.4.2 Tiefenerosion in unverbauten Abschnitten

Unverbaute Abschnitte, welche sich für die Analyse der Tiefenerosion eignen, sind am Fritzenbach, Chalberhönibach und Steinibach vorzufinden. Der unverbaute Abschnitt B am Fritzenbach wird aufgrund der ungenauen dGPS Messung nicht weiter beurteilt.

Die gemessene Veränderung der Tiefenerosion ist untenstehend am Chalberhönibach und Steinibach aufgezeigt. Als erstes werden die Archivdaten und die Längenprofile der dGPS Messung dargestellt und anhand der veränderten Neigungsverhältnisse erläutert. Allfällige Besonderheiten der Tiefenerosion werden diskutiert und anhand der Feldbegehung und Experteninterviews plausibilisiert.

##### Chalberhönibach Saanen

Die Sohlenlage im Abschnitt D ist am Chalberhönibach mit dem Längenprofil der dGPS Messung und den Längenprofil vom Oktober 2010 vergleichbar. Die Archivdaten stellen die Sohlenlage nach dem geschiebeführenden Ereignis im Juli 2010 dar (Andres und Meier 2011). Da die gemessene Sohlenlage über den Abschnitt D exakt zehn Messungen aufweist, kann sie für die Beurteilung verwendet werden.

In der Abbildung 35 ist der Vergleich der Sohlenlage dargestellt. Das im Juni 2015 gemessene Profil (rot) weist über den gesamten Abschnitt eine tiefere Sohlenlage auf als die im Oktober 2010 gemessene Sohlenlage (grün). Im Vergleich zur Messung im 2010 ist die stärkste Tiefenerosion im Bereich von 400–760 m Entfernung des Vorfluters vorzufinden. Sie umfasst in diesem Bereich eine Tiefe bis zu 2 m. Im flacheren Abschnitt zwischen 0 und 400 m Entfernung der Mündung ist die Tiefenerosion mit ca. 1–2 m weniger stark ausgeprägt. Die Neigungsverhältnisse verändern sich in den Abschnitten mit Erosion nur geringfügig. Das Profil wird im oberen Abschnitt geringfügig steiler (+0.4 %) und im unteren Abschnitt geringfügig flacher (-0.4 %) vermessen.

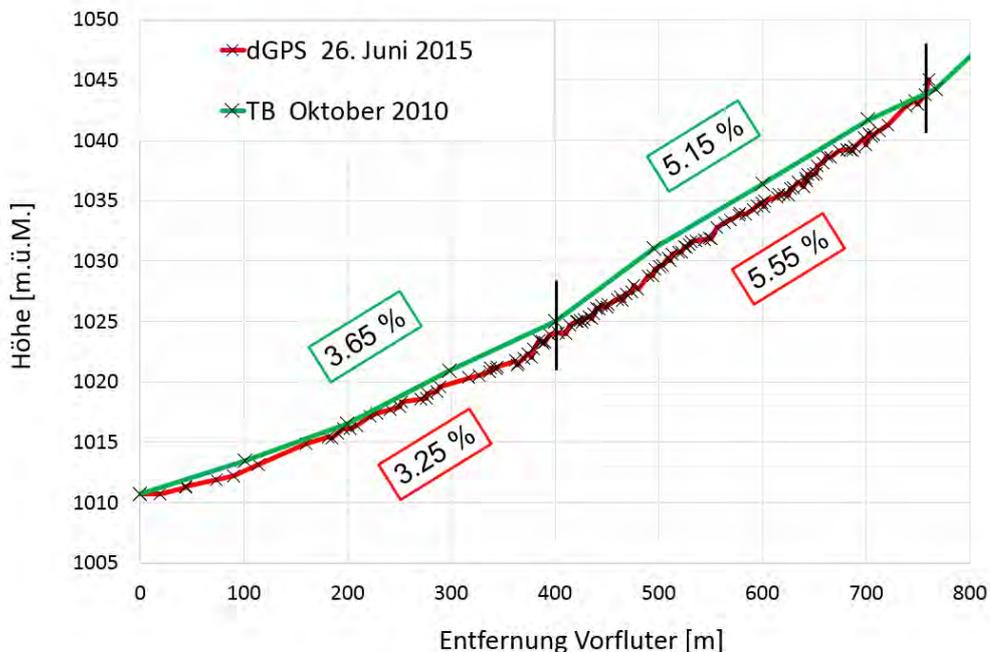


Abbildung 35: Vergleich Längenprofile am Chalberhönibach in Saanen im unverbauten Abschnitt D. Kreuz = Messpunkte, gestrichelte Linie = projizierte Sohle, durchgezogene Linie = Messung, TB = Technischer Bericht (Archivdaten), die Neigung wird pro Abschnitt angegeben.

Gemäss Angaben von Herrn Oerli (Präsident Schwellenkorporation Saanen) wurde die Sohle am 10. Juli 2015 (vor den dGPS Messungen) im Bereich von 50–150 cm eingetieft (Oerli 2015). Im Feld sind Böschungserosionen von 0.5 m–1 m Meter im unverbauten Abschnitt sichtbar. Die Erosion von 1-1.5 m ist anhand der Beobachtungen im Feld und der Aussage von Oehrli (2015) plausibel. Die gemessene Erosion >1.5 m–2 m kann anhand der Feldbeobachtung und Aussagen von Herr Oehrli nicht plausibilisiert werden. Als mögliche Unsicherheit kann der bereits beschriebene Fehler der interpolierten Messpunkte genannt werden.

### Steinibach Dallenwil

Am Steinibach in Dallenwil kann der Abschnitt B verglichen werden. Die Messungen von Schubiger AG stellen die Sohlenlage im März 2015 dar.

In der Abbildung 36 ist das Profil der Messung von Schubiger AG (grün) und die dGPS Messung (rot) aufgeführt. Das Längenprofil vom März 2015 weist innerhalb des Bereiches von 920 und 1075 m Entfernung des Vorfluters anhand der konvexen Form auf Ablagerungen hin. Anhand des Vergleichs des Längenprofils ist eine Erosion innerhalb dieses konvexen Bereichs festzustellen. Die maximale Tiefenerosion innerhalb von drei Monaten liegt bei nahezu 5 m. Anhand der Veränderung der roten Profillinie (Ist-Zustand) ist zu erkennen, dass sich die Neigungsverhältnisse deutlich verändern. Im oberen Bereich nimmt die Neigung um 5 % zu und im unteren Abschnitt wiederum ab.

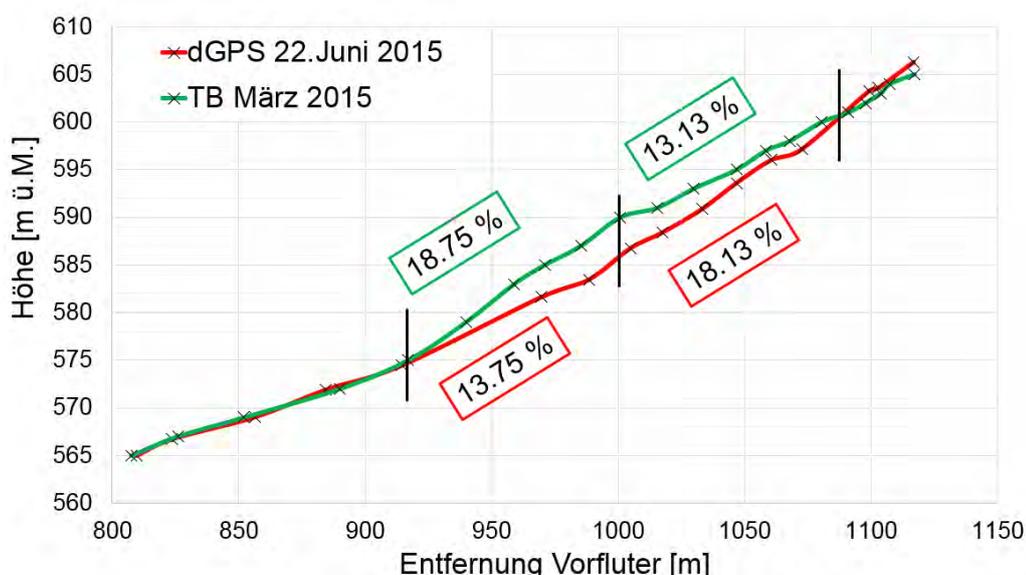


Abbildung 36: Vergleich Längenprofile am Steinibach in Dallenwil im unverbauten Abschnitt B. Kreuz = Messpunkte, die Neigung wird pro eingezeichnetem Abschnitt angegeben.

Die Böschungserosion von mehreren Metern ist im Gelände zu beobachten (s. Anhang D7). Im Wissen, dass die Böschungserosion oftmals mit der Tiefenerosion zusammenspielt (Lehmann 2001), ist die erhebliche Erosion der Böschung ein möglicher Hinweis auf die ausgeprägte Tiefenerosion im Gerinne. Werner Fessler (Kt. Nidwalden) bestätigt, dass aufgrund des Ereignisses anfangs Juni 2015 in der Sohle 3–5 m erodiert wurde und die unterste Sperre des Abschnittes A unterspült wurde (Fessler 2015). Somit kann bestätigt werden, dass eine lokal stark ausgeprägte Erosion basierend auf der Aussage von Fessler (2015) und der Beurteilung im Gelände anhand der Böschungserosion möglich ist.

### 4.4.3 Kolke unterhalb von Querwerken

Der Vergleich der gemessenen Kolktiefe mit Archivdaten ist in fünf Abschnitten des Fritzenbachs, Spissibachs Büetschliigraben, Leimbach und Steinibach möglich.

Da der Kolk grösstenteils die gesamte Flussbreite einnimmt, wird nicht jede Kolkbreite mit einem Querprofil erfasst. Die Flussbreite wird nur aufgenommen, wenn a) die Flussbreite variiert b) der Kolk nicht die gesamte Breite einnimmt oder c) wenn die effektive Gerinnebreite nicht den Angaben der Projektdaten entspricht. Trifft dies nicht ein, kann der Wert aus den Projektdaten verwendet werden. Die jeweilige Berechnung der Kolkgrössen der einzelnen Kolke ist im digitalen Anhang aufgeführt.

Die berechneten Kolke werden anschliessend in Bezug auf die Überfallhöhe verglichen und mit Informationen aus den Experteninterviews plausibilisiert.

Die Boxplots stellen die Kolktiefe (s. Abbildung 37) und der Kolkgrösse (s. Abbildung 38) dar. Die Kolkgrösse ist für Informationen zur Ausprägung der Erosion entscheidend. Für Aussagen der Stabilität der Sperre ist vor allem die Angabe der Kolktiefe relevant, indem sie für die Unterspülung des Sperrenfusses massgebend ist.

Die grössten Kolketiefen treten am Spissibach auf, gefolgt vom Steinibach (Abbildung 37). Die Kolktiefe am Fritzenbach und Leimbach weisen eine ähnliche Verteilung auf. Die kleinsten Tiefen werden am Büetschliigraben gemessen.

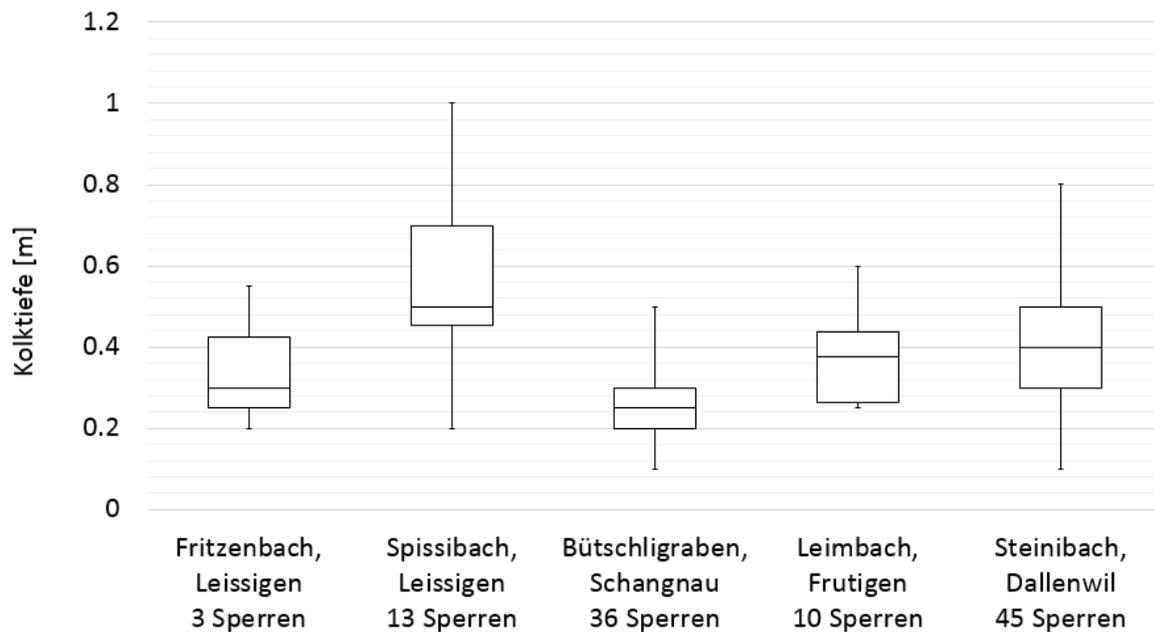


Abbildung 37: Vergleich der einzelnen Kolketiefen unterhalb von Querwerken der untersuchten Unterläufe der Stufe 3. Erklärung der Boxplot-Darstellung von unten nach oben: untere Antenne = min. Wert, unteres Quantil = 25 % der kleinsten Werte, Median, oberes Quantil = 75 % der kleinsten Werte, obere Antenne = max. Wert.

In der Abbildung 38 sind die berechneten Kolkgrössen dargestellt. Die ausgeprägtesten Kolkgrössen werden am Spissibach und die kleinsten am Büetschligraben gemessen. Der Fritzenbach weist im Vergleich zur Kolktiefe grosse Kolkvolumina auf. Die Kolkgrössen am Leimbach und Steinibach verhalten sich ähnlich wie die Kolkiefen.

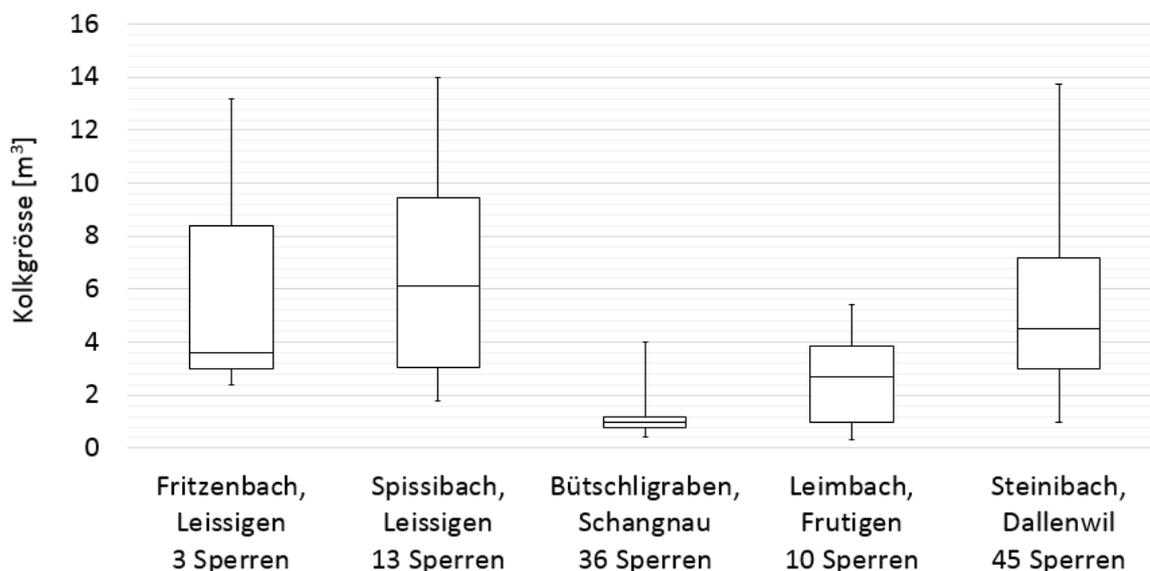


Abbildung 38: Vergleich der einzelnen Kolkgrössen unterhalb von Querwerken der untersuchten Unterläufe der Stufe 3. Erklärung der Boxplot-Darstellung von unten nach oben: untere Antenne = min. Wert, unteres Quantil = 25 % der kleinsten Werte, Median, oberes Quantil = 75 % der kleinsten Werte, obere Antenne = max. Wert.

Im Folgenden werden die berechneten Kolkiefen und Kolkgrössen anhand der einzelnen Unterläufe diskutiert und anschliessend miteinander verglichen. Die Erläuterungen basieren auf den Abbildungen 37 und 38.

### Fritzenbach Leissigen

Die Kolktiefe kann an den drei oberen Sperren am Fritzenbach berechnet werden. Die Sperren weisen eine Überfallhöhe von je 1.20 m auf. Die grösste Tiefe von 0.55 m wird bei der Sperre 1 gemessen. Die Sperren 2 und 3 weisen eine Kolktiefe von 0.2 m und 0.3 m auf. Zudem nehmen alle Kolke die gesamte Gerinnebreite von 6 m ein.

Das grösste Kolkvolumen von 13.2 m<sup>3</sup> befindet sich bei der Sperre 1. Die grosse Tiefe wird durch die ausgeprägte Länge von 4 m bestätigt. Die Kolkgrössen der Sperren 2 und 3 sind mit der kleineren Kolktiefe und einer Kolklänge von 2 m mit einem Volumen von 2.4 m<sup>3</sup> und 3.6 m<sup>3</sup> wesentlich kleiner, wodurch auch die ausgeprägte Abweichung der Kolkgrössen am Fritzenbach entsteht (s. Abbildung 38). Gemäss den Beobachtungen von Herrn Dähler (Kissling und Zbinden AG) wird im Unterlauf eine Sohlenerosion bestätigt (Dähler 2015).

### **Spissibach Leissigen**

Bei der Erläuterung der Resultate der Kolkiefen muss beachtet werden, dass der Geschiebesammler während dem Frühjahr 2015 umgebaut wurde. Durch den grösseren Durchlass auf Gerinnehöhe (Dähler 2015) ist eine kleinere Ausprägung der Kolkgrösse zu erwarten. Es ist unklar, ob die aktuellen Auswirkungen der ausgeprägten Kolke durch den alten oder neuen Geschiebesammler entstanden sind. Die effektiven Auswirkungen im Unterlauf sind zu diesem Zeitpunkt noch nicht eindeutig von den früheren Bedingungen zu trennen. Informationen zum Zustand des Unterlaufs vor dem Umbau des Sammlers sind aus den Projektdaten nicht ersichtlich.

Die 13 berechneten Kolke am Spissibach weisen im Mittel eine Tiefe von 0.5 m auf und sind somit die grössten Kolkiefen der fünf Unterläufe (s. Abbildung 37). Die Kolkiefe der einzelnen Sperren variiert zwischen 0.2 m (Sperre 5) und 1 m (Sperre 1). Die ausgeprägten Kolkiefen entstehen durch die grosse Überfallhöhe der Sperren von bis zu 1.5 m.

Der grösste Kolk am Spissibach weist  $14 \text{ m}^3$  auf und wird bei der Sperre 1 gemessen. Dieser ist gleichzeitig auch der grösste gemessene Kolk der Auswertung. Auch das Mittel der berechneten Kolkgrössen am Spissibach liegt mit  $6 \text{ m}^3$  deutlich über den weiteren Unterläufen.

### **Büetschligraben Schangnau**

Von den insgesamt 57 Sperren können 36 aufgrund der dGPS Messung berechnet werden. Die Spannweite der Kolkiefen liegt zwischen 0.1 und 0.5 m. Die Gerinnebreite umfasst über den gesamten Unterlauf 4 m. Die Kolkiefen fallen vergleichsweise gering aus, da Sohlenhölzer auch vermessen werden. Diese weisen eine vergleichsweise bescheidene Überfallhöhe auf. Zudem weisen die Betonsperren eine Überfallhöhe von max. 65 cm auf. Die vergleichsweise kleinen Kolkiefen können jedoch nicht mit einer geringen Ausprägung der Erosion gleichgesetzt werden, da auch am Büetschligraben einzelne Sperren umspült werden oder teilweise eingestürzt sind. Diese Instabilitäten werden von Herrn Gerber von der Schwellenkorporation Schangnau nicht angesprochen. Im Vergleich zu den umliegenden Wildbächen führt der Büetschligraben zu kleinen Problemen (Gerber 2015).

Die Kolkgrösse zwischen  $0.4$  und  $4 \text{ m}^3$  ist im Vergleich zu den weiteren Unterläufen noch geringer, da der Büetschligraben nicht nur die geringsten Kolkiefen und Überfälle, sondern auch die kleinste Flussbreite aufweist.

### **Leimbach Frutigen**

Von den 16 Sperren im beurteilten Abschnitt A können 10 Kolke mit den dGPS Punkten berechnet werden. Die Kolkiefe variiert zwischen 0.25 und 0.6 m. Wie auch der Spissibach weist der Leimbach im Mittel eine Überfallhöhe von 1.5 m auf. Die mittlere Kolkiefe (0.37 m Kolkiefe) ist jedoch 13 cm tiefer als jene am Spissibach.

Die geringere Tiefe führt anhand der Kolkbreite von 1–5 m zu deutlich kleineren Kolkvolumen als am Spissibach (s. Abbildung 38). Auch die Kolklänge ist mit max. 3 m eher gering ausgeprägt. Gemäss Herrn Feuz (Strasseninspektorat OIK I, Bern) sind durch die aktuelle Ausprägung der Kolke keine baulichen Massnahmen notwendig. Lediglich im Abschnitt B sind Wiederherstellungsmassnahmen von ausgespülten Blöcken (durch das Alter der Verbauung) im Raubettgerinne notwendig (Feuz 2015).

**Steinibach Dallenwil**

Die Sperren verteilen sich am Steinibach über zwei Abschnitte (A und C). Mit Ausnahme von vier Sperren (eingeschränkte Begehbarkeit) können bei 49 Sperren die Kolkiefen und Kolkgrößen mit dem dGPS aufgenommen werden. Die Spannweite der Kolkiefen liegt zwischen 0.1 und 0.8 m. Dies erfolgt durch die vergleichsweise kleinen Überfälle von 0.5 m der untersten Sperren und der Sperrenhöhe von bis zu 1.2 m der obersten Sperren. Die mittlere Sperrenhöhe liegt bei 1 m. Die Gerinnebreite umfasst im Abschnitt A 11 m und im Abschnitt C 15 m.

Aufgrund dessen werden Kolkvolumina von bis zu 13.75 m<sup>3</sup> berechnet. Fessler (2015) bestätigt, dass die ausgeprägten Kolke ein Problem darstellen. Nach dem letzten Ereignis wurde jeweils die unterste Sperre der beiden Abschnitte unterspült. Durch die selbsttätige Entleerung des Sammlers nach dem Ereignis hat sich die Kolkiefe innert weniger Wochen wieder stabilisiert (Fessler 2015).

**Fazit Stufe 3**

*Die Tiefenerosion kann lediglich in zwei unverbauten Abschnitten und in sechs Abschnitten mit Sperrentreppen beurteilt werden. Trotz der kleinen Stichprobe kann aufgezeigt werden, dass die Tiefenerosion in unverbauten Abschnitten innerhalb von wenigen Jahren erheblich ausgeprägt ist. Die Vermessung der Kolkiefe weist grösstenteils auf ausgeprägte Kolke und einzelne unterspülte Sperren hin.*

## 5. Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die zentralen Resultate der drei Stufen interpretiert und mit Stärken und Schwächen der angewendeten Methoden kritisch bewertet.

### 5.1 Visuelle Identifikation: Stärken und Schwächen (Stufe 1)

Mittels der visuellen Interpretation der Luft- und Satellitenbilder ist zu erkennen, dass an geschiebearmen Unterläufen teilweise erhebliche erosive Tendenzen auftreten. Am Spissibach in Leissigen und am Steinibach in Dallenwil ist beispielsweise die Bildung von Kolken zwischen den Sperrern am Ende der Sperrentreppe sehr stark ausgeprägt. Auf den Luft- und Satellitenbildern ist zudem mit Ausnahme von acht Mündungen (Spissibach Leissigen, Val Zuondra Celerina, Steinibach Dallenwil, Steinibach Hergiswil, Chessibach Altendorf, Valle di Gerra Gambarogno, Rotenbach und Schwändlibach Plaffeien) kein Kegel erkennbar.

In der Beurteilung der Stufe 1 werden 72 % der 50 Unterläufe als geschiebearm, 28 % als umlagernd und 0 % als ablagernd kategorisiert. Wie erwartet dominieren im Unterlauf geschiebearme Bedingungen infolge des Feststoffrückhalts und der -entnahmen an Geschiebesammlern (Romang 2004). Die vorherrschenden geschiebearmen Bedingungen werden aufgezeigt, indem kein Unterlauf mit eindeutig ablagernden Bedingungen identifiziert wird (mit Ausnahme von kürzeren ablagernden Strecken in umlagernden Abschnitten).

Die entwickelte Methode der visuellen Identifikation von Luft- und Satellitenbildern sowie topographischen Karten wird durch Stärken und Schwächen aufgelistet und beschrieben. Diese basieren auf der Anwendung der Stichprobe der Stufe 1.

#### **Stärken der visuellen Interpretation von Luft- und Satellitenbildern sowie topographischen Karten**

- **Zufriedenstellende Abschätzung**  
Die Beurteilung ist als Abschätzung für geschiebearme Bedingungen geeignet. Die Unterläufe können anhand des Beurteilungsrasters zutreffend interpretiert werden, da die Beurteilungen des Gerinne- und Mündungs-Indexes die festgestellten geschiebearmen Bedingungen bestätigen.
- **Geringer Zeitaufwand bestätigt**  
Ohne aufwändige Feldbegehung kann mit öffentlich zugänglichen Datengrundlagen eine erste Abschätzung der geomorphologischen Bedingung erfolgen.
- **Interpretation unterschiedlicher Quellen**  
Durch unterschiedliche Quellen der Luft- und Satellitenbilder (swisstopo und Google Earth) besteht die Möglichkeit, verschiedene Darstellungen des Unterlaufes zu ähnlichen Zeitpunkten zu beurteilen.

## Schwächen der visuellen Interpretation von Luft- und Satellitenbildern sowie topographischen Karten

- Begrenzte Auflösung der Luft- und Satellitenbilder  
In Einzelfällen ist die Identifikation von Feststoffablagerungen aufgrund der begrenzten Auflösung der Luft- und Satellitenbilder eingeschränkt. Dies trifft ein, wenn der Durchmesser von Blöcken <30 cm ist. Sind zudem auf der topographischen Karte keine Ablagerungen im Gerinne kartiert, ist der Zustand im Gelände zu beurteilen.
- Eingeschränkte Sichtbarkeit des Kegels- bzw. des Kolks im Vorfluter  
Die Identifikation eines Kegels oder Kolken im Vorfluter kann durch eine turbulente Strömung im Vorfluter oder durch grosse Wassertiefen in Seen eingeschränkt sein. Ist auch anhand von älteren Luftbildern (2000–2010) keine eindeutige Interpretation möglich, ist die Mündung im Gelände zu beurteilen.
- Interpretation von unterschiedlichen Zeitpunkten  
Die Luft- und Satellitenbilder und Karten stellen meistens nicht den unmittelbaren Zustand des Unterlaufs dar. Die Angabe des Aufnahmezeitpunkts ist deshalb zwingend.  
Zudem können durch zeitlich unterschiedliche Luft- und Satellitenbilder verschiedene Zustände abgebildet werden. Bei unterschiedlichen Bedingungen wird die aktuellste Aufnahme verwendet, insofern diese nicht durch bauliche Massnahmen beeinflusst ist.

Eine Überprüfung der einzelnen Abschnitte im Gelände ist notwendig, wenn die Beurteilung durch die genannten Schwachpunkte nur eingeschränkt möglich ist.

### *Fazit Stufe 1*

*Die entwickelte Methode erfüllt das Ziel einer ersten Abschätzung für die Festlegung der Stichprobe. Die Unsicherheiten der visuellen Interpretation von Luft- und Satellitenbildern sowie topographischen Karten müssen jedoch beachtet werden. Die Annahme von dominierenden geschiebearmen Bedingungen kann anhand der Stichprobe bestätigt werden.*

## 5.2 Erkenntnisse Indexierung (Stufe 2)

Die entwickelte Methode der Indexierung ermöglicht die Rückhaltewirkung mit der Erosion im Unterlauf und den Verhältnissen an der Mündung zu vergleichen und dadurch die Auswirkungen von Geschiebesammlern auf den Unterlauf festzustellen.

Nachfolgend werden in einem ersten Schritt die Stärken und Schwächen der drei erstellten Indizes diskutiert. Einige Schwächen treten lediglich in Einzelfällen auf. Somit darf die Qualität der Indizes nicht durch die Anzahl der Schwächen und Stärken beurteilt werden.

Unterschiedliche Beurteilungen werden im Weiteren mit möglichen, nicht beurteilten Einflussfaktoren ergänzt.

### 5.2.1 Gerinne-Index: Stärken und Schwächen

Bei der Stichprobe der 15 Unterläufe der Stufe 2 ist aufgrund der Auswahlkriterien Erosion zu erwarten (s. Kapitel 3.1). Die Resultate des Gerinne-Indexes zeigen, dass 14 von 15 Unterläufen stark bis sehr stark ausgeprägte Erosionsphänomene im Unterlauf aufweisen. Die Stichprobe zeigt zudem, dass die Auslegung des Gerinne-Indexes auch mässige Ausprägungen der Erosion erfassen kann (Bsp. Schwarzbach in Lauenen).

Die Beurteilung des Gerinne-Indexes von 15 Unterläufen von Geschiebesammler der Datenbank Solid ermöglicht erste Erkenntnisse der Stärken und Schwächen des Gerinne-Indexes aufzuführen.

#### **Stärken des Gerinne-Indexes**

- **Starke Ausprägung der Erosion kann erfasst werden**  
Die starke Ausprägung der Erosionsphänomene im unverbauten Unterlauf am Chalberhönibach in Saanen (Oehrli 2015) und Steinibach in Dallenwil (Fessler 2015) kann erfasst werden (s. Kapitel 4.4.2).
- **Beurteilung von unterschiedlichen Formen der Erosion**  
Die Beurteilung von vier unterschiedlichen Formen der Erosion ermöglicht eine breit abgestützte Erfassung des Zustandes. Zudem können spezifische lokale Veränderungen erfassen werden.
- **Information der Ausprägung der Erosion des gesamten Unterlaufs**  
Die Beurteilung des Gerinnes und der Mündung ist kaum durch die Begehbarkeit eingeschränkt. Da die Beurteilung der einzelnen Abschnitte gemittelt wird, können kürzere nicht begehbare Teilstrecken vernachlässigt werden.
- **Unabhängige Beurteilung der Stärke der Verbauung**  
Der Korrekturfaktor der Verbauung ermöglicht, die Auswirkungen der zu erwartenden Erosion auch für stark verbaute Abschnitte zu beurteilen. Zudem kann der gesamte Unterlauf einheitlich beurteilt werden.

## Schwächen des Gerinne-Index

- **Keine Berücksichtigung des geologischen Untergrunds des Gerinnes**  
Der geologische Untergrund wird im Gerinne-Index nicht berücksichtigt, da die meisten Abschnitte der Stichprobe auf Lockermaterial verlaufen. Einzig der Abschnitt B am Chalberhönibach verläuft auf anstehendem Gestein. Würde dies vermehrt eintreffen, wäre zu prüfen, ob die Tiefenerosion durch unterschiedliche Erosionswiderstände aufgrund der Lithologie in Form eines Korrekturfaktors einheitlich beurteilt werden sollte.
- **Herausforderung der Bestimmung der Referenzhöhe der Tiefenerosion**  
Die Referenzhöhe der Sohlenlage ist nicht in allen Abschnitten eindeutig bestimmbar. Sind keine Terrassenhöhen oder wasserbaulichen Massnahmen wie Querwerke vorhanden, ist die Festlegung der ursprünglichen Höhe der Gerinnesohle nicht eindeutig. Diese Unsicherheit ist eine mögliche Erklärung für die vergleichsweise geringe Ausprägung der Tiefenerosion in den Abschnitten (s. Kapitel 4.3.2, Tiefenerosion).
- **Schwierigkeit der Abgrenzung von Hangrutschungen und Böschungserosion**  
Die Abgrenzung von Hangrutschungen, welche nicht durch das Gerinne beeinflusst werden und Böschungserosion, welche durch den direkten Abtrag des Böschungsfusses bedingt wird, ist nicht immer eindeutig. Unsicherheiten treten beispielsweise direkt unterhalb des Geschiebesammlers in Saanen auf der orographisch linken Seite auf. Aufgrund der Konnektivität mit dem Gerinne wird in diesem Beispiel von einer gegenseitigen Beeinflussung ausgegangen.  
Für eine einheitliche Beurteilung der Gefahrenprozesse der Ufererosion wurde im Herbst 2015 eine Empfehlung zur Bestimmung des Ausmasses der Ufererosion von Hunzinger et al. entwickelt. Parameter des Böschungswiderstands (Korngrössen, Feuchtegehalt, Vegetation etc.) können integriert werden (Hunzinger 2015), wenn eine detailliertere Beurteilung erwünscht ist.
- **Möglicher Einfluss der Neigung**  
Die Neigungsverhältnisse könnten eine direkte Auswirkung auf die Erosion haben. Dies ist im Index integriert, da auf dem Schwemmkegel eine mehr oder weniger einheitliche geringe Neigung angenommen wird.  
Die Tiefenerosion kann aufgrund der geringen Neigung von einzelnen Abschnitten (Schwarzbach in Lauenen oder Melbach in Kerns) unterschätzt werden. Dementsprechend besteht die Möglichkeit, dass aufgrund von einer grösseren Neigung ausgeprägtere Eintiefungen entstehen können. Es ist zu prüfen, ob die Neigung gegebenenfalls im Index als Korrekturfaktor berücksichtigt werden sollte. Beispielsweise kann angenommen werden, dass Erosion in einem steilen Abschnitt ausgeprägter ist als in einem flachen Abschnitt.

- Interpretation von fehlenden Feststoffablagerungen in verbauten Schalen  
Durch die erhöhte Transportkapazität werden kaum Feststoffe in Schalen abgelagert. Zudem ist die Wahrscheinlichkeit gering, dass während der Feldbegehung Ablagerungen vorhanden sind. Die Feststoffe werden nur für kürzere Zeit abgelagert und sind somit stark vom Zeitpunkt der Feldbegehung sowie des letzten Ereignisses abhängig. Während der Feldbegehung wurden einzig am Spissibach Ablagerungen in der Schale identifiziert. Die restlichen Abschnitte werden aufgrund der fehlenden Ablagerung der Feststoffe (s. Tabelle 16) als sehr starke Ausprägung der Erosion beurteilt.

### 5.2.2 Mündungs-Index: Stärken und Schwächen

Die Beurteilung des Mündungs-Indexes zeigt, dass in 13 von 14 Wildbächen stark bis sehr stark ausgeprägte geschiebearme Verhältnisse im Vorfluter vorherrschen. An keiner der 14 Mündungen werden Akkumulationsphänomene in Form eines Kegels festgestellt. Einzig an einer Mündung ist eine Fahne zu erkennen. Da im Unterlauf der Fahne eine geringe Erosion stattfindet, ist davon auszugehen, dass die Fahne ein Indikator für ablagernde Phänomene ist. Ein eindeutiger Kegel wird an keiner Mündung identifiziert. Die Beurteilung des Mündungs-Index bestätigt somit die geschiebearmen Bedingungen der Stichprobe der Stufe 2. Aufgrund der Beurteilung der 15 Mündungen kann auf die folgenden Stärken und Schwächen des Mündungs-Indexes hingewiesen werden:

#### **Stärken des Mündungs-Indexes**

- Eindeutige Identifikation  
Die Kegel- bzw. Kolkbildung ist im Vorfluter grösstenteils eindeutig zu identifizieren. Die vereinfachte Beurteilung von lediglich einem Faktor ist sinnvoll, da er stellvertretend für die Gesamtheit der Erosions- und Ablagerungsprozesse im Einzugsgebiet und Unterlauf ist.
- Kaum Einschränkungen der Beurteilung  
Mit Ausnahme von renaturierten Abschnitten und der Beurteilung einer Momentaufnahme sind keine weiteren Einschränkungen der Beurteilung bekannt.

#### **Schwächen des Mündungs-Indexes**

- Feststofflieferung und Bewirtschaftung des Geschiebesammlers nicht berücksichtigt  
Die Kegelbildung ist von der Feststofflieferung und der Bewirtschaftung des Geschiebesammlers abhängig. Da die beiden Parameter nicht auf das Einzugsgebiet normiert sind, können die Faktoren nicht direkt im Index berücksichtigt werden. Nachfolgend ist der Vergleich mit den Entnahmehöhen der DB Solid möglich (s. Kapitel 5.2.4).

- **Mögliche Fehlerquelle der Beurteilung einer verbauten Gerinnesohle im Vorfluter**  
Die Bildung eines Kolkkes (Index-Wert 4) ist nicht möglich, wenn die Gerinnesohle des Vorfluters durch eine Schale oder eine gepflästerte Sohle verbaut ist. Ohne die Verbauung des Vorfluters ist jedoch eine Kolkbildung nicht auszuschliessen. Im Wissen der Unsicherheit erfolgt die Beurteilung innerhalb der Index-Werte 1–3. Diese Situation trifft einzig am Nidlaubach in Unteriberg ein. Da keine Ablagerungen vorhanden sind, wird der Wert 3 gewählt. Sind in einer weiteren Stichprobe mehrere Mündungen stark verbaut, müsste der Aspekt in Form eines Korrekturfaktors oder einer Normierung integriert werden.
- **Interaktion des Unterlaufs mit dem Vorfluter**  
Die Kegelbildung ist zudem von der Transportkapazität des Vorfluters abhängig. Diese dynamische Interaktion wird nicht beurteilt, da angenommen wird, dass die Abtragung des Vorfluters durch eine Fahne sichtbar wäre.

### 5.2.3 Rückhalte-Index: Stärken und Schwächen

Die Beurteilung des Rückhalte-Indexes ergibt in 14 von 15 Geschiebesammlern eine effiziente bis sehr effiziente Rückhaltewirkung. Bei der Interpretation der Rückhaltewirkung muss beachtet werden, dass die Beurteilung eine Abschätzung ist. Gemäss Bergmeister et al. (2009) bestehen keine einheitlichen Methoden zur Beurteilung von unterschiedlichen Geschiebesammlern.

Die folgenden Stärken und Schwächen werden anhand der Beurteilung der Unterläufe identifiziert:

#### **Stärken des Rückhalte-Indexes**

- **Für unterschiedliche Typen von Geschiebesammlern geeignet**  
Die einzigen Bedingungen für die Beurteilung der Rückhaltewirkung eines Geschiebesammlers sind, dass ein Absperrbauwerk konstruiert ist und die Öffnung statisch ist. Bei den restlichen Typen von Absperrbauwerken ist eine Beurteilung möglich.
- **Vereinfachung der Rückhaltewirkung**  
Die Beurteilung der Rückhaltewirkung des Geschiebesammlers wird durch die Reduktion auf Faktoren des Absperrbauwerkes (Grösse und Orientierung der Öffnung) sowie der Korngrösse ( $d_{90}$ ) im Ablagerungsraum stark vereinfacht. Diese Vereinfachung ist erforderlich, damit die Faktoren bei allen Geschiebesammlern der Stichprobe beurteilt werden können. Somit ermöglicht der Rückhalte-Index eine Abschätzung von unterschiedlichen Typen von Geschiebesammlern. Zudem ist die Datengrundlage der relevanten Aspekte der Rückhaltewirkung eingeschränkt (s. Kapitel 3.3.2). In den Projektdaten von älteren Geschiebesammlern (vor 2000) wird nicht oder nur sehr kurz auf die Funktionsweise des Geschiebesammlers eingegangen. Effektive Messungen, Modellversuche in Bezug auf die Geschiebeführung im Unterlauf (s. Kapitel 1.1.2) werden einzig bei jüngeren Geschiebesammlern durchgeführt (Saanen Chalberhönibach und Steinibach Dallenwil).

### Schwächen des Rückhalte-Indexes

- Abschätzung Korngrösse (d90)  
Die Abschätzung der Korngrösse d90 gibt einen Hinweis auf die Versperrung der Öffnungen. Sie ist für eine erste Beurteilung der Rückhaltewirkung ausreichend. Für die Rückhaltewirkung sind jedoch auch die kleineren Komponenten relevant. Linienzahl- und Siebanalysen (Fehr 1987) können für eine detailliertere Erfassung der Korngrössenverteilung angewendet werden.
- Beurteilung Selbstentleerung nicht möglich  
Aufgrund mangelnder Information der Wirkungsweise der Geschiebesammler kann nicht beurteilt werden, ob während dem Ereignis in nennenswertem Ausmass Feststoffe durch eine Selbstentleerung abtransportiert werden können (Romang 2004). Dieser Faktor kann die Rückhaltewirkung bei geringer Geschiebeführung gegebenenfalls stark verringern (Hasegawa 2004).
- Basiert auf Abschätzung  
Eine fundierte Beurteilung ist gemäss Bergmeister et al. (2009) durch fehlende Abschätzmethoden nicht möglich. Die Rückhalte-Indexe der Sammler können einzig durch Abschätzungen von Experten (DB Solid 2015) und dem direkten Vergleich der Index-Werte zwischen den Geschiebesammlern plausibilisiert werden.

#### 5.2.4 Vergleich der drei Indizes: Begründung der Unterschiede

Mit den Indizes können die geomorphologischen Auswirkungen des Geschiebesammlers auf den Unterlauf vergleichend erfasst werden.

Die Beurteilung zeigt bei 13 von 15 Wildbächen, dass die starke Ausprägung der Erosion und das Geschiebedefizit an der Mündung durch eine effiziente Rückhaltewirkung im Zusammenhang stehen.

Für die Erklärung der unterschiedlichen Indexierung der drei Indizes (s. Abbildung 34) werden nicht beachtete Aspekte herbeigezogen. Mögliche Gründe für keine Übereinstimmung ( $\neq$  ausserhalb von 1 Index-Wert) werden im Folgenden an den acht Wildbächen diskutiert.

#### Fritzenbach Leissigen

Der Fritzenbach weist anhand des Gerinne- und Mündungs-Indexes ein ausgeprägtes Geschiebedefizit auf und auch die Rückhaltewirkung wird als sehr effektiv beurteilt. Dennoch liegt der Unterschied mit 1.06 Index-Werten geringfügig höher als die tolerierte Abweichung von 1 Index-Wert.

Die effiziente Rückhaltewirkung kann durch die nicht beurteilte Grösse des Absperrbauwerks mit einer Höhe von 8.5 m und einer Breite von 22 m bestätigt werden. Zudem ist aus der Wildbachgeschichte (Jörger 2012) ersichtlich, dass seit dem Bau des Sammlers im Jahre 1984 keine Schäden im Unterlauf aufgezeichnet wurden. Durch das gesamte Entnahmevermögen von knapp 5700 m<sup>3</sup> am Geschiebesammler, kann die Aktivität von kleineren Ereignissen während den letzten Jahren bestätigt werden.

Eine Möglichkeit für die weniger stark ausgeprägten Erosionsphänomene ist, dass der vergleichsweise geringe Gerinne-Index unter anderem durch die mässig ausgeprägten Erosionsphänomene im unverbauten Abschnitt B zu Stande kommt. Mögliche Unterschätzungen der Tiefenerosion werden in Kapitel 4.3.2, Tiefenerosion erläutert.

### **Leimbach Frutigen**

Am Leimbach liegen die Beurteilungen der Mündung und der Rückhaltewirkung mit 1.15 Index-Werten nur geringfügig ausserhalb der festgelegten Toleranzgrenze.

Eine Möglichkeit ist, dass die Rückhaltewirkung effizienter als erwartet ist. Die bewaldete Fläche des Einzugsgebietes von 38 % (Datenbank Solid 2015) könnte die Möglichkeit von Verklausungen am Geschiebesammler durch Schwemmholz erhöhen.

Da der Kolk im Vorfluter eindeutig identifiziert wird, gelangen zum Zeitpunkt der Feldbegehung kaum Feststoffe in den Vorfluter.

Das Ausbleiben von Ereignissen kann ausgeschlossen werden, da über die knapp 10 aufgezeichneten Jahre am Geschiebesammler insgesamt 8500 m<sup>3</sup> Material entnommen wurde. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass während den Monaten vor der Feldbegehung kleinere Ereignisse mit Feststoffablagerungen ausblieben. Somit wäre die Erosion des aktuellen Zustands leicht höher als während den vorherigen Monaten.

### **Schwarzbach Lauenen**

Mässig ausgeprägten Erosionsphänomene in Lauenen werden nicht mit einer mässigen Rückhaltewirkung bestätigt, sondern divergieren mit einer effizienten Rückhaltewirkung (1.25 Index-Werte Abweichung). Es ist anzunehmen, dass der Schwachpunkt der Beurteilung beim Rückhalte-Index liegt. Durch das kleinste Mass von 0.2 m ist ein geringer Durchlass anzunehmen. Ablagerungen auf dem Absperrbauwerk zeigen, dass ein jüngeres Ereignis den Sammler gefüllt hat und offensichtlich Feststoffe über die Überlastsektion in den Unterlauf transportiert wurden. Diese Erklärung der Überströmung ist durch die vergleichsweise geringe Höhe des Absperrbauwerkes von 4.5 m plausibel.

Die mögliche Fehlerquelle, dass die Verhältnisse der Fahne auf geschiebearme Verhältnisse im Unterlauf hinweist kann ausgeschlossen werden, da die Erosion im Unterlauf nur mässig ausgeprägt ist.

### **Hummligenbach Wolfenschiessen**

Die Abweichung zwischen der sehr effizienten Rückhaltewirkung und der stark ausgeprägten Erosion im Unterlauf liegt bei 1.18 Index-Wertem. Am Hummligenbach werden die Verhältnisse an der Mündung durch die kürzlich erfolgte Renaturierung nicht beurteilt. Die effiziente Rückhaltewirkung kann durch den schmalen Rechenabstand von 10 cm als realistisch beurteilt werden. Die kleine Abweichung von 1.18 kann durch eine mögliche Unterschätzung der Erosion in stark verbauten Abschnitten erklärt werden. Die Erosion im Unterlauf wird durch die starke Verbauung der Böschung, die Schale und vor allem auch durch den Kolkschutz verhindert. Es ist möglich, dass der Korrekturfaktor die mögliche Erosion ohne Verbauung leicht unterschätzt. Der Faktor der Korrektur ist eine Annahme, da die mögliche Erosionswirkung nicht beobachtet, sondern lediglich abgeschätzt werden kann. Die beschriebene Unterschätzung der Erosion ist somit möglich, jedoch nicht abschliessend überprüfbar.

### **Melbach Kerns**

Der Melbach ist der einzige Wildbach mit einem hohen Mündungs-Index, welcher durch die Erosion im Gerinne und der Rückhaltewirkung nicht bestätigt wird. Der Mündungs-Index hat einen Unterschied von 1.19 Index-Werten zum Gerinne-Index und eine Differenz von 1.125 Index-Werten zum Rückhalte-Index.

Der Kolk an der Mündung ist eindeutig zu erkennen. Da die Mündung über eine Sperre mit einer Überfallhöhe von knapp 1 m geführt wird, ist der Umstand des Überfalls für die

Kolkbildung förderlich. Dieser Aspekt wird im Mündungs-Index nicht beurteilt. Unter Annahme des überschätzten Mündungs-Indexes wäre die Beurteilung übereinstimmend.

### **Dürrbach Engelberg**

Die Abweichung der Rückhaltewirkung und der Erosion im Unterlauf sowie den Verhältnissen an der Mündung ist mit 1.03 Index-Werten sehr gering. Durch die Vollsperre ist der Geschieberückhalt sehr effizient. Wiederum könnte die mögliche Erosion im stark verbauten Unterlauf trotz der Korrektur der Verbauung geringfügig unterschätzt werden (s. Erklärung Hummligenbach).

### **Chessibach in Altendorf**

Am Chessibach wird die Rückhaltewirkung als sehr effizient und die Erosion im Unterlauf sowie die Verhältnisse an der Mündung lediglich als stark geschiebearm beurteilt. Die Abweichung liegt bei 1.22 Index-Werten. Aufgrund der drei kleinen Öffnungen mit einem Durchmesser von je 0.18m<sup>2</sup> kann die Beurteilung der sehr effizienten Rückhaltewirkung als korrekt erachtet werden. Mit Ausnahme vom Abschnitt A sind Böschungen, aber auch die Gerinnesohle stark verbaut. Der geringfügige Unterschied könnte wiederum durch eine leichte Unterschätzung der Wirkung der Verbauung auftreten (s. Erklärung Hummligenbach).

### **Kummetbach Attinghausen**

Die Abweichung am Kummetbach ist mit 2.625 Index-Werten deutlich. Am Beispiel des Kummetbachs wird aufgrund der Erhebung die Erosion im Vergleich zur Rückhaltewirkung überschätzt.

Der Fokus wird auf das nicht beurteilte Alter der Blocksperrern gelegt. Die Blocksperrern wurden im Jahr 1984/85 gebaut. Eine nachträgliche Sanierung ist nicht bekannt (Gertsch 2004). Die mögliche Erklärung ist, dass aufgrund des Alters und nicht aufgrund der Erosion einzelne Blöcke aus Sperrern ausgespült oder überdies Sperrern eingestürzt sind. Da im Vorfluter eindeutig ein Kolk identifiziert wird, werden kaum Feststoffe bis in den Vorfluter transportiert. Die Erklärung einer effizienteren Rückhaltewirkung ist jedoch nicht zufriedenstellend, da die Öffnungen im Vergleich zu den weiteren Geschiebesammler (3 m<sup>2</sup> auf Gerinnehöhe) eindeutig grösser und zudem vertikal angeordnet sind.

Die Ereignisgeschichte zeigt, dass im Ereignisfall auch im Mündungsbereich grosse Feststoffmengen abgelagert werden können (25'000 m<sup>3</sup> im Jahr 1977 und 500 m<sup>3</sup> im Jahr 2002; Gertsch 2004). Die Einschätzungen von Gertsch (2004) liefern eine plausible Erklärung für die geschiebearmen Bedingungen im Unterlauf trotz der geringen Rückhaltewirkung. Gemäss Einschätzungen im Feld kommt Gertsch zum Schluss, dass die Verbauungen oberhalb des Sammlers die Entstehung eines Murgangs unterbinden könnten. Zudem sind keine Spuren von jüngeren, grösseren Ereignissen im Einzugsgebiets festzustellen, da viel Holz im Gerinne liegt, Blöcke im Gerinne vermoost sind und auch die Böschungen zugewachsen sind (Gertsch 2004). Diese Einschätzung kann durch das vergleichsweise kleine Entnahmevermögen zwischen 1999–2011 von 1820 m<sup>3</sup> bestätigt werden (DB Solid 2015).

Durch einzelne, kleinere Ereignisse wurden im Geschiebesammler somit zwar Feststoffe abgelagert und entnommen, in den Unterlauf und Vorfluter gelangen durch die kleinen Ereignisse jedoch kaum Feststoffe. Somit ist anzunehmen, dass die Rückhaltewirkung korrekt beurteilt wurde und die Ereignisform für die identifizierte Erosion verantwortlich ist.

Der Vergleich der Rückhaltewirkung, der Erosion im Unterlauf und dem Geschiebedefizit an der Mündung zeigt, dass der Zeitpunkt des letzten Ereignisses einen wesentlichen Einfluss auf den Geschiebetransport hat. Dieser Faktor ist im Index nicht enthalten. Jüngere Ereignisse können einerseits zu Ablagerungen durch ein Überströmen des Geschiebesammlers (Lauenen, Schwarzbach) oder andererseits zu einer ausgeprägten Erosion durch den

generierten Reinwasserabfluss führen (Kummetbach, Attinghausen). Treten über längere Zeit keine grössere geschiebeführende Ereignisse auf, sind im Unterlauf Erosionsphänomene erkennbar. Dieser Aspekt ist für die Interpretation der Bedingungen im Unterlauf relevant.

Die Aussage von acht Wildbächen ohne Übereinstimmung muss relativiert werden, da die Abweichung am Fritzenbach mit 1.06, am Leimbach mit 1.15, Hummligenbach mit 1.18, Schwarzbach mit 1.25, am Melbach mit 1.19 am Dürrbach mit 1.03 und am Chessibach mit 1.22 unter 1.25 Index-Werten liegen und somit im Vergleich zum Kummetbach (2.625 Index-Wert Abweichung) gering sind.

#### *Fazit Stufe 2*

*Die entwickelte Methode der Indizes zeigt, dass eine Rückhaltewirkung des Geschiebesammlers Auswirkungen auf eine ausgeprägte Erosion im Unterlauf und ein Geschiebedefizit an der Mündung hat. Die Erklärungen von einzelnen Abweichungen verdeutlichen, dass die berechneten Indizes immer im Kontext des jeweiligen Wildbaches zu plausibilisieren sind.*

### 5.3 Erläuterung der Tiefenerosion im unverbauten Gerinne (Stufe 3)

Eine quantitative Angabe der Grössenordnung der Erosion ist nur möglich, wenn Aufnahmen von früheren Längsprofilen zu den Abschnitten vorliegen. Dies trifft nur in einzelnen Abschnitten zu. Der Vergleich der Sohlenlage zeigt, dass die gemessene Sohle im Frühjahr 2015 in unverbauten Abschnitten und in Abschnitten mit Sperrentreppen tiefer liegt, als bei den früheren Messungen. Die Tiefenerosion ist bei den untersuchten Wildbächen in unverbauten Abschnitten grösser als in Abschnitten mit Sperrentreppen. Die erhebliche Tiefenerosion ist bis zu 5 m im unverbauten Gerinne am Steinibach in Dallenwil zu erkennen. Die Kolkiefen betragen am Spissibach in Leissigen bis zu 1 m und einzelne Sperrenfundamente sind unterspült.

Somit kann wie erwartet aufgezeigt werden, dass die Erosion in den untersuchten unverbauten Abschnitten stärker ausgeprägt ist als in Abschnitten mit Sperrentreppen. Der Vergleich von einzelnen Abschnitten ist jedoch nicht repräsentativ.

Mögliche Gründe für die starke Ausprägung der Tiefenerosion werden im Folgenden anhand des Vergleichs der letzten Ereignisse und den Entnahmekubaturen der DB Solid erläutert. Zudem wird aufgeführt, welche weiteren Möglichkeiten bestehen, um die Erosion im Gerinne zu beurteilen.

#### Mögliche Gründe der ausgeprägten Tiefenerosion

Die ausgeprägte Wirkung der Tiefenerosion ist anhand des Vergleichs der einzelnen Abschnitte aufgezeigt.

Anhand der Tabelle 28 wird die gemessene Erosion mit den Entnahmekubaturen verglichen. Die grössten Entnahmen erfolgen am Steinibach in Dallenwil und am Spissibach in Leissigen. Die kleinste Entnahmemenge ist am Büetschliggraben in Schangnau vorzufinden. Dieser Zusammenhang widerspiegelt (unabhängig der Einzugsgebietsparameter und dem Charakter im Unterlauf) auch die stark ausgeprägten Erosionsphänomenen am Steinibach und Spissibach sowie den vergleichsweise kleinen Kolkiefen am Büetschliggraben.

	<b>Gesamtes Entnahmevolumen [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Messperiode [Jahre]</b>	<b>Mittlere Entnahme / Jahr [m<sup>3</sup>]</b>
Leissigen Fritzenbach	5'690	23	250
Leissigen Spissibach	11'250	18	625
Büetschliggraben Schangnau	2'824	27	105
Leimbach Frutigen	8'500	9	945
Steinibach Dallenwil	38'883	16	2430
Chalberhönibach Saanen*			

Tabelle 28: Geschiebeentnahmen an den Geschiebesammlern der Stufe 3 gemäss der Datenbank Solid. (\*nicht in der Datenbank Solid aufgeführt).

Die ausgeprägte Tiefenerosion in den unverbauten Abschnitten am Chalberhönibach und Steinibach steht eindeutig im Zusammenhang mit den erst kürzlich ereigneten kleineren geschiebeführenden Ereignissen (s. Tabelle 29). In beiden Unterläufen führte der Feststoffrückhalt zu einem geschiebearmen Abfluss mit starker Erosionswirkung im Unterlauf, wie das Romang generell annimmt (2004). Bei den weiteren Geschiebesammlern ist kein aktuelles Ereignis bekannt.

Bezüglich der Kolktiefe ist kein direkter Zusammenhang mit dem Zeitpunkt des letzten Ereignisses festzustellen. Anhand der Stichprobe kann deshalb angenommen werden, dass der Zeitpunkt der Geschiebeentnahme am Sammler keinen direkten Einfluss auf die Kolktiefe hat. Am Spissibach wurde die letzte Entnahme im Jahre 2003 durchgeführt (Datenbank Solid 2015). Dennoch werden Kolkiefen von bis zu 1 m gemessen.

	<b>Letztes Ereignis</b>	<b>Geschiebelieferung</b>	<b>Bemerkung</b>
Fritzenbach Leissigen	15. März 2006	450 m <sup>3</sup>	
	1. Juli 2010	1800 m <sup>3</sup>	
Spissibach Leissigen	31. August 2002	500 m <sup>3</sup>	Hochwasser mit Verlagerung von Feststoffen
	Mai 2003	250 m <sup>3</sup>	
Büetschliqraben Schangnau	Oktober 2009	660 m <sup>3</sup>	
	Oktober 2010	250 m <sup>3</sup>	
Leimbach Frutigen	15. Juli 2007	2'000 m <sup>3</sup>	
	2012	3'000 m <sup>3</sup>	
Chalberhönibach Saanen	10. Juli 2010	110'000 m <sup>3</sup>	Ablagerungen im Dorfgebiet Rübeldorf
	2. Mai 2015	nicht dokumentiert	Erosion im Unterlauf
Steinibach Dallenwil	5. September 2005	26'000 m <sup>3</sup>	15'000 m <sup>3</sup> in Geschiebesammler, 10'000 m <sup>3</sup> Unterlauf, 5'000 m <sup>3</sup> Engelberger Aa
	Juni 2015	nicht dokumentiert	Erosion im Unterlauf

Tabelle 29: Übersicht der letzten dokumentierten Ereignisse an den Wildbächen der Stufe 3. Quelle: Technische Berichte und Datenbank Solid.

Somit kann der Einfluss der letzten Ereignisse auf eine ausgeprägte Tiefenerosion in unverbauten Abschnitten bestätigt werden. Der Zusammenhang der Kolkiefen mit den letzten Ereignissen (anhand der gemeldeten Entnahmekubatur der Datenbank Solid) ist jedoch nicht direkt ersichtlich.

*Fazit der Stufe 3*

*Die Vermessung der Gerinnesohle erfasst die ausgeprägte Tiefenerosion von mehreren Metern, welche in unverbauten Abschnitten entstand. In Abschnitten mit Sperrentreppen liegt die gemessene Kolkentiefe unterhalb der Sohlenlage des Projektes. An einzelnen Sperren ist das Sperrenfundament unterspült.*

*Die Auswirkungen einer effizienten Rückhaltewirkung können anhand der ausgeprägten Tiefenerosion aufgezeigt werden.*

*Aufgrund der geringen Stichprobe von zwei und sechs Abschnitten sind die Resultate jedoch als Fallstudien zu beurteilen.*

*Das ursprüngliche Ziel der Arbeit, das Geschiebedefizit über den gesamten Unterlauf zu quantifizieren, konnte nicht verfolgt werden. Der Grund ist die schmale Datenlage von effektiven Messungen im Unterlauf. Fessler (2015) bestätigt, dass die Messaufnahmen nicht periodisch durchgeführt werden, sondern oft nur, wenn weitere bauliche Massnahmen geplant sind.*

## 6. Schlussfolgerung

In diesem Kapitel werden die Forschungsfragen und Hypothesen beantwortet. Im Ausblick sind die Anwendbarkeit der Indexierung, Einschränkungen, weitere Analysen sowie mögliche zukünftige Tätigkeiten aufgeführt.

### 6.1 Beantwortung der Forschungsfragen und Hypothesen

Die generierten Resultate und die ergänzende Diskussion dienen der Beantwortung der folgenden Forschungsfragen und Hypothesen. Zur Einordnung wird die jeweilige Hypothese mit den dazugehörigen Forschungsfragen nochmals aufgeführt. Anhand der Erkenntnisse der Forschungsfrage wird die Hypothese beantwortet.

#### Hypothese 1

**Aufgrund des Baus und des regelmässigen Unterhalts von Geschiebesammlern dominieren im gesamten Unterlauf (vom Geschiebesammler bis zur Einmündung in den Vorfluter) geschiebearme Bedingungen.**

#### Beantwortung der Forschungsfrage 1a

**Wie können im Unterlauf geschiebearme, umlagernde oder ablagernde Bedingungen visuell identifiziert werden und wo treten diese auf?**

Die geomorphologischen Bedingungen können auf Luft- und Satellitenbildern und topographischen Karten im Unterlauf grösstenteils identifiziert werden. Für die Bestimmung der dominierenden Bedingung in einheitlich verbauten Abschnitten wird ein Beurteilungsraster mit Phänomenen der Ablagerung und Erosion erstellt. Anhand der Anzahl zutreffender Phänomene werden die Abschnitte kategorisiert. Die wichtigsten Stärken der Methoden sind die situationsgetreuen Abschätzungen und der geringe Zeitaufwand. Die begrenzte Auflösung der Luft- und Satellitenbilder ist ein Schwachpunkt.

Die Anwendung der Methode der visuellen Beurteilung auf 50 Unterläufe der DB Solid zeigt, dass 36 Unterläufe als geschiebearm, 14 als umlagernd und keiner als ablagernd beurteilt werden.

Geschiebearme und umlagernde Bedingungen treten in Abschnitten direkt unterhalb des Geschiebesammlers sowie in Mündungsnähe auf. Es entsteht kein räumliches Ablagerungs- bzw. Erosionsmuster (bspw. flussabwärts eine Abnahme der Erosion). Grösstenteils fällt die Beurteilung über den gesamten Unterlauf identisch aus. In Abschnitten mit Schalen werden keine umlagernden Bedingungen identifiziert. In den restlichen Abschnitten treten die geschiebearmen und umlagernden Bedingungen unabhängig der Verbauung auf.

### **Beantwortung der Forschungsfrage 1b**

#### **Wie kann die Erosion in verschiedenen Abschnitten des Unterlaufs sowie zwischen verschiedenen Wildbachgerinnen vergleichend erfasst werden?**

Die Erosion wird im Gelände vermessen und anhand von zwei erstellten Indizes einheitlich berechnet. Mit dem Gerinne-Index ( $GI_{A, B, C}$ ) kann die Erosion in einheitlich verbauten Abschnitten des Unterlaufs beurteilt werden. Durch einen Korrekturfaktor der Verbauung können unterschiedlich verbaute Abschnitte berücksichtigt werden. Der Vergleich der Erosion zwischen verschiedenen Wildbächen kann durch zwei Indizes erfolgen. Der gesamte Gerinne-Index ( $GI_{tot}$ ) der einheitlich verbauten Abschnitte umfasst die Erosion im Unterlauf. Der Mündungs-Index (MI) erfasst die Verhältnisse an der Mündung. Beide Indizes basieren auf Faktoren der Erosion bzw. dem Geschiebedefizit und Korrekturfaktoren. Das Resultat der Berechnung der Indizes ist je ein Index-Wert. Um den Vergleich zu ermöglichen, werden die Indizes in Abhängigkeit des grösstmöglichen Wertes linear normiert (Wert 1–4).

Der Vorteil der Indexierung ist, dass die Index-Werte auf die Stichprobe normiert sind und somit vergleichbar sind. Zudem kann die erfasste Erosion durch die beiden Indizes bestätigt werden. In Einzelfällen ist die Ergänzung der Neigung des Abschnittes oder der Geologie des Gerinnes vorteilhaft. Ein weiterer Schwachpunkt ist, dass Informationen der Feststofflieferung und der Bewirtschaftung des Geschiebesammlers nicht direkt im Index beurteilt werden können.

Die Beurteilung der Erosion zeigt anhand der Indexierung, dass 14 von 15 Unterläufen mit starken bis sehr stark ausgeprägten Erosionsphänomenen identifiziert werden und 13 von 14 Mündungen ein Geschiebedefizit im Vorfluter in Form eines Kegels aufweisen. Die identischen Wildbäche werden unabhängig des Indexes mit einer starken Erosion, bzw. mässig ausgeprägten Erosion beurteilt.

### **Beantwortung der Forschungsfrage 1c**

#### **Wie sind allfällige Feststoffablagerungen zu interpretieren?**

Für die Interpretation der Feststoffablagerungen (im Gerinne und an der Mündung) ist der Ursprung des abgelagerten Materials relevant, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Die Interpretation basiert auf der folgenden Annahme: Ist der Ursprungsort des Feststoffes im Einzugsgebiet, kann der Feststofftransport im Unterlauf bestätigt werden. Die Ablagerung kann somit als Indikator des Geschiebetransportes verstanden werden. Ist der Ursprungsort der Feststoffe jedoch das Gerinne oder die Böschung des Unterlaufs, ist die Ablagerung kein Indikator für ablagernde Bedingungen sondern für geschiebearme Bedingungen im Unterlauf. Ablagerungen werden in unmittelbarer Nähe einer Erosion nicht als Indikator der Ablagerung sondern der Erosion interpretiert. Dieser Aspekt wird bei den identifizierten Ablagerungen der Stichprobe beachtet. Dies trifft im Unterlauf am Chalberhönibach in Saanen und am Steinibach in Dallenwil zu. Zudem wird geprüft, ob allfällige Ablagerungen im Vorfluter im Zusammenhang mit stark ausgeprägten Erosionsspuren im Unterlauf in Verbindung stehen. Die identifizierte Fahne am Schwarzbach in Lauenen entsteht gemäss der Beurteilung des Gerinne-Index nicht durch eine ausgeprägte Erosion im Unterlauf. Somit kann die Fahne als Indikator für vorherrschenden Geschiebetransport interpretiert werden.

### **Antwort Hypothese 1**

Die Hypothese 1 kann bestätigt werden, da anhand der Ergebnisse der FF 1a in 72 % der untersuchten Unterläufe geschiebearme Bedingungen im Unterlauf der Geschiebesammler festgestellt werden. Die Untersuchung verdeutlicht zudem, dass in keinem Unterlauf ablagernde Bedingungen identifiziert werden. Lediglich in 28 % der Stichprobe werden umlagernde Bedingungen festgestellt. Somit dominieren geschiebearme Bedingungen.

Der Vergleich der Erosion und dem Geschiebedefizit zwischen Wildbächen zeigt (FF 1b), dass der Gerinne- und der Mündungs-Index grösstenteils stark ausgeprägt sind. Die Überprüfung des Ursprungsortes der Feststoffe ist relevant für eine sinngemässe Interpretation des Unterlaufs (FF 1c).

### **Hypothese 2**

**Je effizienter die Rückhaltewirkung des Geschiebesammlers ist, desto ausgeprägter ist die Erosion im Unterlauf.**

### **Beantwortung der Forschungsfrage 2a**

**Wie kann die Rückhaltewirkung der verschiedenen Typen von Geschiebesammlern erfasst werden?**

Die Rückhaltewirkung von verschiedenen Typen von Geschiebesammlern kann anhand des Rückhalte-Indexes im Gelände und durch Informationen aus Projektdaten erfasst werden. Durch die vielseitige Prozesswirkung des Rückhalts ist eine starke Vereinfachung der untersuchten Faktoren notwendig. Die Vereinfachung der beurteilten Faktoren stellt sich anhand unterschiedlicher Geschiebesammler als Stärke aus. Eine Schwäche des Rückhalte-Indexes ist, dass weitere Prozesse des Einzugsgebietes, der Geschiebelieferung etc. bei der Interpretation der Resultate der Indexierung allenfalls ergänzt werden müssen. Zudem basiert die Beurteilung auf einer Abschätzung, welche durch fehlende Beurteilungen nicht plausibilisiert werden kann.

Die 15 untersuchten Geschiebesammler weisen in 14 Fällen eine effiziente bis sehr effiziente Rückhaltewirkung auf.

### **Beantwortung der Forschungsfrage 2b**

**Wie kann die Erosion im Unterlauf einheitlich und vergleichend quantifiziert werden?**

Die Quantifizierung der Erosion wird durch den Vergleich von Längenprofilen des Unterlaufs aus Archivdaten und dGPS Vermessungen von Feldarbeiten im Frühjahr 2015 angestrebt. Im Rahmen dieser Arbeit kann die Erosion nicht im gesamten Unterlauf einheitlich und vergleichend quantifiziert werden, da die Datenlage der Archivdaten eingeschränkt ist. Die Bestimmung der Quantität der Erosion ist zudem nicht möglich, da der Vergleich einzig auf Längenprofilen und auf zusätzlichen Querprofilen basiert.

Eine Bestimmung der Veränderung der Sohlenlage (Tiefenerosion) ist einzig in unverbauten Abschnitten möglich. Der Vergleich zwischen der Vermessung und der Archivdaten ist jedoch nur eingeschränkt möglich. Die Einschränkung erfolgt durch Unsicherheiten der Messmethode und ungenügende Qualität der Archivdaten. Gewisse Längenprofile der Archivdaten bilden lediglich einzelne Teilstrecken des Unterlaufs ab. Eine weitere Ungenauigkeit ist, dass

teilweise die projektierte anstelle der ausgeführten Sohlenlage abgebildet wird. Somit entsprechen einzelne Standorte der Verbauungen im Feld (bspw. Sperren) nicht den projektierten Angaben. Daraus erfolgt, dass teilweise nur einzelne Kolke verglichen werden können.

Die einheitliche und vergleichende Quantifizierung der Erosion im Unterlauf basierend auf Archivdaten ist somit nur in ausgewählten Abschnitten möglich.

### **Beantwortung der Forschungsfrage 2c**

**Welche charakteristischen Anpassungen der geomorphologischen Formen wie Tiefenerosion, Ufererosion oder Kolkbildung etc. können im Unterlauf quantifiziert werden?**

Im Rahmen dieser Arbeit kann die FF 2c in Bezug auf die Tiefenerosion und Kolkbildung beantwortet werden. Die Veränderung der Ufererosion wird nicht quantifiziert, da in den Archivdaten keine Informationen des früheren Zustandes aufgeführt sind.

Für die Quantifizierung der Tiefenerosion und der Kolkgröße sowie -größe wird der Fokus auf unverbaute Gerinnesohlen gelegt, da in diesen Abschnitten eine ausgeprägte Erosion zu erwarten ist. Die Erosion der aktuellen Sohlenlage im Unterlauf wird mit dGPS Messungen erhoben. Diese werden mit der Sohlenlage der Archivdaten nach dem Bau des Geschiebesammlers verglichen. Zudem ist die Zugänglichkeit und die Qualität der Archivdaten ein einschränkender Faktor des Vergleichs.

In zwei von drei unverbauten Abschnitten der Stichprobe ist der Vergleich der Längenprofile möglich. In Anbetracht der Unsicherheiten zeigt der Vergleich des Ist-Zustandes des Talwegs eine punktuelle Ausprägung der Tiefenerosion von mehreren Metern.

Die Kolkiefen und das Kolkvolumen werden in Abschnitten mit Sperrentreppen erfasst. Die Kolkgröße wird mit Längenprofilen vermessen. Für die Berechnung des Kolkvolumens wird zudem die Breite des Kolks vermessen. Wiederum ist die Datenqualität der dGPS Messung in bewaldeten Abschnitten eingeschränkt. Zudem ist die Vermessung von einzelnen Kolken aufgrund der eingeschränkten Begehrbarkeit nicht möglich.

Da in Archivdaten grösstenteils projektierte und nicht gemessene Kolkiefen angegeben werden ist der Vergleich lediglich für einzelne Kolkiefen möglich.

Der Vergleich zeigt, dass die im Feld gemessene Kolkgröße grösstenteils unterhalb der Kolkgröße der Projektdaten liegt. Die gemessenen Kolkiefen liegen zwischen 0.1 und 1 m. Zudem weisen einzelne Sperren Instabilitäten in Form von unterspülten Sperrenfüssen und defekten Überfällen auf.

**Antwort Hypothese 2**

Grundsätzlich kann anhand der Beurteilung der Stichprobe bestätigt werden, dass eine effiziente Rückhaltewirkung zu einer ausgeprägten Erosion im Unterlauf und zu einem Geschiebedefizit an der Mündung führt.

Der Vergleich des Rückhalte-Indexes und des Gerinne- sowie Mündungs-Indexes zeigt in 10 von 15 Wildbächen eine Übereinstimmung einer starken bis sehr starken Ausprägung der Erosion bzw. dem Geschiebedefizit mit einer effizienten Rückhaltewirkung.

Durch den Vergleich der Sohlenlage in unverbauten Abschnitten und Abschnitten mit Sperrentreppen kann der Zusammenhang einer effizienten Rückhaltewirkung und einer ausgeprägten Erosion in einzelnen Abschnitten zudem bestätigt werden.

Aufgrund von Einschränkungen der einheitlichen und vergleichenden Quantifizierung kann die Erosion im Unterlauf nicht abschliessend quantifiziert werden (FF 2b). Eine detailliertere Auflösung des Zusammenhangs der Stärke der Rückhaltewirkung und der quantifizierten Erosion ist somit nicht möglich.

*Konklusion*

*Die visuelle Beurteilung von Unterläufen und die Indexierung der Erosionsphänomene im Unterlauf und den Verhältnissen an der Mündung zeigen, dass im Unterlauf von Geschiebesammler Abschnitte mit einer stark ausgeprägten Erosion dominieren und die Mündungen grösstenteils ein Geschiebedefizit aufweisen.*

*Die Indexierung ermöglicht einen vereinfachten Vergleich des Zusammenhangs der Rückhaltewirkung von Geschiebesammlern, der Erosion im Unterlauf und den Verhältnissen an der Mündung. In Anbetracht der Unsicherheiten der Beurteilung der Indizes kann der Zusammenhang zwischen einer effizienten Rückhaltewirkung und ausgeprägter Erosion bzw. Geschiebedefizit bestätigt werden.*

*Der Vergleich der Sohlenlage in unverbauten Abschnitten weist anhand von zwei Beispielen auf eine ausgeprägte Tiefenerosion hin. Die Kolkbildung unterhalb von Sperren ist ausgeprägt und in einzelnen Fällen ist das Sperrfundament unterspült. In unverbauten Abschnitten ist aufgrund der Stichprobe eine stärkere Erosion festzustellen als in Abschnitten mit Sperrentreppen.*

*Aktuelle Vermessungen des Unterlaufs sind mit Ausnahme von Wildbächen mit jungen Schadensereignissen selten. Der Beobachtung und Überwachung der Erosion wird grösstenteils eine geringe Beachtung geschenkt. Somit kann bestätigt werden, dass eine fundierte Beurteilung des geomorphologischen Zustandes des Unterlaufs notwendig ist.*

*Die entwickelten Methoden der visuellen Beurteilung und der Indexierung sind ein Mehrwert, da sie trotz eingeschränkter Datenlage eine Abschätzung des Zustands des Unterlaufs im Zusammenhang mit der Rückhaltewirkung ermöglichen.*

## 6.2 Ausblick

Basierend auf den Resultaten und den gewonnen Erkenntnissen der Untersuchung werden mögliche weiterführende Anwendungen der Indexierung sowie mögliche weitere Analysen aufgeführt. Diesbezüglich werden allfällige Einschränkungen ergänzt.

### **Anwendbarkeit der Indexierung**

Grundsätzlich kann der entwickelte Ansatz der Indexierung auf sämtliche Unterläufe von Geschiebesammlern in Wildbächen angewendet werden. Die Indexierung wurde an geschiebearmen Gewässern entwickelt. Eine Anwendung für Unterläufe mit ablagernden Bedingungen ist prinzipiell möglich. Diese weiterführende Anwendung würde die Beurteilung der Auswirkung von Geschiebesammlern auf den Unterlauf bei geschiebeführenden Verhältnissen ergänzen.

### **Einschränkungen**

- **Beurteilung des Ist-Zustandes**  
Die Beurteilung des Ist-Zustandes ist von den aktuellen Ereignissen, Umweltbedingungen etc. abhängig und stellt somit lediglich eine Momentaufnahme dar.
- **Phänomene über unterschiedliche Zeiträume sichtbar**  
Die untersuchten Erosionsphänomene des Gerinne-Index bilden nicht zwingend den identischen Zeitpunkt bzw. den identischen Zustand ab. Rutschungen sind beispielsweise über eine längere Zeit sichtbar als die passive Anreicherung von Grobkomponenten im Gerinne.
- **Geringe Information zur Rückhaltewirkung aus Projektdaten**  
Der Informationsgehalt aus Projektdaten zur Wirkung des Geschiebesammlers auf den Unterlauf ist gering, da der Fokus hauptsächlich auf die Dimensionierung und Funktionsweise des Geschiebesammlers gelegt wird und nicht auf die Funktionsweise des Geschieberückhalts.

Diese Einschränkungen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit durch die geringe Datenlage nicht weiter verfolgt. Durch ergänzende Daten aus Luft- und Satellitenbildern oder Aussagen von Experten ist es gegebenenfalls möglich, mehrere Zustände bzw. die Veränderung im Unterlauf zu untersuchen und die Rutschungen zeitlich einzuordnen. Ausführliche Projektdaten der Funktionsweise des Geschieberückhalts könnte die Beurteilung des Rückhalte-Index ergänzen. Beispielsweise könnte die Wirkung des dreifachen Abschlussbauwerks am Steinibach in Hergiswil differenzierter beurteilt werden.

## Weitere Analysen

Die verwendeten Faktoren wurden anhand der ausgewählten Stichprobe festgelegt. Wird die Indexierung auf weitere Wildbäche angewendet sind möglicherweise Anpassungen durch eine veränderte Stichprobe notwendig. Folgende Punkte sind gegebenenfalls zu überprüfen:

- **Anpassung der Faktoren der Indizes**  
Sind die Erosions- und Ablagerungsphänomene stärker ausgeprägt und werden dadurch grössere Veränderungen gemessen, sind die Faktoren neu zu normieren und die Klassengrenzen (Tiefen- und Böschungserosion sowie die Kolkentiefe) anzupassen.
- **Ergänzen von Faktoren**  
Faktoren wie die Neigung (Einfluss GI) und die mittlere jährliche Geschiebefracht (Einfluss RI) können einen Einfluss auf die Beurteilung der Erosion haben. Eine Ergänzung der Faktoren ist bei einer Stichprobe mit vermehrt sehr flachen oder sehr steilen Abschnitten zu prüfen.
- **Grössenordnung der Erosion**  
Sind detailliertere Angaben zur Grössenordnung der Erosion im Unterlauf erwünscht, ist die Ergänzung von Querprofilen in unverbauten Abschnitten notwendig. Zudem ist die Ergänzung der dGPS Messung mit bspw. einem terrestrischem Laserscanner zu prüfen (Willi et al. 2015).

## Mögliche zukünftige Tätigkeiten

Über den Rahmen der Arbeit hinaus ist die Nachfolgefrage zu klären, inwiefern geringe und dosierte Rückhaltewirkungen den Geschiebehaushalt im Unterlauf verbessern würden. Dies könnte wiederum anhand der Methode der Indexierung erfasst werden.

Mit der Entwicklung eines einfachen und fundierten Abschätzverfahrens der Rückhaltewirkung von Geschiebesammlern (Strehl 2016), könnte der Rückhalte-Index geprüft und ergänzt werden.

## Literaturverzeichnis

- Ahnert, Frank 2009: Einführung in die Geomorphologie. 4. Aufl. UTB Ulmer, Stuttgart.
- Andres, Martin; Meier, Christian 2015: Hochwasserschutz Rübeldorf 2. Ausbaustufe. Wasserbauplan Ausbau Chalberhönibach. Kissling + Zbinden AG (Hrsg.) Technischer Bericht. Bern.
- Annandale, George. W.; Melville, Bruce; Chiew Yee-Meng 2002: Fallstudien zur Kolkbildung, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 85.
- Bergmeister, Konrad; Soda, Jürgen; Hübl Johannes; Rudolf-Miklau, Florian 2009: Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren. Beton-Kalender 2008: Konstruktiver Wasserbau - Erdbebensicheres Bauen. Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- Bezzola, Gian R. 2002: Fliesswiderstand und Sohlenstabilität natürlicher Gerinne. Unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der relativen Überdeckung. Dissertation. Technische Wissenschaften. ETH Zürich, Zürich.
- Böll, Albert; Kienholz, Hans; Romang, Hans 2008: Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raumplanung. Teil E: Wildbäche. Nationale Plattform Naturgefahren (PLANAT).
- Brierley, Gary J; Fryirs, Kristie A. 2004: Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework. Blackwell Publications, Oxford.
- BWG 2003: Wörterbuch Hochwasserschutz. Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG). Haupt Verlag, Bern.
- Bürki, Daniel 2015: Interview geführt von der Autorin. Innertkirchen, 20. Juli 2015.
- Charlton, Ro 2007: Fundamentals of fluvial geomorphology. 1. Auflage. Routledge, London.
- Dähler, Marcel 2015: Interview geführt von der Autorin. Bern, 17. August 2015.
- DIN 19663, 1985: Wildbachverbauung: Begriffe, Planung und Bau. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im Deutschen Institut für Normierung (DIN), Berlin.
- Fahrni, Adrian 2015: Interview geführt von der Autorin. Bern, 25. Juni 2015.
- Fehr, René. 1987: Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen. Umrechnung und Vergleich von verschiedenen Analyseverfahren. Vischer, D. (Hrsg.) Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau (VAW). Mitteilung-VAW Nr. 92. ETH Zürich, Zürich.
- Fessler, Werner 2015: Interview geführt von der Autorin. Dallenwil, 22. Juni 2015.
- Feuz, Daniel 2015: Interview geführt von der Autorin. Bern, 23. Juni 2015.
- Gerber, Albert 2015: Interview geführt von der Autorin. Bern, 17. August 2015.
- Gertsch, Eva 2004: BAFU-Geschiebemessnetz; Kummelbach, Attinghausen (UR). BAFU (Hrsg.), Ittigen.
- Gertsch, Eva 2009: Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen. Dissertation. Geographisches Institut der Universität Bern, Bern.
- GIUB 2015: Datenbank Solid – Konzeptoptimierung. Schlussbericht. Geographisches Institut Universität Bern (GIUB), Bern.

- Google Earth 2015a: *Google Earth Images*.  
www.google.de/intl/de/earth/index.html. Letzter Zugriff: August 2015.
- Google Earth 2015b: www.google.com/earth/. Letzter Zugriff: November 2015.
- Grasso, Alessandro; Jakob, Adrian; Spreafico, Manfred; Bérod, Daniel 2010: Monitoring von Feststofffrachten in schweizerischen Wildbächen. <<Wasser Energie Luft>>-102. Jahrgang. Heft 1, Baden.
- Habersack, Helmut; Bürgel, Jochen; Petraschek, Armin; Stiefelmeyer, Heinz 2005: Analyse der Hochwasserereignisse vom August 2002 - FloosRisk. Kurzfassung. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.). Umweltbundesamt, Wien.
- Habersack, Helmut; Hauer, Christoph 2014a: Methoden des Feststoffmonitorings (Geschiebe, Schwebstoffe) in alpinen Einzugsgebieten. Verein der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinerverbauung Österreich (Hrsg.) 78. Jahrgang. Heft 173, Villach.
- Habersack, Helmut; Blamauer, Bernadette; Villwock, Holger; Prenner, David; Hauer, Christoph 2014b: SED\_AT – Feststoffhaushalt, Sedimenttransport und Flussmorphologie im Rahmen des nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans. Springer-Verlag, Wien.
- Habersack, Helmut; Blamauer, Bernadette; Villwock, Holger; Prenner, David; Schoder, Barbara.; Kreisler, Andrea; Klösch, Mario; Hauer, Christoph 2014c: SED\_AT Feststoffhaushalt, Sedimenttransport und Flussmorphologie im Rahmen des nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans. Endbericht. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Haeberli, Wilfried; Rickenmann, Dieter; Zimmermann, Markus 1990: Investigation of 1987 Debris Flows in the Swiss Alps: general concept and geophysical soundings. Hydrology in Mountainous Regions. II - Artificial Reservoirs; Water and Slopes. IAHS Publ. (194), S. 303–310.
- Hasegawa, Yuji; Oda, Akira; Mizuyama, Takahisa; Izumi, Iiwao; Abe, Hikoshichi 2004: Evaluation of the function of silt sabo dams through hydraulic model experiments. Interpretvent, Tagungspublikation (Band VII), Riva, Trient.
- Hegg, Christoph; Rickenmann, Dieter; Forster, Felix 2001: Hochwasser und Feststofftransport in Wildbacheinzugsgebieten. Bulletin für angewandte Geologie (Hrsg.) Band 6. Heft 1. S. 85–97.
- Herzog, Beatrice; Bettler, Martin; Speerli, Jürg; Stucki, Adrian; Semler Frieder 2015: Vergleich von hydraulischen und numerischen Modellierungen an einer lateralen Hochwasserausleitung im Steilbereich. <<Wasser Energie Luft>>- 107. Jahrgang. Heft 4, Baden.
- Hunzinger, Lukas; Zarn, Benno 1996: Geschiebetransport und Ablagerungsprozesse und in Wildbachschalen. Interpretvent. Tagungspublikation (Band 4) S. 221–230, Garmisch – Patenkirchen.
- Hunzinger, Lukas; Bachmann, Annette; Brändle, Ralph; Dänliker, Paul; Jud, David; Koks, Mario 2015: Empfehlung zur Beurteilung der Ufererosion an Fließgewässern. Fachleute Naturgefahren Schweiz (FAN) und Kommission für Hochwasserschutz (KOHS) (Hrsg.), Bern.

- Jefferson, Anne J.; Wegmann, Karl W.; Chin, Anne 2013: Geomorphology of the Anthropocene: Understanding the surficial legacy of past and present human activities. *Anthropocene* 2, S. 1–3.
- Jörger, Ladina 2012: BAFU-Geschiebemessnetz; Fritzenbach, Leissigen (BE). BAFU (Hrsg.), Ittigen.
- Kienholz, Hans; Keller, Hans M.; Ammann, Walter; Weingartner, Rolf; Germann, Peter F.; Hegg, Christoph; Mani, Peter; Rickenmann, Dieter 1998: Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. Schlussbericht NFP 31. vdf, Hochschulverlag ETH, Zürich.
- Künzi, Rolf; Müller, Willy 2009: Gesamtprojekt Kander.2050. Gewässerentwicklungskonzept GEKa. Technischer Bericht. Tiefbauamt des Kantons Bern (Hrsg.), Bern.
- Lehmann, Christoph 1996: Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen. Teil 1 Handbuch. Landeshydrologie und -geologie. Mitteilung Nr. 4, Bern.
- Lehmann, Christoph 2001: "Emme 2050". Nicht nur eine wasserbauliche Untersuchung. Geographische Gesellschaft Bern (Hrsg.), Bern.
- Loat, Roberto; Petrascheck, Armin 1997: Empfehlung zur Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Bundesamt für Raumplanung (BRP), Wald und Landschaft (BUWAL) (Hrsg.), Biel.
- Mendez, Patricia R. 2008: Seitenerosion in kiesführenden Flüssen. Prozessverständnis und quantitative Beschreibung. Dissertation. ETH Zürich, Zürich.
- Mosimann, Rudolf 1998: Erfahrungen und 2. Etappe der Emme-Birne, *Verbandsschrift* 59 des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes, Baden.
- Mosimann, Rudolf 2015: Interview geführt von der Autorin. Hasle-Rüegsau, 21. Juli 2015.
- Oehrli, Ulrich 2015: Interview geführt von der Autorin. Bern, 24. Juni 2015.
- Promny, Markus; Möller, Georg 2008: Wirksamkeit von Geschiebesammlern während des Hochwassers im August 2005. Internationales Symposium 2008. Neue Anforderungen an den Wasserbau. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Zürich.
- Rickenmann, Dieter; Heimann, Florian; Böckli, Martin; Turowski, Jens M.; Badoux, Alexandre 2014: Geschiebetransport-Simulationen mit sedFlow in zwei Gebirgsflüssen der Schweiz. <<*Energie Wasser Luft*>>-106. *Jahrgang Heft* 3, S. 187–199.
- Romang, Hans 2004: Wirksamkeit und Kosten von Wildbach-Schutzmassnahmen. Geographisches Institut Universität Bern. *Geographica Bernensia*, Bern.
- Üblagger, Gustav 1973: Retendieren, Dosieren und Sortieren, Forsttechnische Ableitung für Wildbach- und Lawinenverbauung, Wien.
- Schälchli, Ueli; Abegg, Johannes; Hunzinger, Lukas 2005: Geschiebe- und Schwebstoffproblematik in Schweizer Fliessgewässern. Unter Mitarbeit von Hunziker, Zarn & Partner, Zürich.
- Schälchli Ueli; Kirchhofer, Arthur 2012: Sanierung Geschiebehaushalt Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt (BAFU). Umwelt-Vollzug, Bern.

- Schöberl, Friedrich 1992: Zur Geschiebeproblematik bei Hochwasserrückhaltebecken. Interpreavent. Tagungsband (Band 1), S. 255–266, Bern.
- Schubiger AG Bauingenieure 2009: Steinibach und seine Zuflüsse, Dallenwil. Massnahme 4: Geschiebesammler Lourdesgrotte. Technischer Bericht, Hergiswil.
- Spreafico, Manfred; Lehmann, Christoph; Jakob, Adrian; Grasso, Alessandro 2005: Feststoffbeobachtung in der Schweiz. Ein Tätigkeitsgebiet der Landeshydrologie. Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG) (Hrsg.), Serie Wasser.Nr. 8. Bern.
- Strehl, Thomas 2016: Rückhaltewirkung von Geschiebesammlern in alpinen Wildbächen. Laufende Masterarbeit. Geographisches Institut. Universität Bern, Bern.
- Strobl, Theodor; Zunic, Franz 2006: Wasserbau. aktuelle Grundlagen – neue Entwicklungen. Springer-Verlag, Berlin.
- Swisstopo 2013: *Landeskarte 1 : 25 000 (LK25)*.  
<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/maps/national/25.html?mapnr=2>. Letzter Zugriff: August, 2015.
- Swisstopo 2014: *Luftbilder*.  
<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/images/ortho/swissimage.html>. Letzter Zugriff: August, 2015.
- Swisstopo 2015: *swissALTI<sup>3D</sup>*.  
<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/swissALTI3D.html>. letzter Zugriff: September, 2015.
- Takahashi, Tamotsu 2014: Debris Flow. Mechanics, Prediction and Countermeasures. 2. Auflage. CRC Press, London.
- Vetsch, David; Siviglia, Annunziato; Ehrbar, Daniel; Faccini, Michael; Gerber, Marc; Kammerer, Stefan; Peter, Samuel; Vonwiller, Lukas; Volz, Christian; Farshi, Davood; Mueller, Renata; Rousselot, Patric; Veprek, Ratko; Faeh, Roland 2014: System Manuals of BASEMENT. Version 2.5.3. Eidg. Technische Fachhochschule (ETH) Zürich und Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW).  
[http://www.basement.ethz.ch/docs/BASEMENT\\_v2.5.3\\_User.pdf](http://www.basement.ethz.ch/docs/BASEMENT_v2.5.3_User.pdf). Letzter Zugriff: November 2015.
- Vischer, Daniel L. 2003: Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz. Von den Anfängen bis ins 19. Jahrhundert. Berichte des BWG, Serie Wasser. Nr. 5, Bern.
- Weichert, Roman 2006: Bed morphology and stability of steep open channels. Minor, H.-E. (Hrsg.) Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie (VAW). VAW-Mitteilung Nr. 201. ETH Zürich, Zürich.
- Willi, Christina; Graf, Christoph Debeuleiss, Yolanda; Keiler, Margreth 2015: Methods for detecting channel bed surface changes in a mountain torrent – experiences from the Dorfbach torrent. Geographica Helvetica. 70(4) S. 265-279, Zürich.
- WSL 2011: Hydrologische Forschung im Alpal (SZ). Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL).  
[http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/testgebiet\\_alpal/index\\_DE](http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/testgebiet_alpal/index_DE) letzter Zugriff: Februar 2016.

Zimmermann, Markus 1989: Geschiebeaufkommen und Geschiebepbewirtschaftung. Grundlagen zur Abschätzung des Geschiebehaushaltes im Emmental. Dissertation. Geographica Bernensia, Bern.

Zollinger, Fritz 1983: Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz. Ihre Morphologie und die Möglichkeiten einer Steuerung. Dissertation. ETH Zürich, Zürich.



## Anhang

- A) Anfrage Archivdaten
- B) Leitfaden Experteninterview
- C) Beurteilung der Unterläufe (Stufe 1)
- D) Beurteilung der Indizes (Stufe 2)
  - D1 Chalberhönibach Saanen
  - D2 Fritzenbach Leissigen
  - D3 Spissibach Leissigen
  - D4 Büetschli graben Schangnau
  - D5 Leimbach Frutigen
  - D6 Schwarzbach Lauenen
  - D7 Steinibach Dallenwil
  - D8 Hummligenbach Wolfenschiessen
  - D9 Steinibach Hergiswil
  - D10 Bitzighoferbach Sarnen
  - D11 Melbach Kerns
  - D12 Dürrbach Engelberg
  - D13 Nidlaubach Unteriberg
  - D14 Chessibach Altendorf
  - D15 Kummetbach Attinghausen

## A) Anfrage Archivdaten

Leitfaden Experteninterview  
Masterarbeit an Geschiebesammlern der Datenbank Solid



<sup>b</sup>  
UNIVERSITÄT  
BERN

### Geschieberückhalt und –entnahme: Anfrage Archivdaten

Geschiebesammler: \_\_\_\_\_

Kontaktperson Kanton: \_\_\_\_\_

Verantwortliche Person Geschiebesammler:

Name: \_\_\_\_\_ Institution: \_\_\_\_\_

Kontakt: \_\_\_\_\_

- Ihre Funktion? (gesuchte Person: Verantwortlich für Geschiebesammler/Unterlauf)

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

#### Vorstellen Arbeit

- Unsere Gruppe der Unibe arbeitete an einer Optimierung der Datenbank Solid vom BAFU
- Aus dieser Arbeit ergab sich 3 weitere Masterarbeiten (Einzugsbietsparameter, Rückhalt, Wirkung Unterlauf)
- Ziel meiner Masterarbeit: Funktionsweise des Geschiebesammlers in Bezug auf den Unterlauf zu untersuchen
- Untersuchung an ausgewählten Unterläufen der Datenbank Solid

#### Vorgehen der Arbeit

- 1) Rekonstruktion des Zustandes des Unterlaufs vor dem Bau des Geschiebesammlers anhand von Archivdaten
- 2) Messen und identifizieren des geomorphologischen Ist-Zustandes im Unterlauf (Feldbegehung im Frühling15, Datum Kommunizieren →evt. Unterstützung?)
- 3) Unterschied des Ist-Zustand und Zustand vor dem Bau ergibt Anpassung / Veränderung / Grössenordnung durch das Geschiebedefizits

#### Benötigte Archivdaten Rekonstruktion vor Bau / Grund Bau (Beschreibungen, Technischer Bericht, Profile, Plan)

- Technische Berichte zu Bau Geschiebesammler, Nachbesserungen (Wasserbauliche Massnahmen, erzielter Zweck...)
- Luftbilder Unterlauf vor Bau GS (nach Oberlauf wird nicht explizit gefragt)
- Längs- Querprofile

#### Zusätzliche Information: (je nach vorhandenen Informationen)

- Geschiebetransportabschätzungen vor Bau GS
  - Korngrössenverteilung (durchgeführte Linienzahlanalyse?)
  - Beteiligte Personen der Planungsarbeiten (evt. Anfrage für zusätzliche Auskünfte/Experteninterview)
  - Erfahrungen Auswirkung Konstruktion auf Unterlauf
  - evt. Füllen von Lücken im Excel (Informationen\_GS)
- Baujahr des Geschiebesammlers, Rückhaltevolumen, Geschiebeabschätzung

## B) Leitfaden Experteninterview

Leitfaden Experteninterview  
Masterarbeit an Geschlebesammelmuseum: Dornier/Laifl/Seifrid

**Geschieberückhalt und -entnahmen**

Geschiebesammler: \_\_\_\_\_ Datum: \_\_\_\_\_  
Name: \_\_\_\_\_ Institution: \_\_\_\_\_  
Adresse: \_\_\_\_\_  
E-Mail: \_\_\_\_\_ Tel. Nr.: \_\_\_\_\_

1) Wann haben Sie sich zum ersten Mal mit Geschlebesammlern auseinander gesetzt?

2) Wieso wurde der Geschlebesammler gebaut?  Studie  eigene Erfahrung

- Probleme vor dem Bau des Geschlebesammlers
- Murgänge / Geschlebeführende Hochwasser → Sicherheit
- Hochwasser
- Gründe für den Bau des Geschlebesammlers (evt. bereits in Problemen erwähnt)
- Subvention
- Erwünschte Wirkung
  - Sicherheit
  - Bewirtschaftung
  - Raumplanung

3) Wie würden Sie die Situation vor dem Bau des GS im Unterlauf bzgl. Geschlebeführung beschreiben?

- Geschlebeführung
- Verbauungen
- Sohlenlage
- Gerinnequerschnitt

4) Wie beschreiben Sie den aktuellen Zustand im Unterlauf bzgl. Geschlebeführung?

- Geschlebeführung
- Verbauung
- Sohlenlage
- Erosion

5) Welche Funktionsweise hat der Geschlebesammler?

- Rückhaltekapazität
- Bewirtschaftung
- Selbstleerung
- Treten Ihres Wissens unterhalb des Geschlebesammlers geomorphologische Probleme auf (Bsp.)?  
(Geschlebedefizit, Erosion, Instabilität der Infrastruktur)
- Nachmassnahmen/ Erhaltungsmassnahmen

6) Würden Sie den Geschlebesammler aus heutiger Sicht nochmals so bauen?

- Erfahrungen /Erkenntnisse
- Verbesserungspotential

7) Kennen Sie weitere Personen, welche mir über die Funktionsweise des Geschlebesammlers Auskunft geben können?

DANK

© 2015  
www.geschlebesammelmuseum.ch Tel. 041 858 51 51

### C) Beurteilung der Unterläufe (Stufe 1)

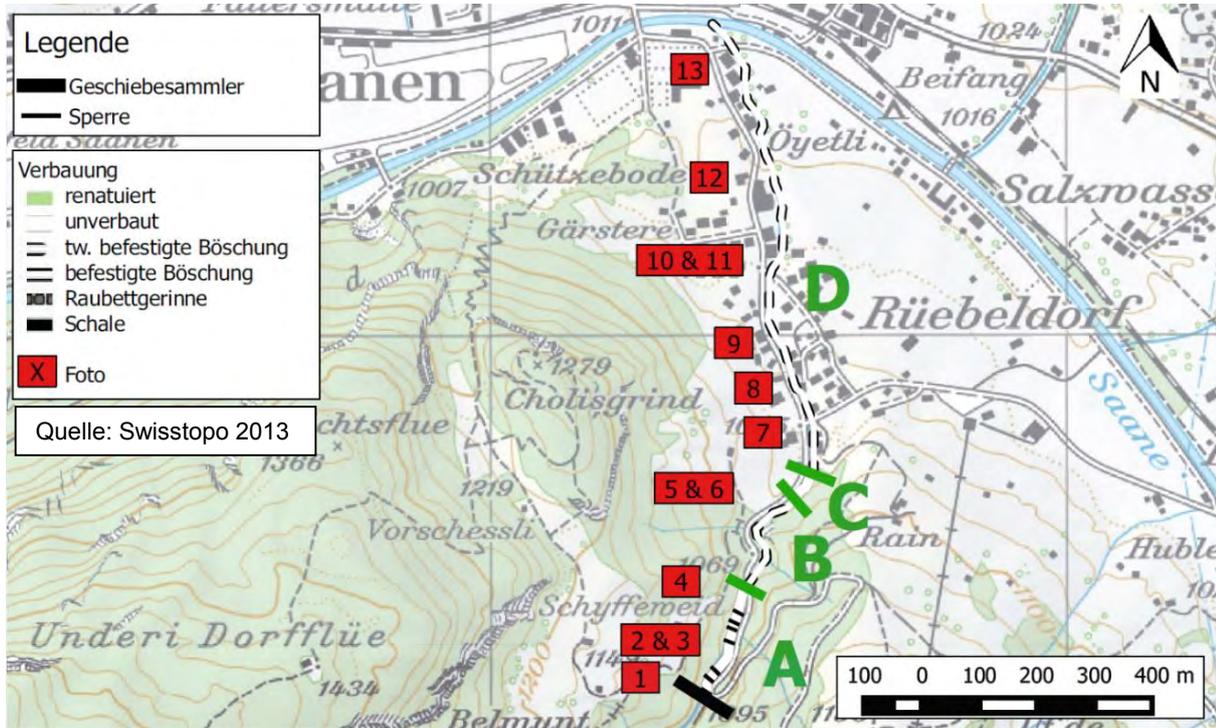
Kategorisierung der Unterläufe anhand der Beurteilung von Luft- und Satellitenbildern und topographischen Karten (Datengrundlage: Datenbank Solid).

<b>Erodierend (36)</b>		
Fritzenbach Leissigen	Melbach Kerns	Nietenbach Seewen
Spissibach Leissigen	Steinibach Dallenwil	Nidlaubach Unteriberg
Bütschli graben Schangnau	Humligenbach Wolfenschiesen	Chessibach Altendorf
Schwarzbach Lauenen	Mühlebach Beckenried	Chessibach unten
Leimbach Frutigen	Steinibach Hergiswil	Filderenbach Unteriberg
Eistlenbach Hofstetten	Bitzighoferbach Sarnen	Brima Losone
Chalberhöhnibach Saanen	Grosse Schliere Alpnach	Riale Cusello Sigirino
Dorfruefe Trimmis(a)	Dürrbach Engelberg	Gangbach Gangbach
Tomilsertobel Rothenbrunnen	Widenbach Altstätten	Kummetbach Attinghausen
Valparghera Chur	Simmi Hasengut	Croisette Bex
Val Zuondra Celerina	Steinbach Kaltbrunn	Riale di Sementina
Val Pednal Poschiavo(b)	Simmi Hasengut	Peterey Zinal
<b>Umlagernd (14)</b>		
Sissle Sisslen		
Wyna Menziken		
Dorfruefe oben Trimmis(b)		
Muranzina Sta. Maria		
Val Punteglias Trun		
Val Pednal Poschiavo(a)		
Hundschottenbach Biberegg		
Schipfenbach Silenen		
Riale Tiglia – Leontica		
Drance de Ferret Fouly		
Valle di Gerra /Gambarogno		
Ticino-Airolo		
Rotenbach Plaffeien		
Schwändlibach Plaffeien		
<b>Ablagernd (0)</b>		

**D) Beurteilung der Indizes (Stufe 2)**

- Unterteilung der einheitlich verbauten Abschnitte
- Ausgewählte Fotos der Erosionsphänomene (restliche Bilder s. digitaler Anhang)
- Beurteilung Gerinne-Index
- Beurteilung Mündungs-Index
- Beurteilung Rückhalte-Index

**D1 Chalberhönibach Saanen**



3 Rutschung orografisch links von Sammler



4 Böschungserosion unterhalb Sperre



8 Unterspültes befestigtes Ufer



10 unterspülte Böschung



11 Unterspülung der befestigten Böschung

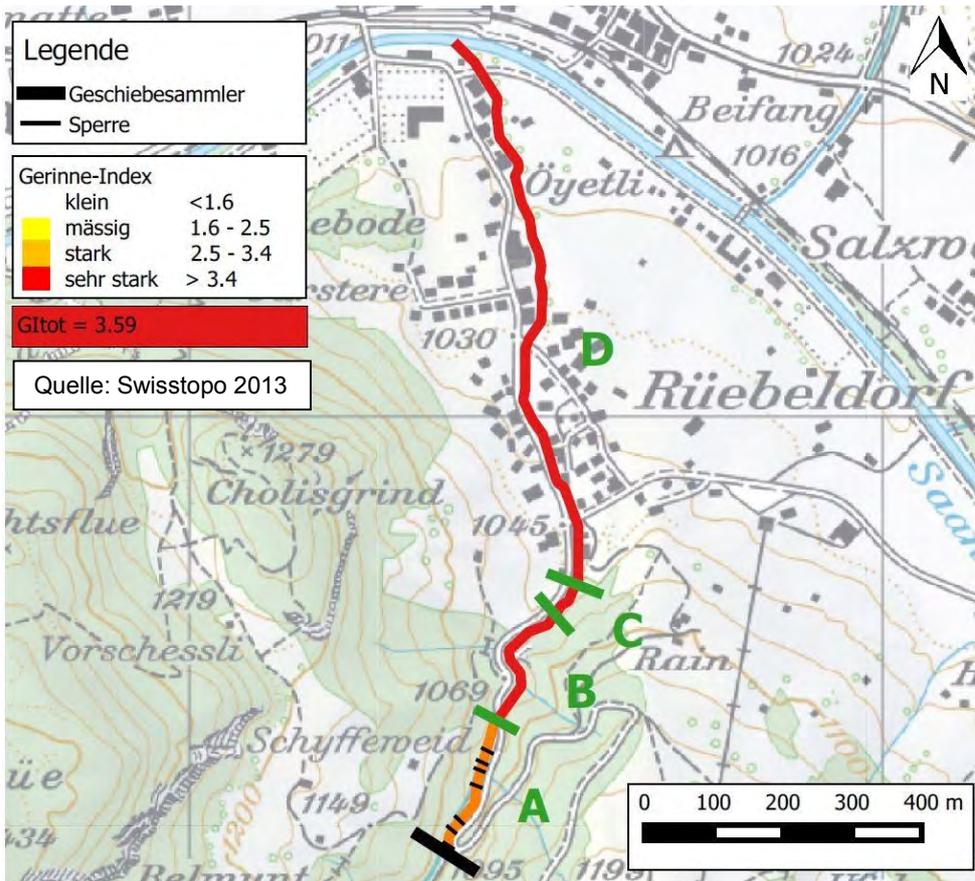


12 Böschungserosion

### Gerinne-Index 3.9

Der Chalberhönibach ist grösstenteils unverbaut. Ausnahmen bilden 5 Sperren mit einer Überfallhöhe von 0.5 m in Abschnitt A sowie Längswerke entlang der Strasse und wenige Sofortmassnahmen mit Blocksätzen in Abschnitt D.

- Im Abschnitt A sind unmittelbar unterhalb des Sammlers Rutschungen von 8–10 m Höhe auf beiden Uferseiten aktiv. Die Sofortmassnahmen durch Blöcke am Gerinneufer vermögen die Rutschung nicht zu stabilisieren. Auch direkt unterhalb der Sperren mobilisieren Rutschungen Blöcke aus der Böschung.
- Das Gerinne verläuft im Abschnitt B auf anstehendem Gestein. Es sind ausgeprägte natürliche Kolke festzustellen. Die Ausprägung der Tiefenerosion wird aufgrund des anstehenden Gesteins nicht angepasst.
- Im komplett unverbauten Abschnitt C manifestiert die Erosion am stärksten. Ablagerungen von diversen Korngrössen zeigen von ausgeprägter Böschungs- und Tiefenerosion im Gerinne. Die Komponenten der Sohle werden nicht beurteilt, da die Ablagerungen eindeutig aus dem Unterlauf abgetragen wurden. Die fortschreitende Böschungserosion gefährdet die umliegende Infrastruktur.
- Im Abschnitt D sind unterspülte Längswerke und Blocksätze der Böschung zu erkennen, durchgehende Böschungsinstabilitäten und stark ausgeprägte Tiefenerosion, welche an der Höhe der Sofortmassnahme zu erkennen ist.



### Mündungs-Index 3

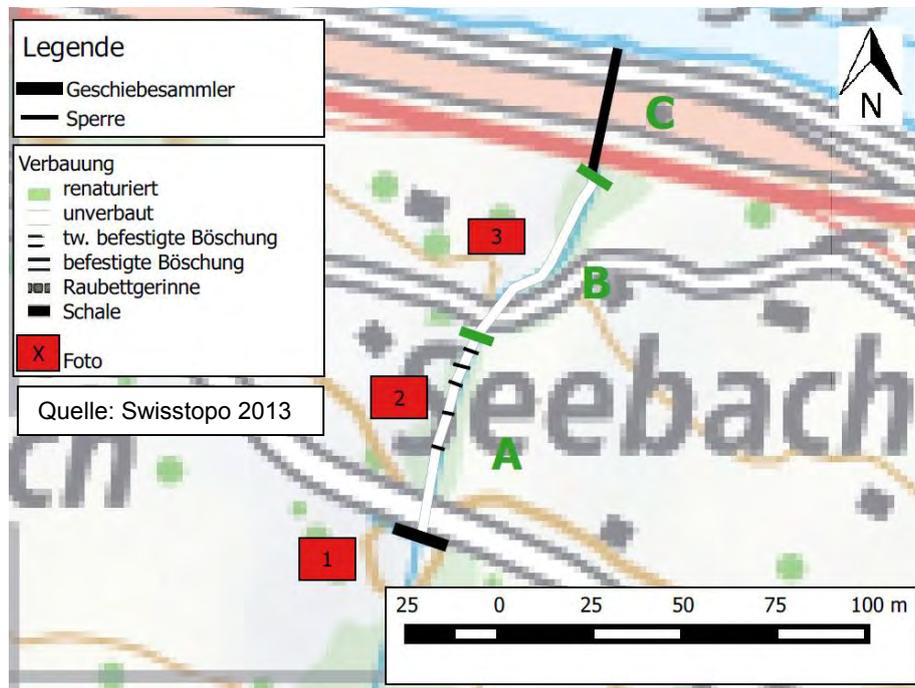
An der Mündung des unverbauten Chalberhönibachs in die kanalisierte Saane sind keine Ablagerungen erkennbar. Die Gerinnesohle des Chalberhönibachs ist mind. 50 cm höher als jene der Saane. Das höher gelegene Gerinne des Chalberhönibachs stösst jedoch nicht in Form eines Kegels in den Vorfluter vor. Aus diesem Grund wird die Mündung als „keine Ablagerung“ beurteilt.

### Rückhalte-Index 3.63

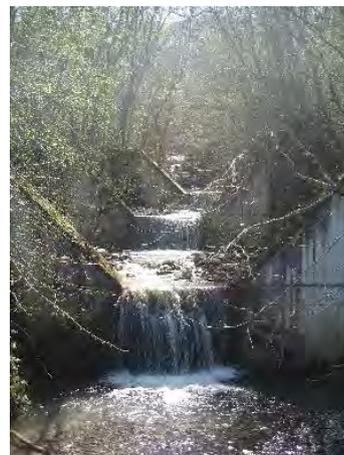
Die verstellbare Höhe des Durchlasses ist zum Zeitpunkt der Messung auf ein Fenster mit dem kleinsten Mass von 0.5 m fixiert. Durch die mobile Durchlassgrösse muss die Rückhaltewirkung allenfalls für einen weiteren Zeitpunkt neu erfasst werden. Aufgrund des  $d_{90}$  von 0.35 m wird der Wert anhand des Korrekturfaktors der Korngrösse angepasst. Durch die horizontale Fixierung der Öffnung während der Feldbegehung ist keine Korrektur der Orientierung notwendig.



## D2 Fritzenbach Leissigen



1 Geschiebesammler

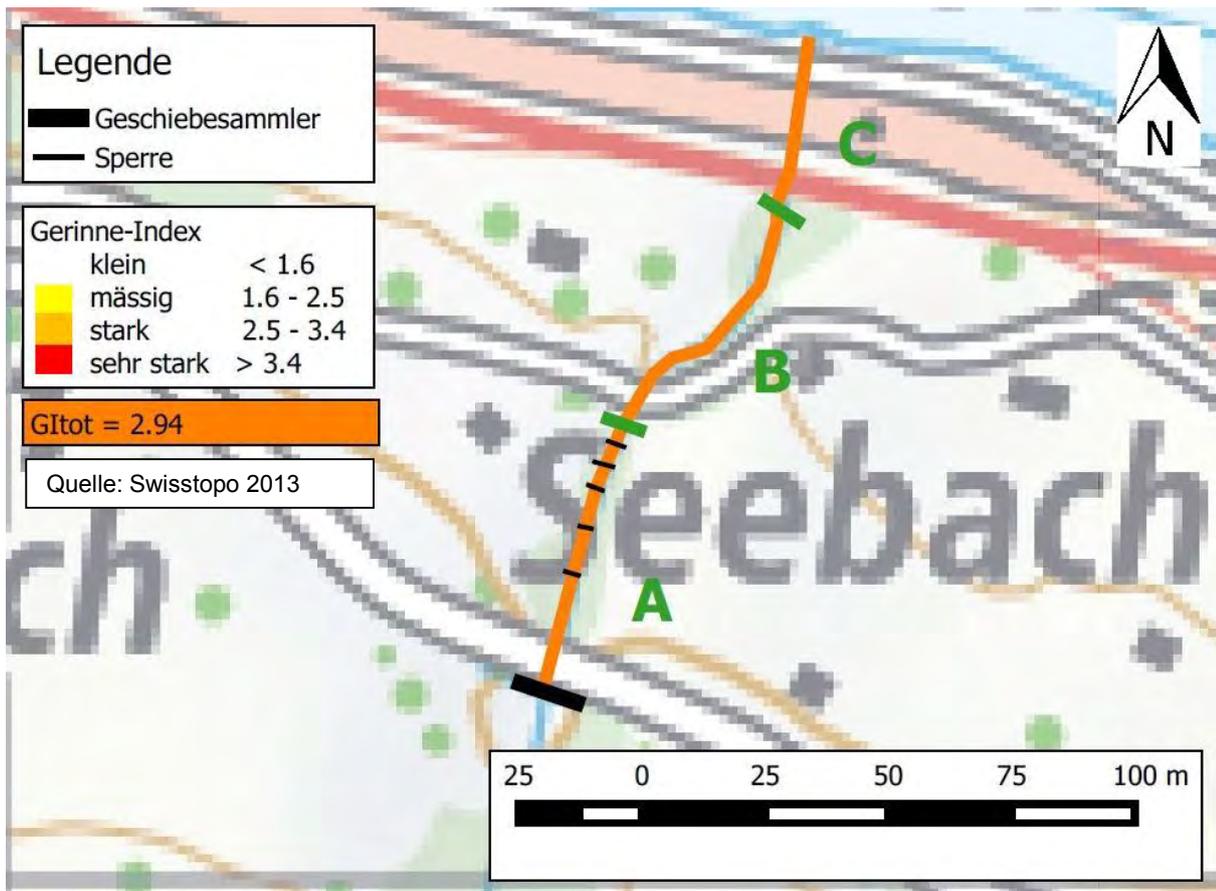


2 Sperrentreppen

**Gerinne-Index  $GI_{tot}$  2.98**

Der Unterlauf des Fritzenbachs ist in drei Abschnitte unterteilt.

- Der Abschnitt A weist 5 Sperren mit Kolkiefen von bis zu 0.55 m auf. Abgesehen von der Erosion der Kolke sind die Gerinnesohle und die Böschung stabil.
- Der Abschnitt B verläuft in einer tiefen Schlucht. Auf der Gerinnesohle ist eine Anreicherung von Grobkomponenten zu erkennen. Durch die starke Eintiefung der Schlucht weist die Böschung Instabilitäten auf. Die Instabilitäten werden jedoch nicht beurteilt, da unklar ist, ob die Erosionsphänomene dem aktuellen Zustand entsprechen oder ein Relikt der Tiefenerosion der Schlucht sind.
- Im Abschnitt C sind in der Schale keine Feststoffe abgelagert.



### Mündungs-Index 3

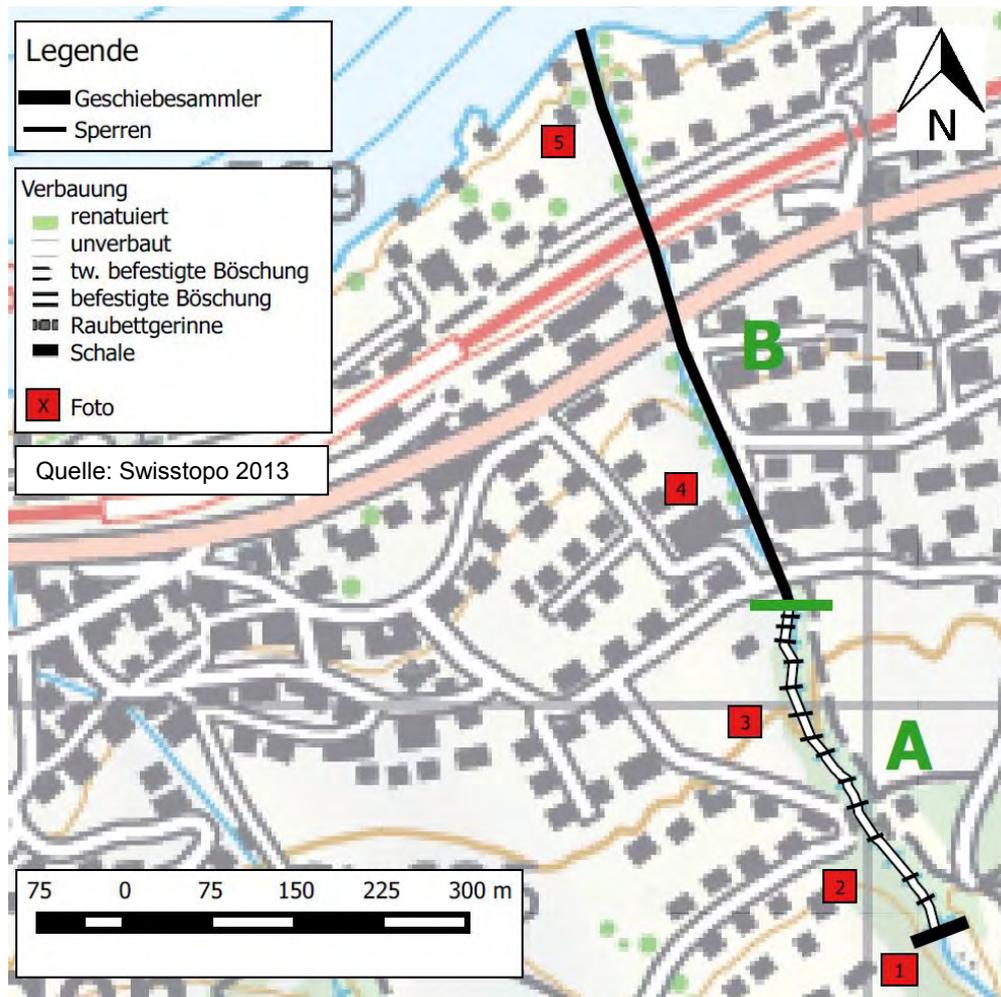
Der Fritzenbach mündet über einen Betonkanal unterhalb der Bahn und Kantonsstrasse in den Thunersee. Am eher steilen abfallenden Ufer ist weder ein Kegel noch eine Ablagerung zu erkennen.

### Rückhalte-Index 4

Das kleinste Mass der Öffnung am Absperrbauwerk beträgt 0.5 m und wird somit mit dem Index 4 beurteilt. Trotz der vertikalen Orientierung der Öffnung wird keine Korrektur durchgeführt, da gemäss Definition der vertikalen Orientierung die Öffnung nicht 50 % der Höhe umfasst.



## D3 Spissibach Leissigen



2 Ablagerung zwischen Sperren

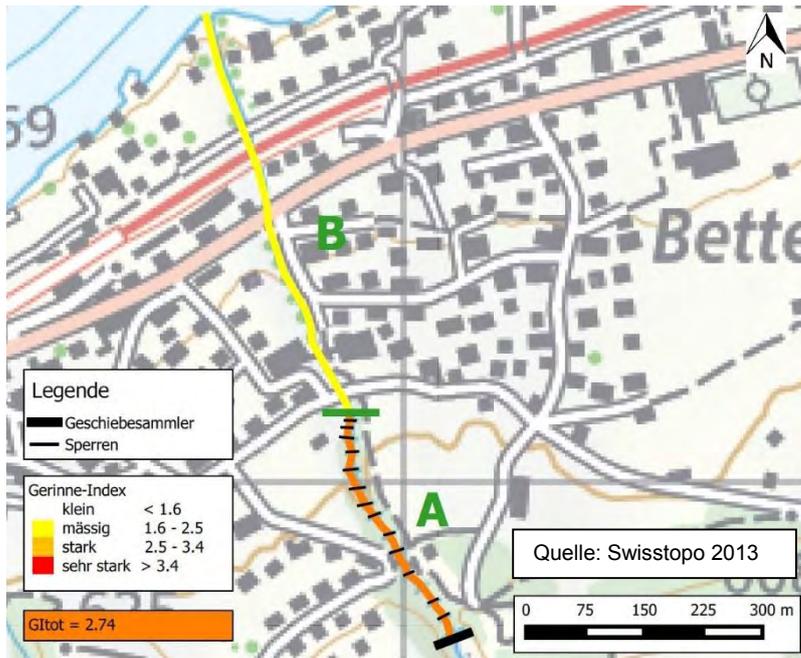


3 Kolk bei Sperre 1

### Gerinne-Index $GI_{tot}$ 3.05

Der Spissibach kann in einen unverbauten Abschnitt A mit Sperrentreppen und einen zweiten Abschnitt B einer Schale unterteilt werden.

- Die mittlere Kolktiefe der Sperren im Abschnitt A liegt bei 0.5 m, die maximale Tiefe bei 1 m. Zwei Kolke unterspülen das Sperrenfundament und führen zu Instabilitäten. Vier kleinere Rutschungen direkt unterhalb der Sperren weisen auf Instabilitäten der Böschung durch die ausgeprägten Kolke hin.
- In der komplett verbauten Schale im Abschnitt B sind einzelne Holz- und Feststoffablagerungen in vorzufinden.



### Mündungs-Index 3

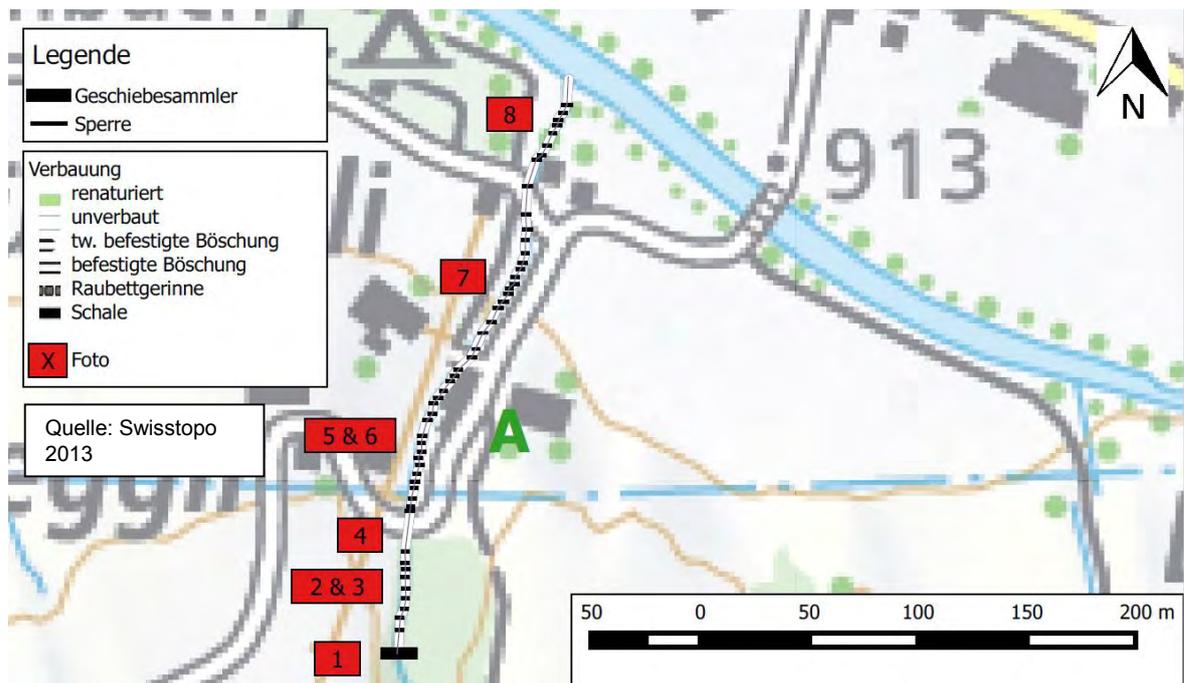
Der Spissibach mündet ca. 1.7 km östlich vom Fritzenbach über zwei Stufen mit einer Höhe von je ca. 20 cm in den Thunersee. Unmittelbar vor der zubringenden gepflasterten Schale sind im Vergleich zum Luftbild von 2013 keine Schwebstoffe zu erkennen. Im See ist ca. 2 m vom Ufer entfernt ein Block mit einem Durchmesser von 50 cm abgelagert. Dieser wurde mit grosser Wahrscheinlichkeit aus dem Spissibach zugeführt.

### Rückhalte-Index 3.25

Die grössere Dimensionierung des Sammlers wurde im März 2015 fertiggestellt (Dähler 2015). Die Öffnungen auf Gerinnehöhe weisen eine Höhe von 0.5 m auf. Aufgrund der Beurteilung des  $d_{90}$  von 0.4 und der vertikalen Öffnung werden beide Korrekturfaktoren subtrahiert.



## D4 Büetschliqraben Schangnau



5 Rutschung



6 Beginn Rutschung



7 Passive Anreicherung Grobkomponenten

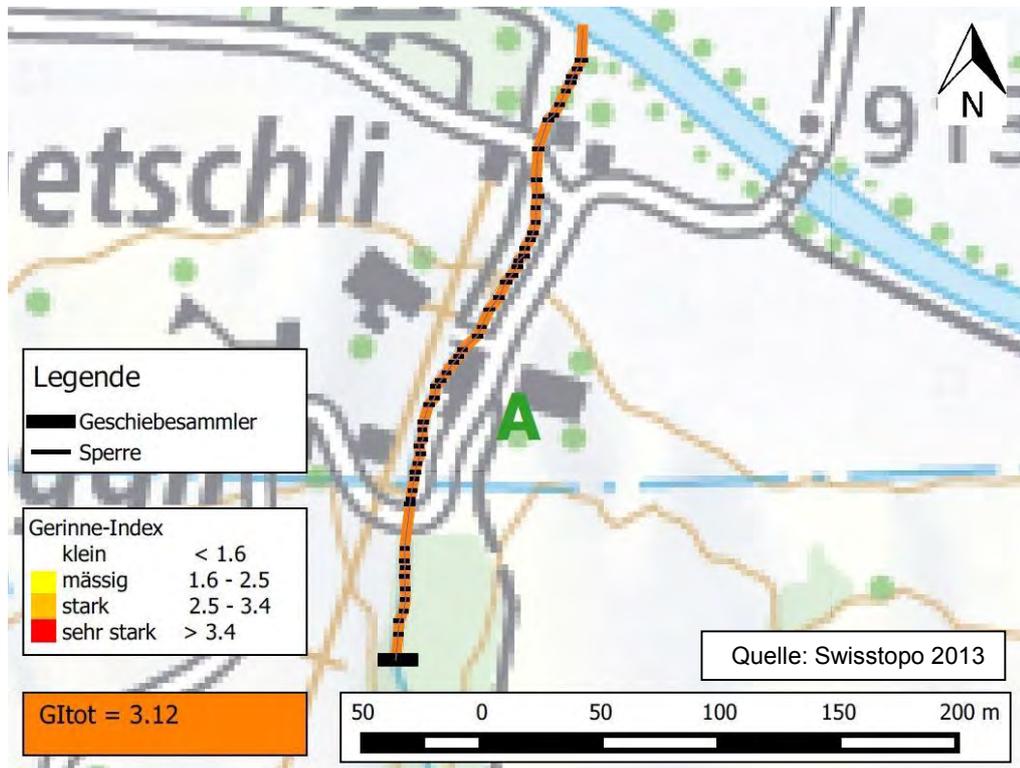


8 Befestigte Schwelle

### Gerinne-Index $GI_{tot}$ 3.36

Der gesamte Unterlauf ist mit einem einheitlichen Sperrbau mit abwechselnd Betonsperren und Doppelholzschwelen gebaut. Somit entspricht der  $GI_A$  dem  $GI_{tot}$ .

- Die mittlere Kolktiefe liegt mit 0.25 deutlich unter 0.5 m. Aufgrund von einzelnen umspülten und instabilen Sperrern wird die Kolktiefe trotzdem als stark ausgeprägt beurteilt.



### Mündungs-Index 4

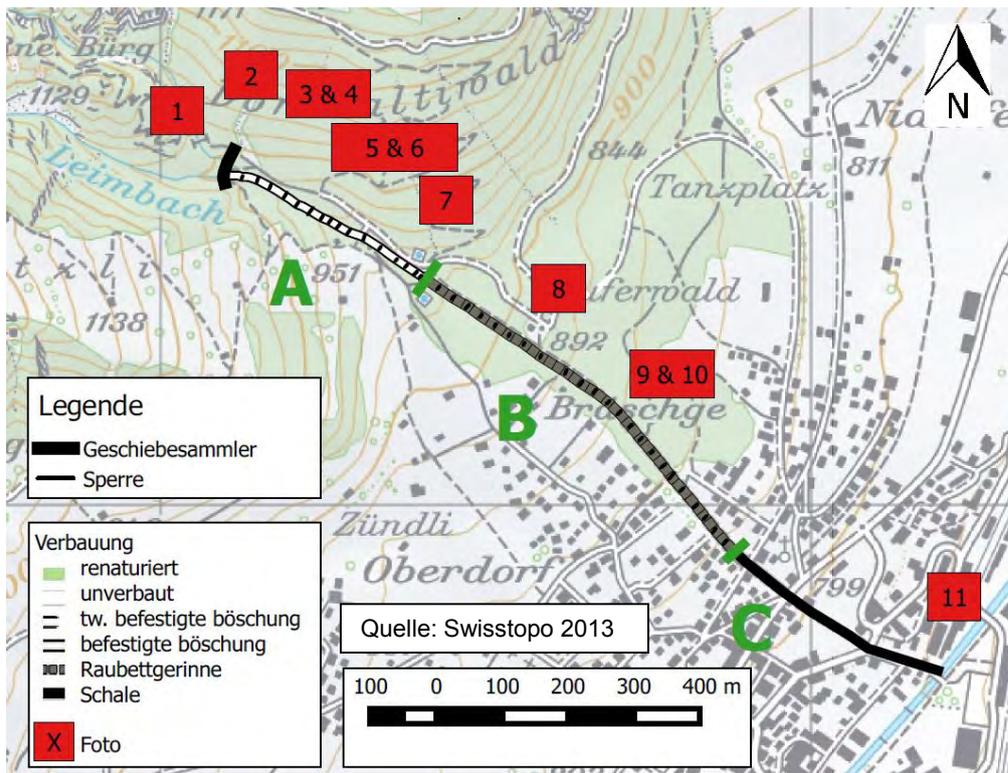
Östlich des Campingplatzes mündet der Büetschligraben in die Emme. Das Gerinne der Emme ist auf diesem Abschnitt durch einzelne Sohlgurte verbaut und weist ein eher breites Bachbett mit einzelnen Ablagerungen am Ufer auf. Die Mündung in den Vorfluter ist über einen Absatz von 40 cm Höhe geführt. Ein Kolk von einer maximalen Wassertiefe von 25 cm ist eindeutig zu erkennen.

### Rückhalte-Index 3.63

Wie auch die Fensterhöhen am Spissibach sind jene des Büetschligrabens 0.5 m hoch und werden dadurch mit einem Index 4 beurteilt. Durch die vertikale Orientierung der Fenster der grossdoligen Sperre, welche ausgehend der Gerinnesohle 50 % des Absperrbauwerks einnehmen, wird der Index durch die Orientierung der Öffnung korrigiert.



## D5 Leimbach Frutigen



2 Böschungserosion unterhalb Schwelle 1



3 Erosion der Böschung



5 Unterspülte Sperre 9



6 Beginn Erosion bei Überfall Sperre 10



7 Unterspültes Querwerk Sperre 11

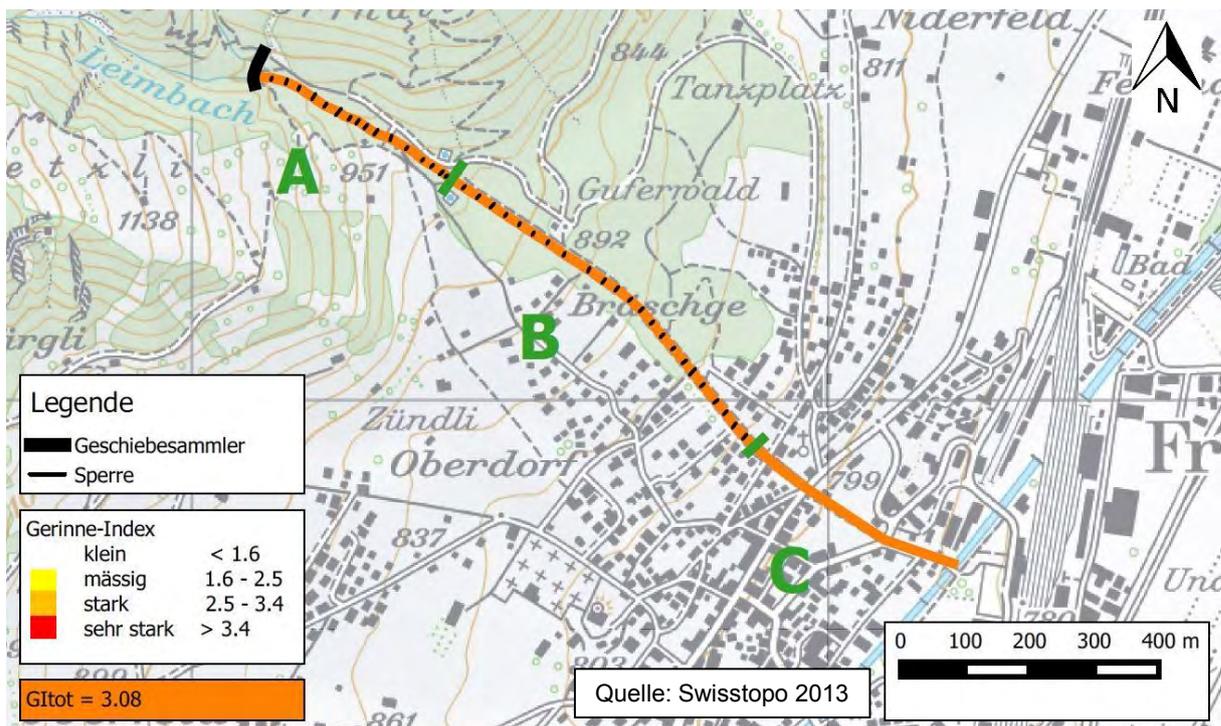


11 Mündung mit kleinem Kolken

### Gerinne-Index $GI_{tot}$ 3.46

Am Leimbach weisen zwei Abschnitte Sperrentreppen auf. Sie unterscheiden sich durch eine unverbaute Sohle im Abschnitt A und einem Raubettgerinne im Abschnitt B. Im Abschnitt C verläuft das Gerinne in einer Schale.

- Die Beanspruchung der Sperrenbauten ist stark. Dies zeigt sich in der Freilegung von zwei Sperrenfüßen und der Abtragung eines Blockes im Überfall der Sperre. Bei einer Sperre wird durch den Kolk die Längsverbauung auf der orographisch linken Seite unterspült. Obwohl die mittlere Sperrenhöhe bei 0.4 m liegt, wird gemäss den Instabilitäten der Sperren die Erosion als sehr stark beurteilt.
- Im Abschnitt B ist zum Sperrenbau auch die Gerinnesohle durch ein Raubettgerinne verstärkt. Dies führt zu geringer Tiefenerosion zwischen den Blöcken von wenigen Zentimetern, indem die feineren Komponenten ausgespült werden. Im Gerinne sind keine Ablagerungen sichtbar. Durch die befestigte Böschung und den Kolkschutz werden die beiden Faktoren nicht beurteilt.
- Der unterste Abschnitt C sind keine Feststoffe in der Schale abgelagert.



#### Mündungs-Index 4

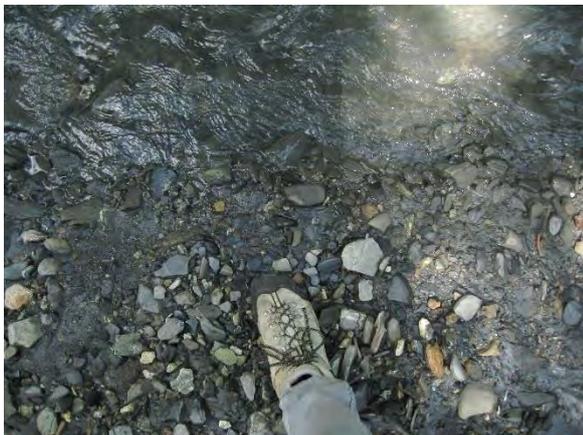
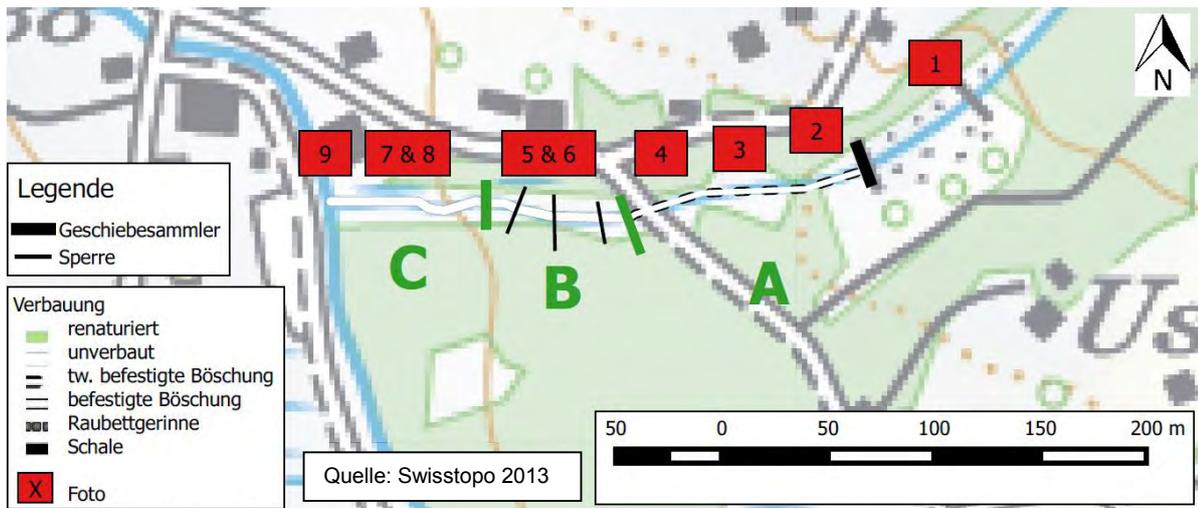
Der Vorfluter des Leimbachs ist die Entschlige, welche nördlich von Frutigen in die Kander mündet. Durch das kanalisierte Bachbett weist die Entschlige eine hohe Transportkapazität auf. An beiden Ufer des Vorfluters ist ein 30–50 cm breiter Streifen mit Feststoffen abgelagert. Auf der Höhe der Mündung des Leimbachs hat sich in diesen Ablagerungen ein Kolk gebildet.

#### Rückhalte-Index 2.88

Der Geschiebesammler am Leimbach ist mit zwei grossen Fenstern mit einer Höhe von 1.3 m gebaut. Stahlträger zwischen den Fenstern verkleinern das kleinste Mass auf 0.9 m. Somit wird die Kategorie 3 zugeteilt. Durch die vertikale Orientierung der Öffnung wird der Wert angepasst.



## D6 Schwarzbach Lauenen



4 Fein- und Grobkomponenten vorhanden

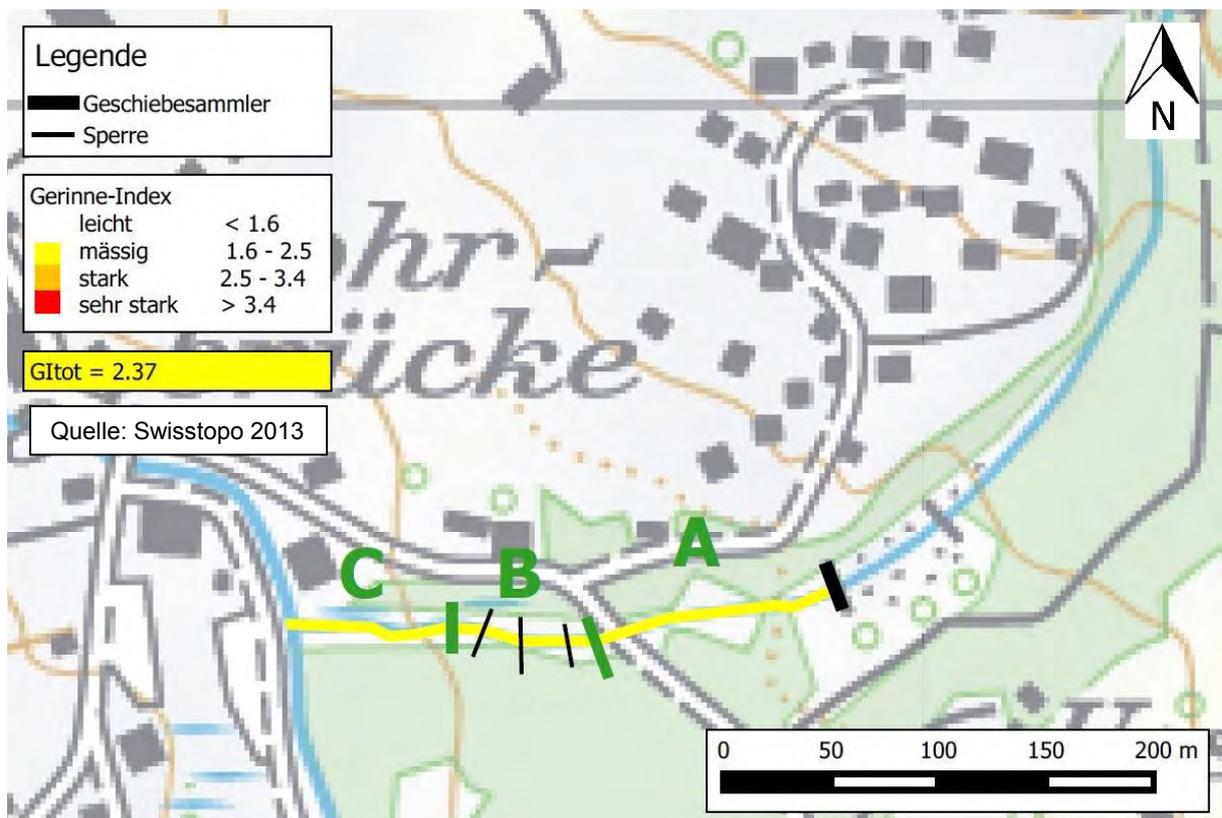


9 Mündung mit einer Fahne

**Gerinne-Index  $GI_{tot}$  2.28**

Der gesamte Unterlauf am Schwarzbach in Lauenen weist vergleichsweise geringe Verbauungen auf. Es ist auffällig, dass über den gesamten Unterlauf Fein- und Grobkomponenten abgelagert sind.

- Die Böschung des Abschnitt A ist mit einzelnen Blöcken und Längswerken aus Holz verbaut. Die Massnahmen vermögen die kleinen Rutschungen zu stabilisieren. Die Tiefenerosion von 20–40 cm wird als stark beurteilt.
- Im Abschnitt B sind die Ufer wiederum unbefestigt. Häufige Böschungsanbrüche sind erkennbar. Die drei Sperren weisen Kolk-tiefen von 20 cm auf und die Tiefenerosion ist mit 10–20 cm im Vergleich zum Abschnitt A weniger stark ausgeprägt.
- Im untersten Abschnitt C sind die instabilen Böschungen mit einem Längswerk aus Holz stabilisiert. Dennoch wird mobilisiertes Material aus aktiven Rutschungen unterhalb vom Längswerk in der Form eines kleinen Kegels abgelagert.



### Mündungs-Index 2

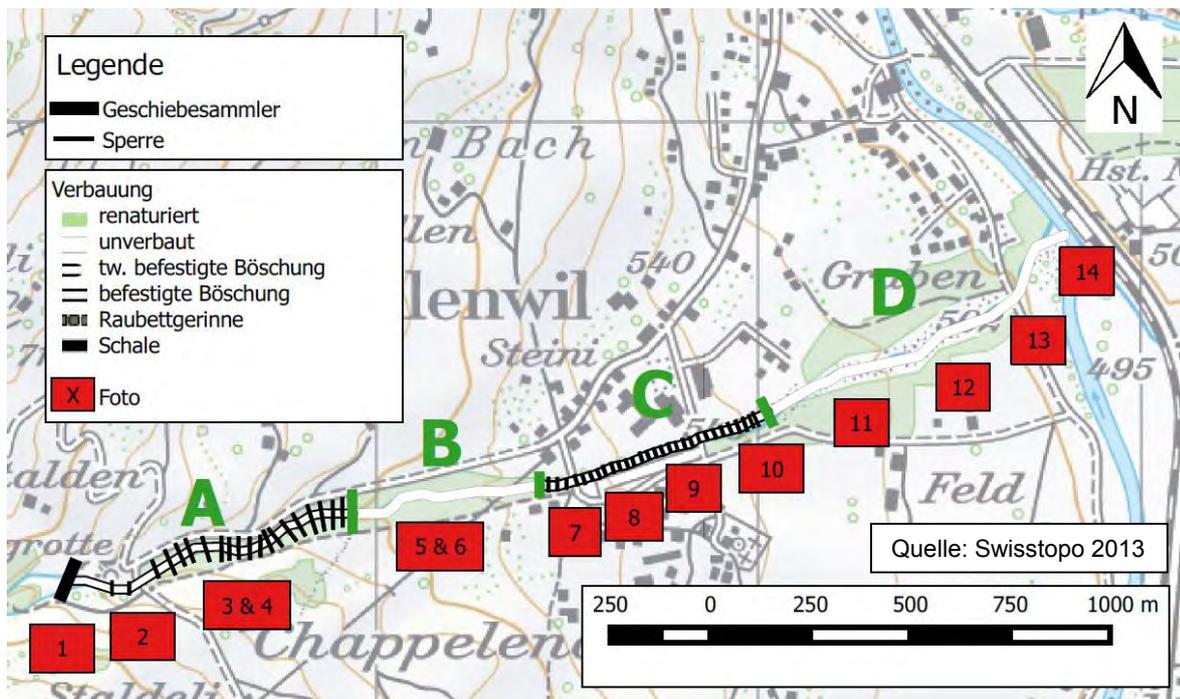
Der Schwarzbach mündet ohne Überfall in den Louibach. Beide Gerinne sind in diesem Streckenabschnitt nicht verbaut. Der Louibach weist im Vergleich zum Schwarzbach kaum Feinkomponenten auf. Im Louibach lagern sich die transportierten Feststoffe ab und sind in Form einer Fahne zu erkennen. Auf einer Länge von 4 m ist die Fahne flussabwärts identifizierbar. Durch die dunklen Sedimente des Schwarzbachs entsteht im Vorfluter eine Trübung.

### Rückhalte-Index 3.25

Das kleinste Mass des Geschiebesammlers am Schwarzbach nimmt lediglich 0.2 m ein. Aufgrund der kleinen Korngrösse des  $d_{90}$  von 0.25 m und der vertikalen Orientierung wird der Wert korrigiert.



D7 Steinibach Dallenwil



2 Unterspülte Böschung bei einem Kolken



5 Böschungserosion



7 Kolk



8 Beschädigte Sperre



11 Ausgeprägte Böschungserosion

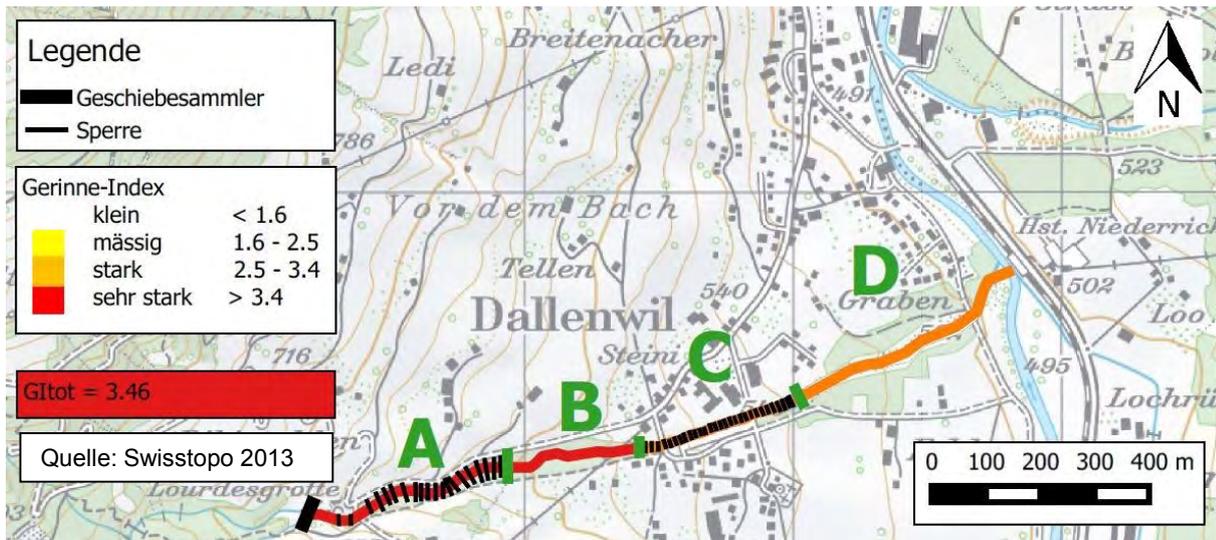


12 Passive Anreicherung Grobkomponenten

### Gerinne-Index $GI_{tot}$ 3.59

Der Steinibach in Dallenwil wird in vier Abschnitte unterteilt. Hierbei sind der Abschnitt A und C mit dichten Sperrtreppen und einer stark befestigten Böschung versehen und die Abschnitte B und D sind unverbaut.

- Die Blocksperrn im Abschnitt A weisen ein unterspültes Längswerk und Erosion von Blöcken im Überfall von Blocksperrn auf.
- Im unverbauten Abschnitt B ist die Erosion an der Böschung erheblich ausgeprägt. Die teilweise bis zu mehreren Metern hohe Erosion erstreckt sich an beiden Ufer über die gesamte Abschnittslänge. Die Erosionsspuren äussern sich in vertikalen Böschungen. Die ausgeprägte Eintiefung der Sohle führt zudem zu starker Böschungserosion.
- Das Gerinne weist Ablagerungen von Fein- und Grobkomponenten auf. Da anzunehmen ist, dass das abgelagerte Material aus dem Unterlauf mobilisiert ist, werden die Komponenten der Sohle nicht beurteilt.
- Im Abschnitt C sind Betonsperren gebaut, welche eine Überfallhöhe zwischen 0.2 und 1 m aufweisen. Diese Sperrn zeigen Erosionsspuren im Überfall und am Sperrnfuss. Um die Ausbreitung der Kolke zu begrenzen, sind künstliche Steinwälle als Sofortmassnahme erstellt.
- Im Abschnitt D ist lediglich die Feinfraktion der Komponenten ausgespült. Die Tiefen- und Böschungserosion ist weniger stark ausgeprägt als im Abschnitt B. Sie beträgt im Mittel dennoch 0.5 m.



### Mündungs-Index 3

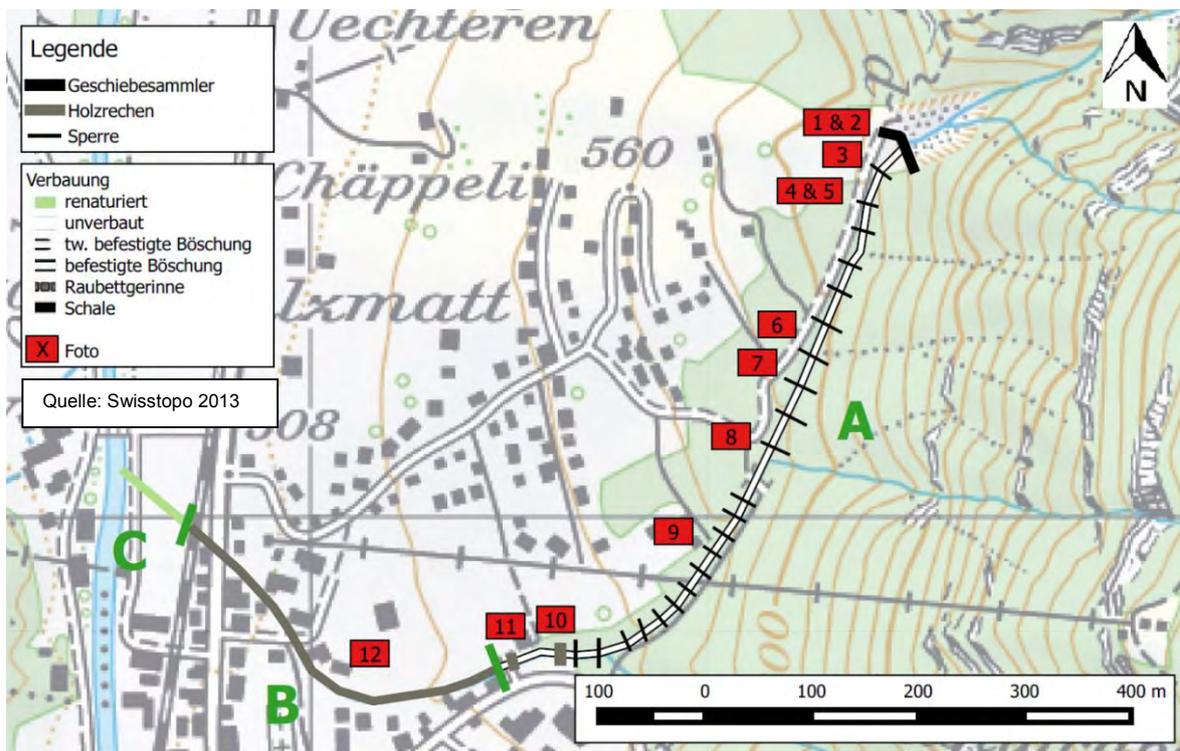
Im untersten Abschnitt D ist der Steinibach unverbaut und mündet in die Engelberger Aa. Das breite Gerinne des Steinibachs führt zu Ablagerungen oberhalb der Mündung. Zum Zeitpunkt der Feldbegehung werden aufgrund des Ereignisses vom Juni 2015 ca. 100 m von der Mündung entfernt Entnahmen durchgeführt. In der Engelberger Aa sind keine Ablagerungen vorzufinden. Aufgrund der Entnahme in Mündungsnähe besteht die Unsicherheit, dass die Kegelbildung aufgrund der aktiven Entnahme verhindert wird.

### Rückhalte-Index 3.25

Der Geschiebesammler wurde im Jahr 2009 nach dem Ereignis im Jahr 2005 neu dimensioniert (Schubiger 2009). Die kleinste Öffnung auf Gerinneebene beträgt eine Grösse von 0.8 m. Somit wird der Rückhalt als stark beurteilt. Korrekturen bezüglich der Korngrösse und der Orientierung der Öffnungen werden durch ein d90 von 0.75 m und horizontal orientierten Öffnungen nicht vorgenommen.



## D8 Hummligenbach Wolfenschiessen



3 Geschiebesammler und Sperre 1



8 Sperren 7 – 10 mit Kolkenschutz



4 Tiefenerosion

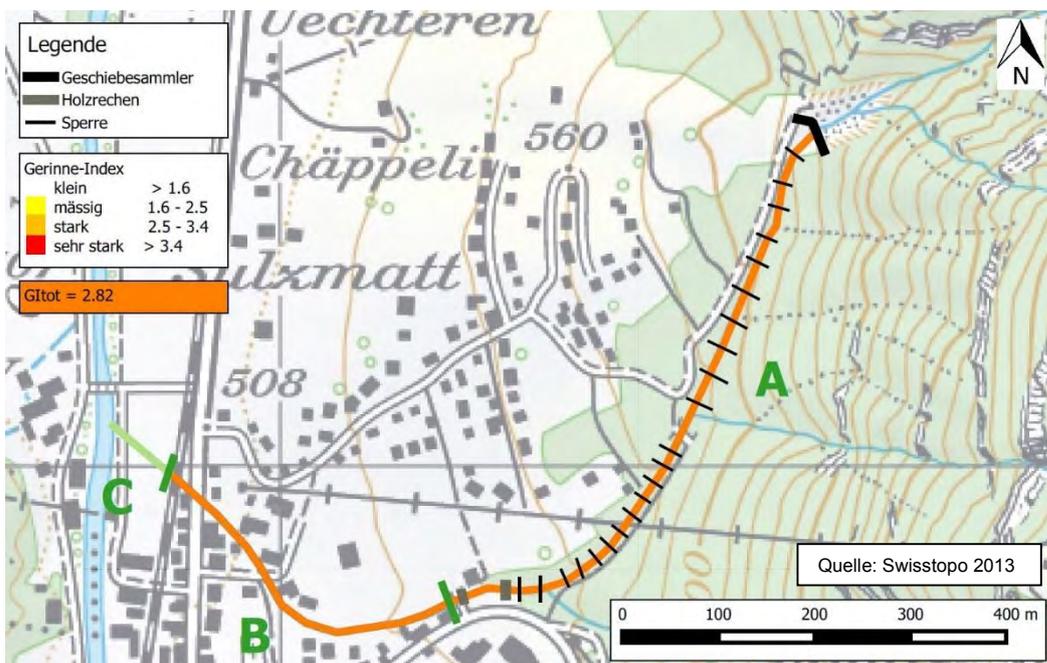


12 Gepflästerte Gerinnesohle

### Gerinne-Index $GI_{tot}$ 3.14

Der Humligenbach in Wolfenschieden ist in drei Abschnitte unterteilt. Der Abschnitt A ist mit Sperren verbaut, Abschnitt B weist eine Schale auf und die Mündung im Abschnitt C ist renaturiert.

- Im Abschnitt A sind dichte Sperrentreppen im Abstand zwischen 10 und 20 m gebaut. Die Sperrenfüsse sind mit Ausnahme der Sperre 7 mit einem Kolkschutz versehen. Somit liegt die Kolkentiefe unter 0.25 m. Da einzelne Kolkschutze Instabilitäten aufweisen, indem Blöcke erodiert sind oder der Kolkschutz wenige Zentimeter unterspült ist, wird die Kategorie 2 gewählt. Im untersten Teil des Abschnittes sind zwei Holzrechen errichtet. Der Feststofftransport ist durch die beiden Rechen nicht direkt beeinflusst. Aus diesem Grund wird der Rechen nicht in den Korrekturfaktor der Verbauung integriert.
- Der Abschnitt B ist durch eine komplett verbaute Schale ohne Ablagerungen gekennzeichnet.
- Der Abschnitt C ist renaturiert. Da angenommen wird, dass die Ablagerungen und Kiesbänke künstlich aufgeschüttet sind, werden die Komponenten der Sohle nicht beurteilt.



**Mündungs-Index \* renaturiert**

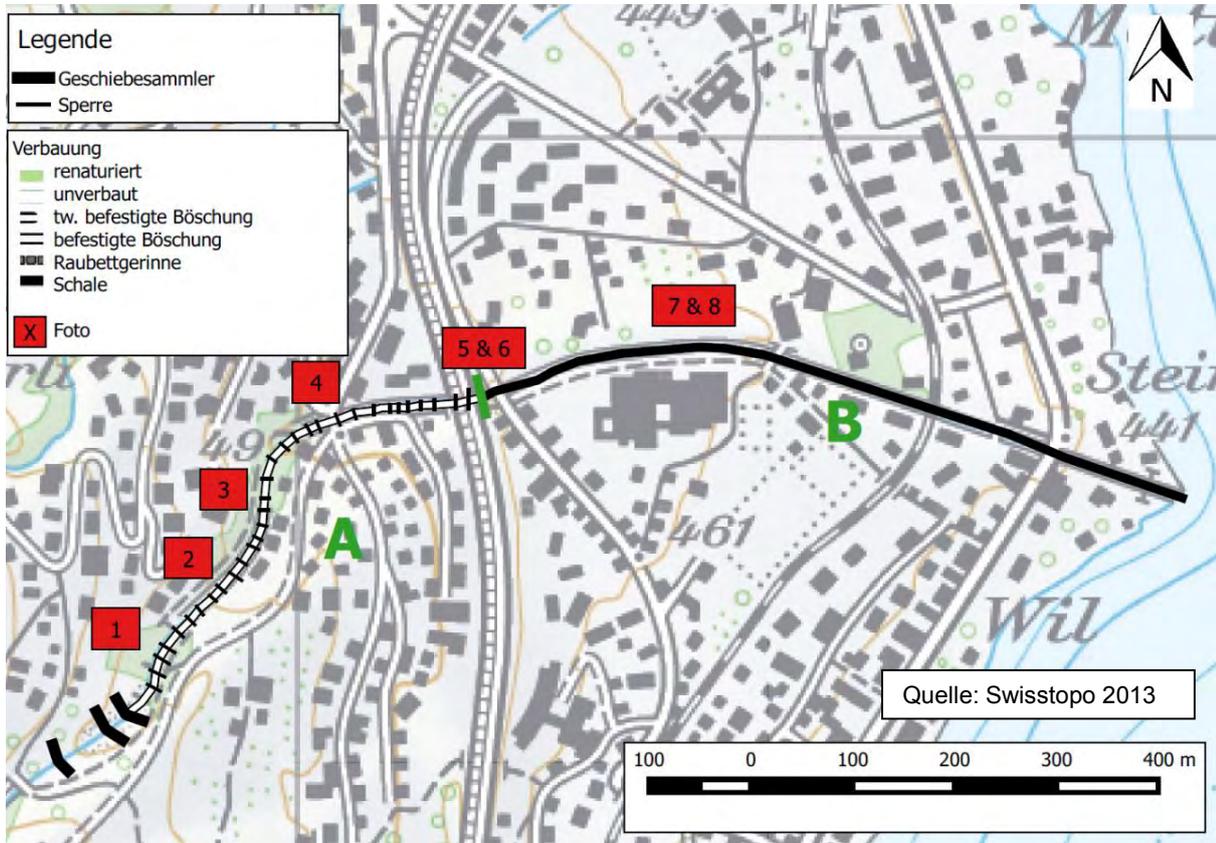
Oberhalb von Dallenwil mündet der Hummligenbach in die Engelberger Aa. Die Mündung wurde im Jahre 2014 renaturiert. Durch die Aufweitung und Aufschüttung von Kiesbänken ist ein Grossteil der Ablagerung künstlich entstanden. Aus diesem Grund wird dem Hummligenbach kein Mündungs - Index zugeteilt.

**Rückhalte-Index 4**

Hinter dem vorgelagerten Holzrechen am Absperrbauwerk ist als Durchlass ein weiterer Rechen erstellt. Die Stäbe sind in einem Abstand von 0.1 m gebaut. Somit wird ein Index von 4 gewählt. Dieser wird weder durch die Korngrösse, noch durch die Orientierung der Fenster korrigiert.



**D9 Steinibach Hergiswil**



2 Nachgelagerter Holzrechen

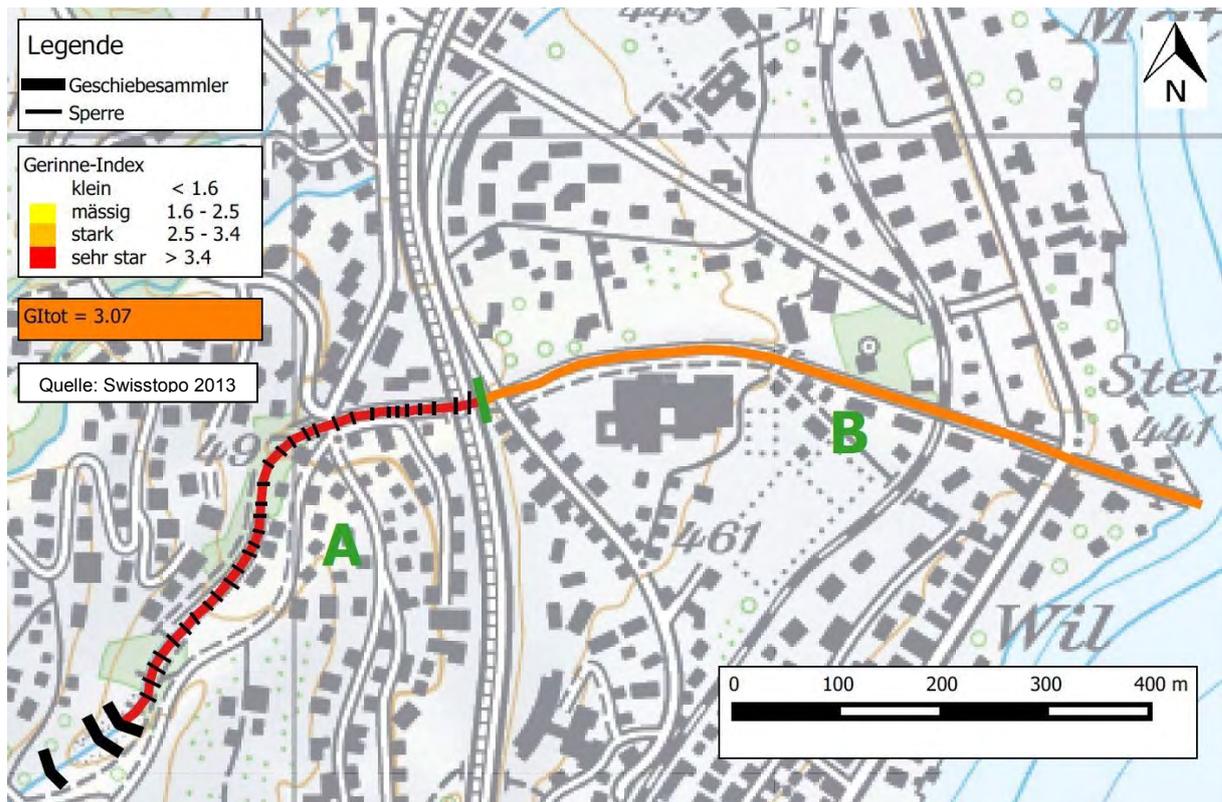


4 Unterspülte Deckschicht Sperre 15

**Gerinne-Index  $GI_{tot}$  3.67**

Der Steinibach in Hergiswil ist im steileren Abschnitt A mit dichten Sperrentreppen mit einem mittleren Abstand von 10 m verbaut und im flacheren Abschnitt B mit einer Schale.

- Im Abschnitt A weisen die Kolke eine Tiefe von bis zu 80 cm auf. Zudem spült der Kolk der Sperre 10 die Feststoffe bis zur nächsten Sperre aus. Bei vier Sperren ist die Deckschicht der Kolke erodiert.
- Im Abschnitt B der gepflasterten Schale werden keine Ablagerungen identifiziert.



### Mündungs-Index 3

Der Steinibach mündet über eine gepflasterte Schale in den Vierwaldstättersee. Im Gelände ist unmittelbar unterhalb der Schale am eher flachen Seeufer keine Ablagerung in Form eines Kegels zu erkennen.

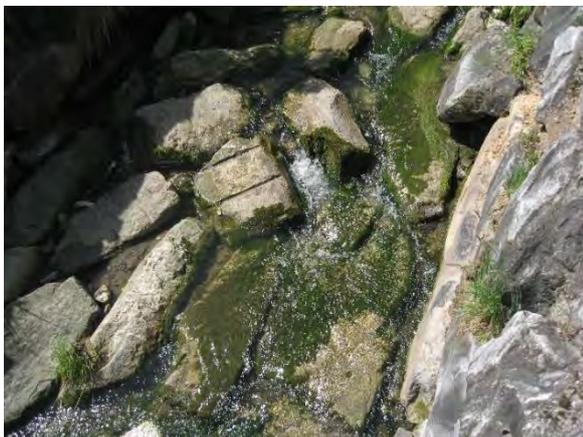
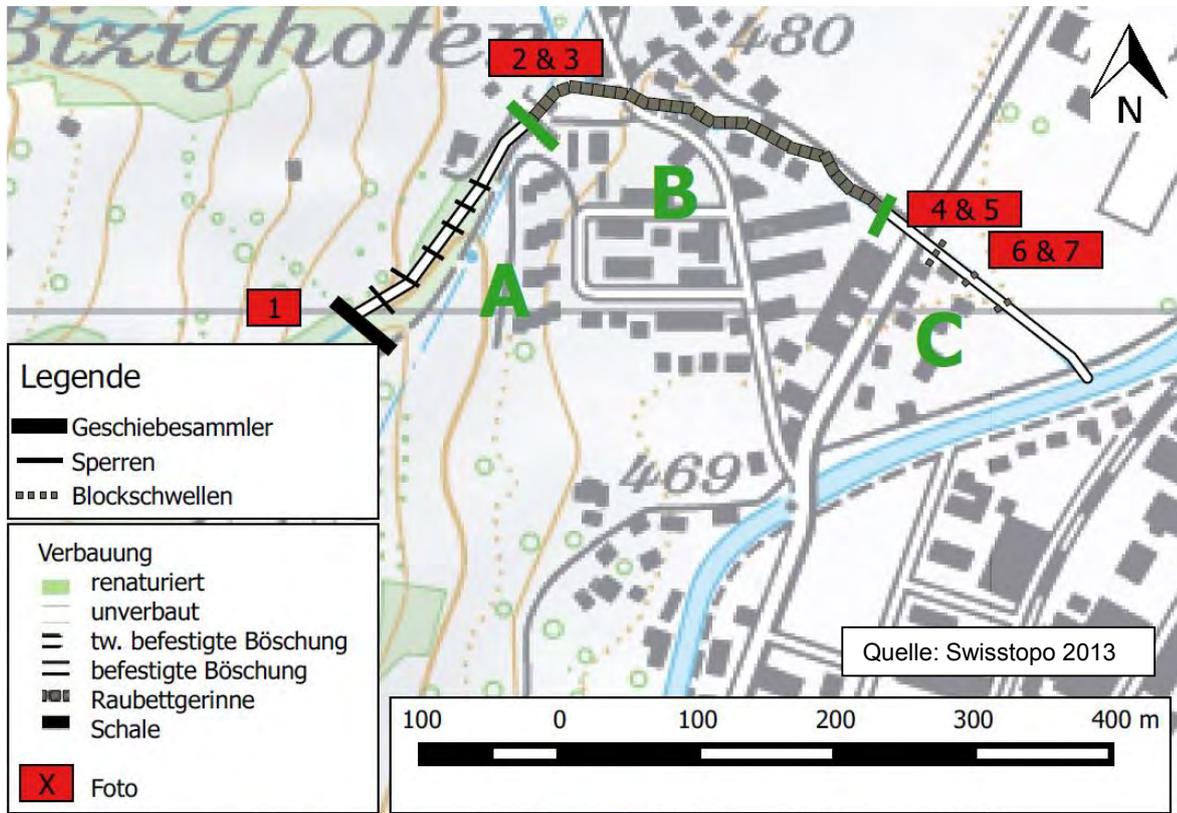
### Rückhalte-Index 3.63

Der Geschiebesammler am Steinibach wurde aufgrund von mangelnden Schutzziele 2012 neu dimensioniert. Es wurde ein dreifaches Absperrbauwerk errichtet. Da die drei Bauwerke in einem Abstand von je ca. 50 m gebaut sind und eine identische Öffnung aufweisen wird angenommen, dass der Rückhalt für die jeweiligen Absperrwerke identisch ist. Eine Anpassung des



Rückhalte – Index durch den dreifachen Geschiebesammler wird nicht vorgenommen, da aufgrund des identischen Durchlasses und nur einem Standort der Materialentnahme eine geringe Veränderung der Rückhaltewirkung angenommen wird. Das kleinste Mass misst 0.2 m. Basierend auf dem beurteilten Index Wert 4 wird eine Korrektur der Korngrösse ( $d_{90}$  entspricht 0.3 m) vorgenommen.

D10 Bitzighoferbach Sarnen



3 Raubettgerinne ohne Feinfraktion



6 Seitliche Kolkbildung

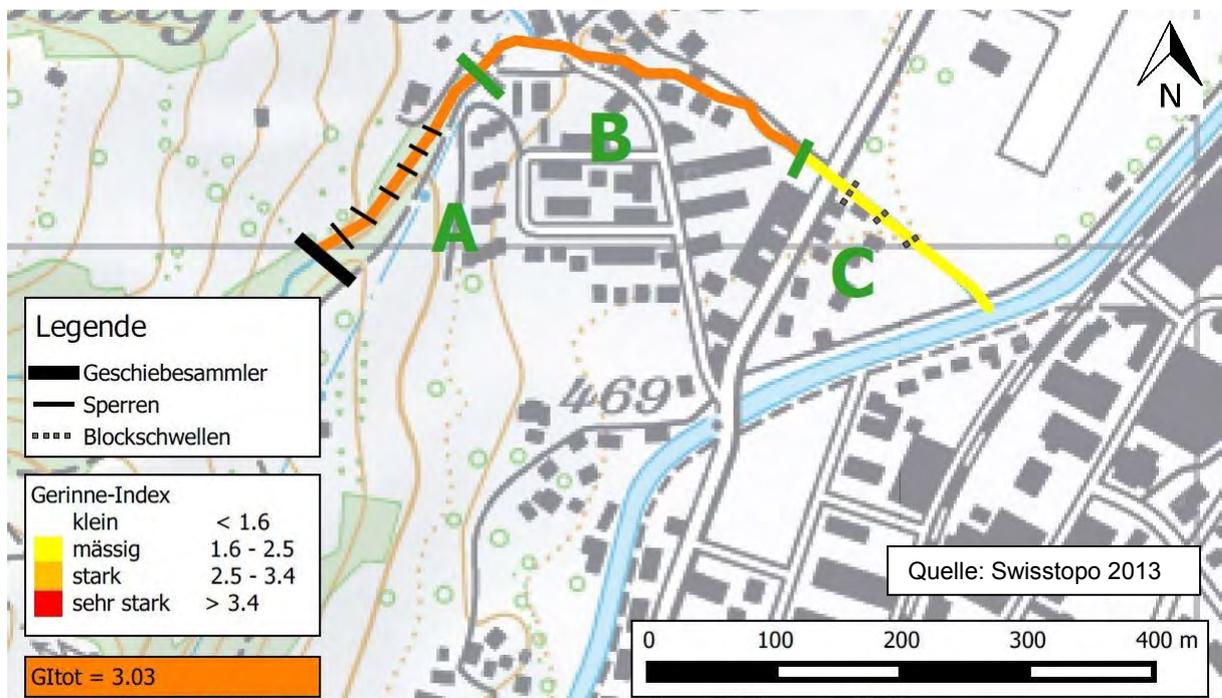


7 Tiefenerosion

### Gerinne-Index $GI_{tot}$ 3.03

Der Bitzighoferbach ist in einen Abschnitt A mit Sperren, einen Abschnitt B mit einem Raubettgerinne und einen nahezu unverbauten Abschnitt C geteilt.

- Im Abschnitt A sind 6 Sperren mit einer Überfallhöhe von 1.5 m gebaut. Die max. Kolktiefe liegt bei 0.8 m. Die Gerinnesohle weist eine passive Anreicherung von Grobkomponenten auf.
- Im Abschnitt B ist eine Tiefenerosion von 0.1–0.2 m im Raubettgerinne zu erkennen. Ablagerungen sind keine vorzufinden.
- Der Abschnitt C ist mit Sohlgurten und Blöcken zur Ufersicherung leicht verbaut. Das Gerinne weist Ablagerungen von Fein- und Grobkomponenten auf. Die Tiefenerosion beträgt max. 30 cm.



### **Mündungs-Index 3**

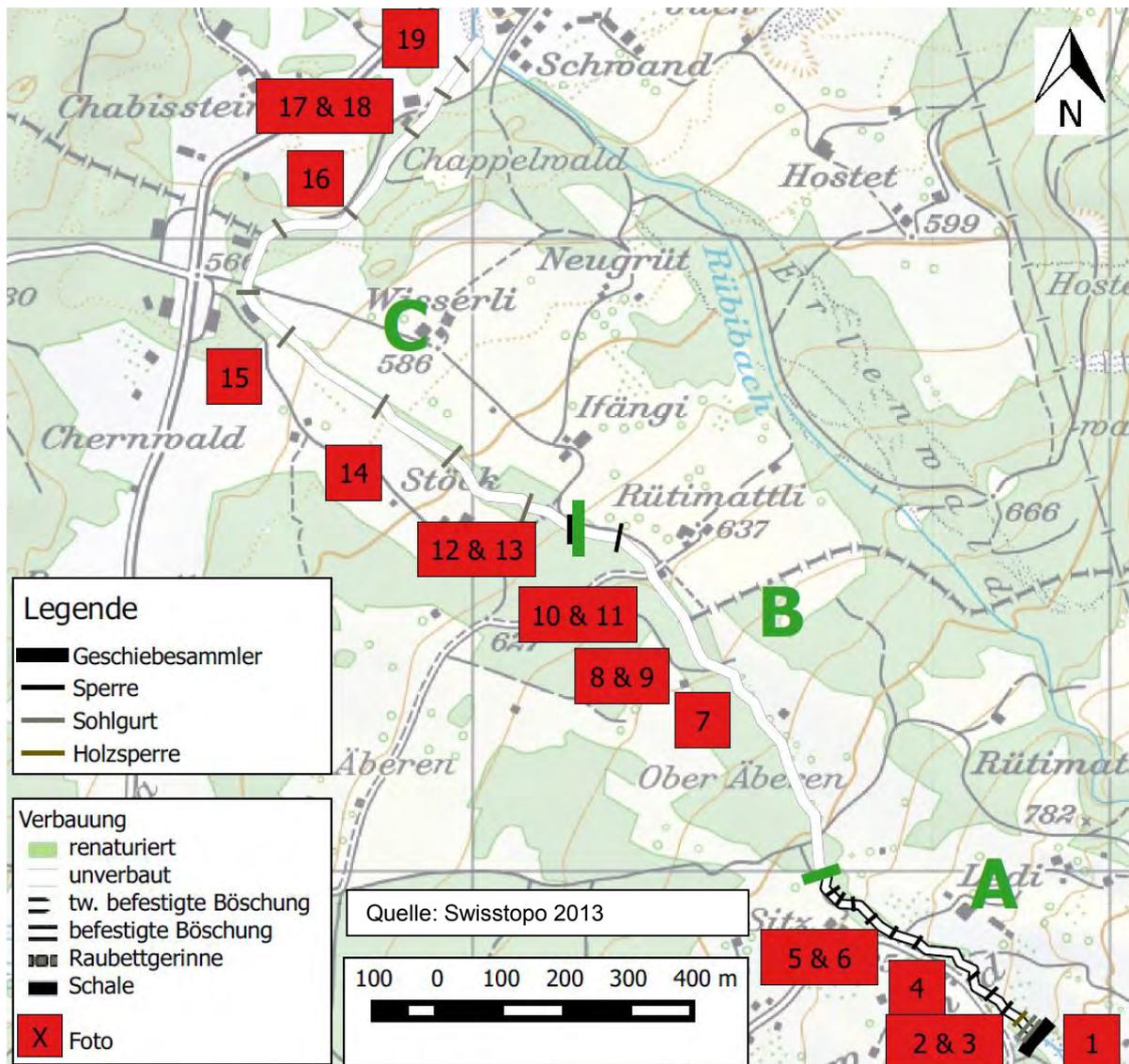
An der Mündung des Bitzighoferbachs in die Sarneraa sind keine Ablagerungen festzustellen. Die Mündung ist ohne Überfall und erhebliche Verbauungen der Sohle gestaltet. Es ist anzunehmen, dass die hohe Transportkapazität der Saaneraa Ablagerungen von Feinkomponenten erschwert.

### **Rückhalte-Index RI 4**

Durch die neue Dimensionierung des Sammlers im Jahr 2007 wurde der Rückhalt erhöht. Der aktuelle Rückhalt wird aufgrund des kleinsten Masses von 0.2 m auf Gerinnehöhe, einer erfassten Korngrösse ( $d_{90}$ ) von 0.6 m und keiner vertikalen Orientierung der Öffnungen als sehr stark beurteilt.



D11 Melbach Kerns



4 Instabile Holzsperrre



5 Betonsperrre mit gering ausgeprägtem Kolken



6 Erosionsspuren eines Kolken



8 Starke Tiefen- und Böschungserosion



12 Rutschung unterhalb Sperre

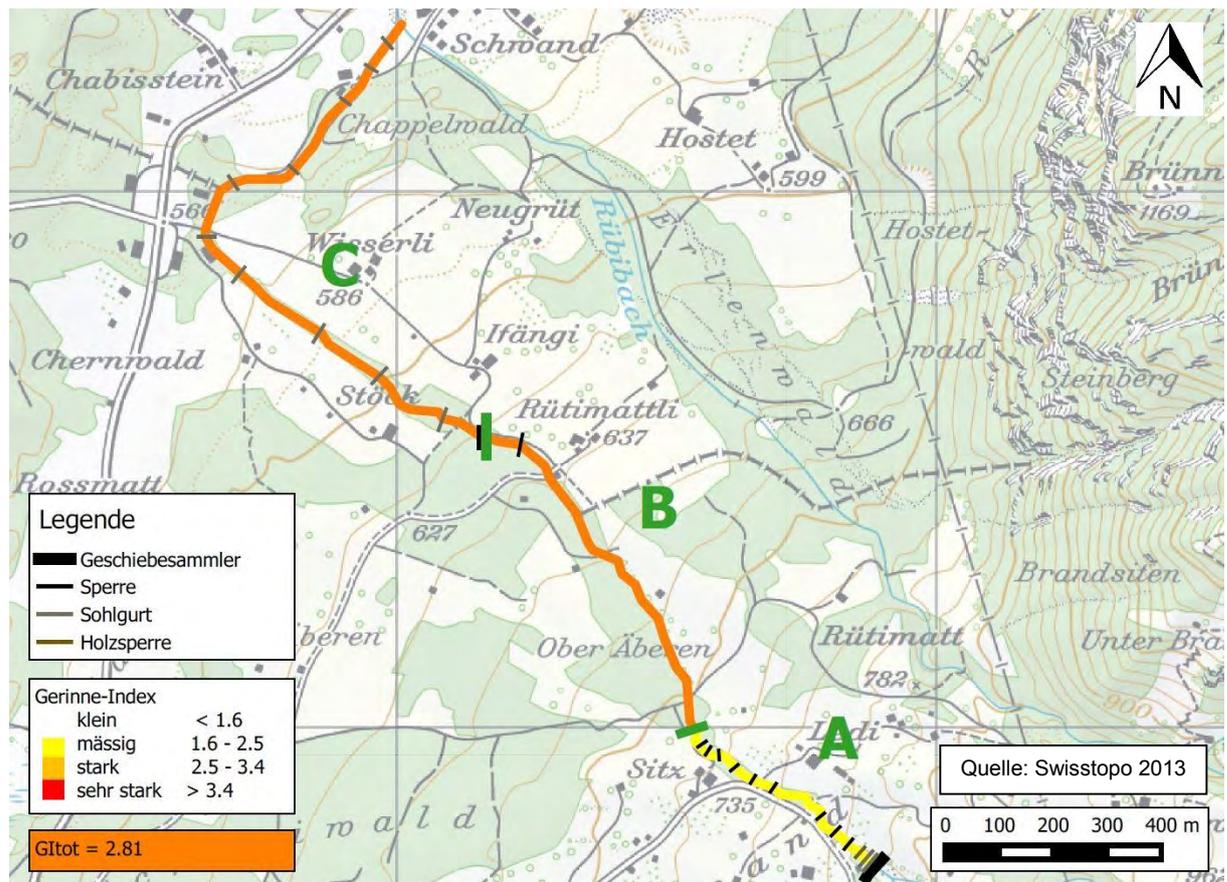


18 Spuren Kolk in trockenem Flussbett

### Gerinne-Index $GI_{tot}$ 2.83

Der Melbach weist einen steileren Abschnitt A mit Sperrentreppen, einen unverbauten Abschnitt B und einen flacheren Abschnitt C mit einzelnen Sperren auf.

- Im Abschnitt A sind deutliche Ablagerungen im Unterlauf zu erkennen. Lediglich die Feinfraktion ist ausgespült. Mit einer Tiefen- und Böschungserosion sowie der Kolkentiefe von max. 20 cm ist die Erosion gering. Somit werden die Feststoffe als Ablagerung beurteilt.  
Die Betonsperren sind funktionsfähig und weisen kleine Kolke auf. Die Holzsperrre direkt unterhalb des Geschiebesammlers der Datenbank Solid ist defekt, da die obersten Stämme des Überfalls gebrochen sind. Es wird angenommen, dass die Instabilität durch das Material und nicht die Erosion entsteht.
- Der Abschnitt B ist unverbaut. Er ist geprägt von stark ausgeprägter Tiefen- und Böschungserosion, welche sich über den gesamten Abschnitt erstrecken. Die Ablagerungen der Sohle werden aufgrund der Erosion nicht beurteilt.
- Der unterste Abschnitt C mit Sperren im Abstand von ca. 20 m gebaut. In diesem Abschnitt sind Hinweise auf einen dynamischen Feststofftransport ersichtlich, indem einzelne Sperren mit Ablagerungen überprägt sind und andere Ablagerungen auf den Sperre bereits abgetragen sind.



#### Mündungs-Index 4

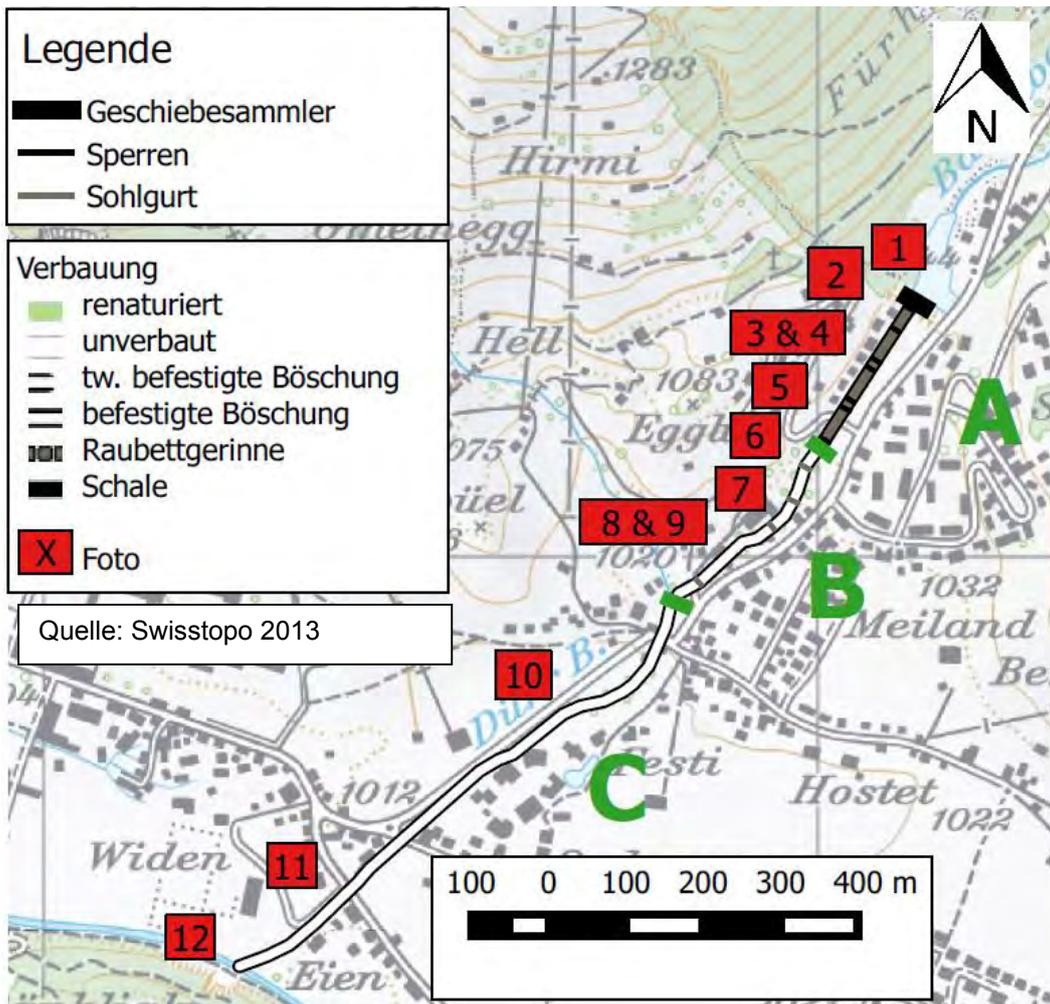
Eine Besonderheit des Melbachs ist, dass der Unterlauf über eine Sperre mit einer Höhe von 0.5 m in einen Rückhalteraum eines Geschiebesammlers mündet. Aufgrund des trockengelegten Gerinnes ist anhand von den Spuren der Ablagerungen zu erkennen, dass sich aufgrund des Ist-Zustandes unterhalb des Einlaufbauwerks einen Kolken gebildet hat.

#### Rückhalte-Index 2.88

Das kleinste Mass des Durchlasses des untersuchten Geschiebesammlers mit einer Schlitzsperr am Melbach beträgt 0.8 m. Die Korngrösse ( $d_{90}$ ) wird auf 0.6 m beurteilt. Somit wird der Index von 3 einzig durch die vertikale Orientierung der Öffnung korrigiert.



D12 Dürrbach Engelberg



2 Sperrentreppen mit befestigter Böschung



8 Sohlgurte



11 Passive Anreicherung Grobkomponenten

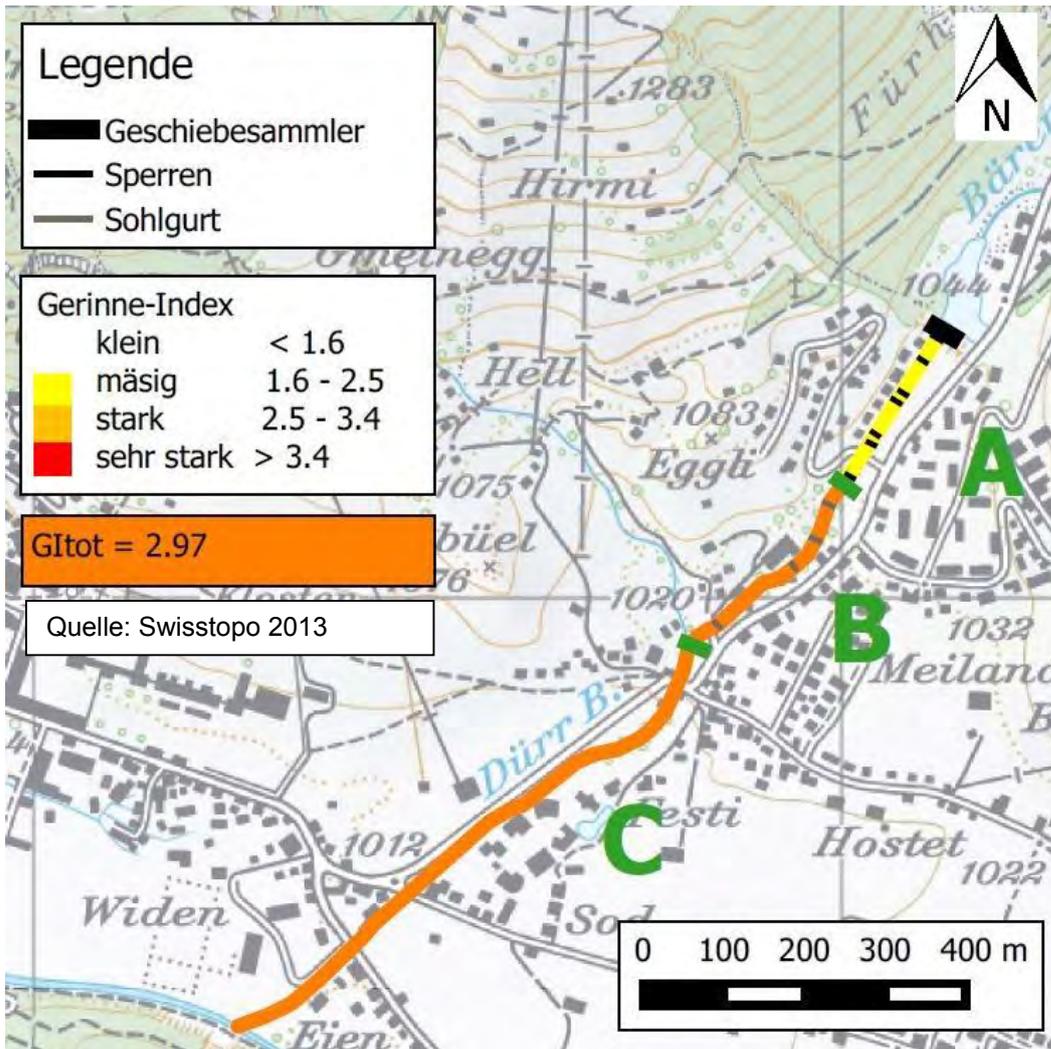


12 Mündung in Engelberger Aa

### Gerinne-Index $GI_{tot}$ 3.58

Der Unterlauf des Dürrbachs ist in drei Abschnitte unterteilt. Alle Abschnitte weisen eine senkrecht verbaute Böschung auf, weshalb die Böschungserosion nicht beurteilt wird.

- Die fünf Sperren sind mit unterschiedlicher Überfallhöhe und variierendem Abstand gebaut. Die Kolke unterhalb der Sperren sind lediglich 20 – 30 cm tief. Durch Schwebstoffe ist die Gerinnesohle nicht eindeutig zu identifizieren. Aufgrund der Trübung des Abflusses sind die Komponenten der Sohle nicht sichtbar. Deshalb werden die Komponenten der Sohle nicht beurteilt. Eine Erklärung für den hohen Feinstoffanteil ist die Bildung von Turbulenzen durch die touristische Nutzung des Sees im Rückhalteraum des Geschiebesammlers. Die unterspülte Vegetation zeigt eine Tiefenerosion von wenigen Zentimetern.
- Die passive Anreicherung von Grobkomponenten ist im Abschnitt B sichtbar.
- Im Abschnitt C sind die Sohlgurte durch Stellen mit befestigten Querwerken ersetzt. Zwischen diesen Querwerken ist eine Eintiefung der Sohle von bis zu 40 cm zu erkennen.



### Mündungs-Index 3

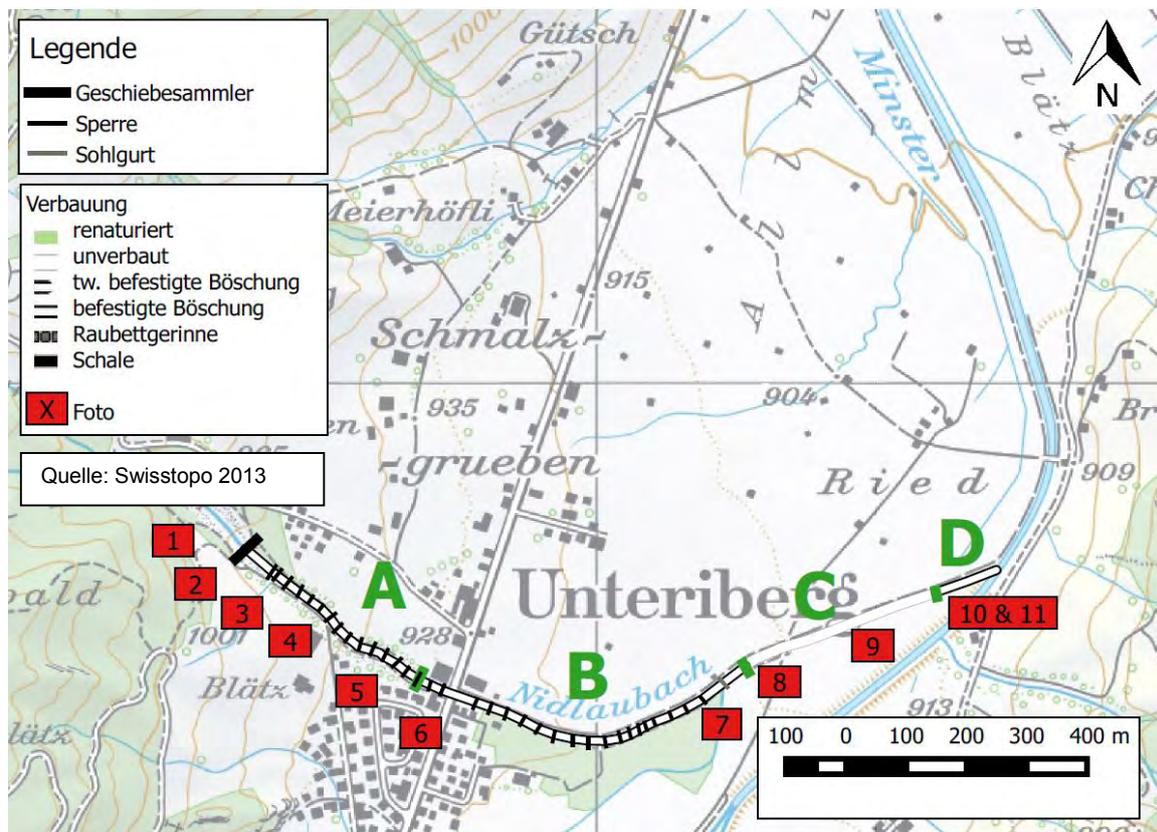
Der Dürrbach in Engelberg mündet über eine Sperre in die Engelberger Aa. Aufgrund der Turbulenz unterhalb der Schwelle sind die Gerinnesohle und somit auch die allfällige Ablagerungen nicht zu erkennen. Durch Überprüfung der Tiefe mit einem Jalon kann bestätigt werden, dass sich unterhalb der Schwelle kein Kolk entstanden ist.

### Rückhalte-Index 4

Der Geschiebesammler am Dürrbach ist mit keinem klassischen Absperrbauwerk mit Öffnungen gebaut, sondern als sogenannte Vollsperrre (Bergmeister et al. 2009). Die Feststoffablagerung erfolgt durch den flachen Ablagerungsbereich. Durch die Vollsperrre wird trotz des  $d_{90}$  von 0.25 m keine Korrektur vorgenommen.



## D13 Nidlaubach Unteriberg



4 Schwelle 4 mit Kolkchutz



6 Erosierte Deckschicht unterhalb Sperre



9 Renaturiertes Bachbett

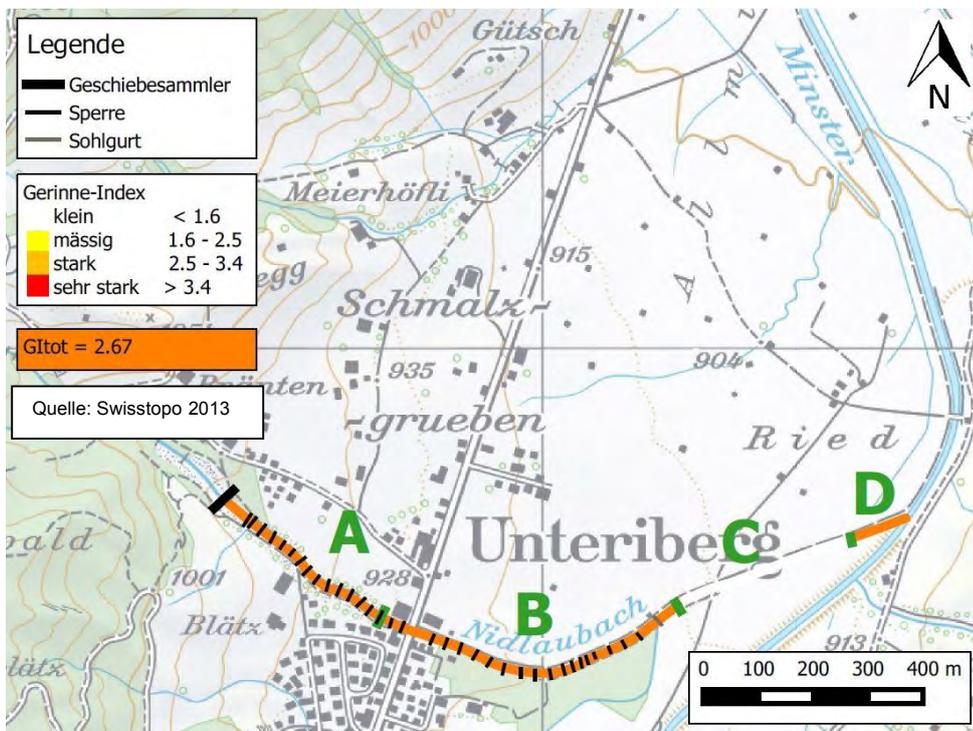


11 Mündung in die verbaute Minster

### Gerinne-Index $GI_{tot}$ 2.83

Der Nidlaubach ist in vier einheitlich verbaute Abschnitte unterteilt. Zum Zeitpunkt der Feldbegehung befindet sich der Abschnitt A als Massnahme der unterspülten Sperren im Umbau (Herzog et al. 2015). Deshalb werden im Abschnitt A lediglich die ersten vier fertiggestellten Sperren beurteilt.

- Die gesamte Böschungshöhe im Abschnitt A ist mit Blocksätzen befestigt. Zwischen den Sperren sind Sohlgurte mit einer befestigten Sohle gebaut, wodurch die Kolkbildung und Tiefenerosion verhindert wird. Auf der Gerinnesohle sind keine Ablagerungen ersichtlich.
- Die Deckschicht ist bei einzelnen Sperren stark erodiert. Die Tiefenerosion ist ersichtlich, indem sich bei einzelnen Sperren vor der Überfallsektion Kolkiefen von 10–20 m bilden.
- Der Abschnitt C ist renaturiert und führt keine Spuren der Erosion auf.
- Im Abschnitt D ist die Böschung mit Blocksteinen befestigt und auf der gepflasterten Sohle sind keine Ablagerungen zu erkennen.



### Mündungs-Index 3

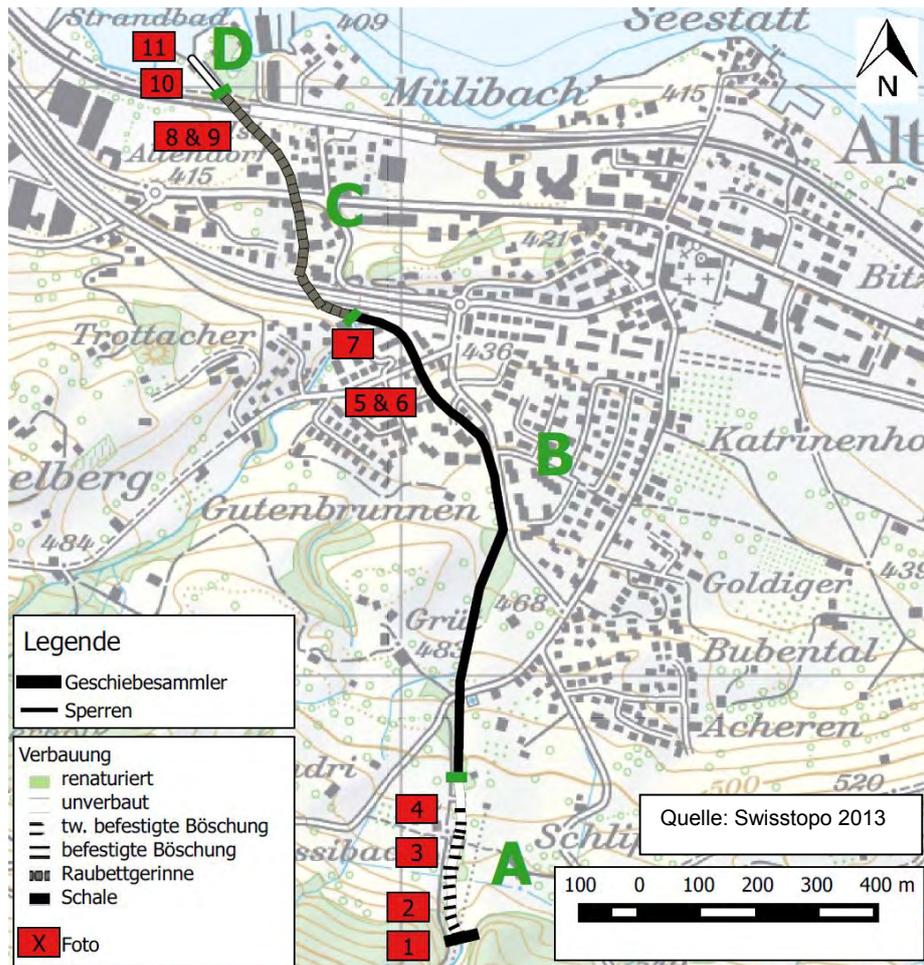
Wie auch der unterste Abschnitt des Nidlaubachs weist der Vorfluter Minster ein gepflastertes Gerinne auf. Dadurch ist die Bildung eines Kolks nicht möglich. Flussauf und –abwärts der Mündung sind Ablagerungen von Kiesbänken am Ufer zu erkennen. Da auf der Höhe der Mündung des Nidlaubachs keine Ablagerungen vorzufinden sind, wird die Mündung mit einem Index der Kategorie „keine Ablagerung“ beurteilt.

**Rückhalte-Index 3.63**

Der Geschiebesammler am Nidlaubach wurde im Rahmen des Hochwasserschutzprojektes vergrössert und ein neuer Holzrechen erstellt. Das kleinste Mass der Öffnung auf Gerinnehöhe misst 0.5 m. Der Index des Wertes 4 wird durch die Korngrösse des d90 von 0.5 m korrigiert.



D14 Chessibach Altendorf



2 Rutschung unterhalb der Sperre 4



3 Passive Anreicherung Grobkomponenten



4 Unterspültes Sperrfundament

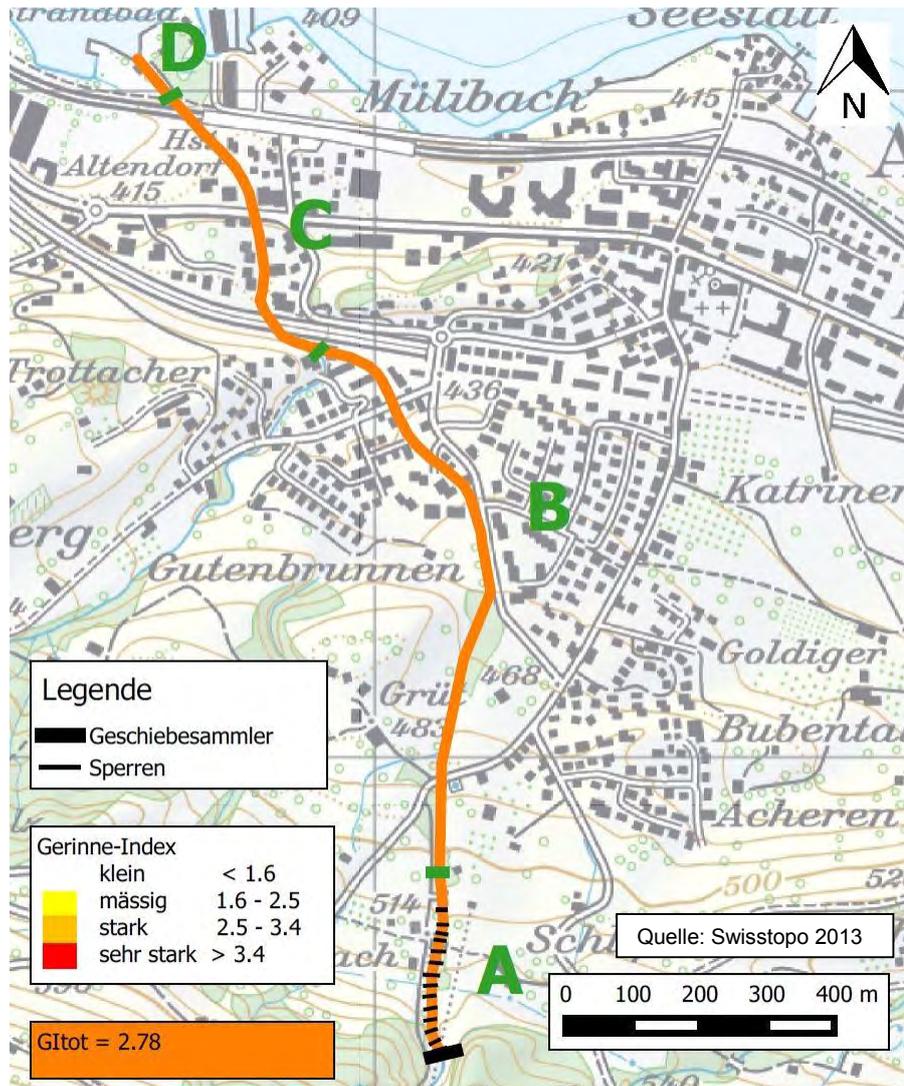


9 Raubettverbau ohne Ablagerungen

**Gerinne-Index  $GI_{tot}$  3.59**

Der Chessibach ist in vier unterschiedlich verbaute Abschnitte unterteilt.

- Der Abschnitt A weist Sperrtreppen mit einer Überfallhöhe von 1.5 m auf. Die mittlere Kolktiefe ist mit 0.6 m sehr stark ausgeprägt. Einzelne Rutschungen sind an beiden Ufern erkennbar. Im Gerinne reichen sich Grobkomponenten an.
- Der Abschnitt B mit einer gepflästerten Schale weist keine Ablagerungen auf.
- Der Abschnitt C ist mit einer befestigten Böschung und einem Raubettgerinne gebaut. Auf der Sohle sind keine Ablagerungen zu erkennen und zwischen den Blöcken im Raubettgerinne wird eine Tiefenerosion von wenigen Zentimetern gemessen.
- Im untersten Abschnitt D ist die Böschung befestigt und die Sohle unverbaut. Im Gerinne ist eine passive Anreicherung von Grobkomponenten vorzufinden und eine geringe Tiefenerosion unmittelbar hinter der im Gerinne abgelagerten Blöcken.



### Mündungs-Index 3

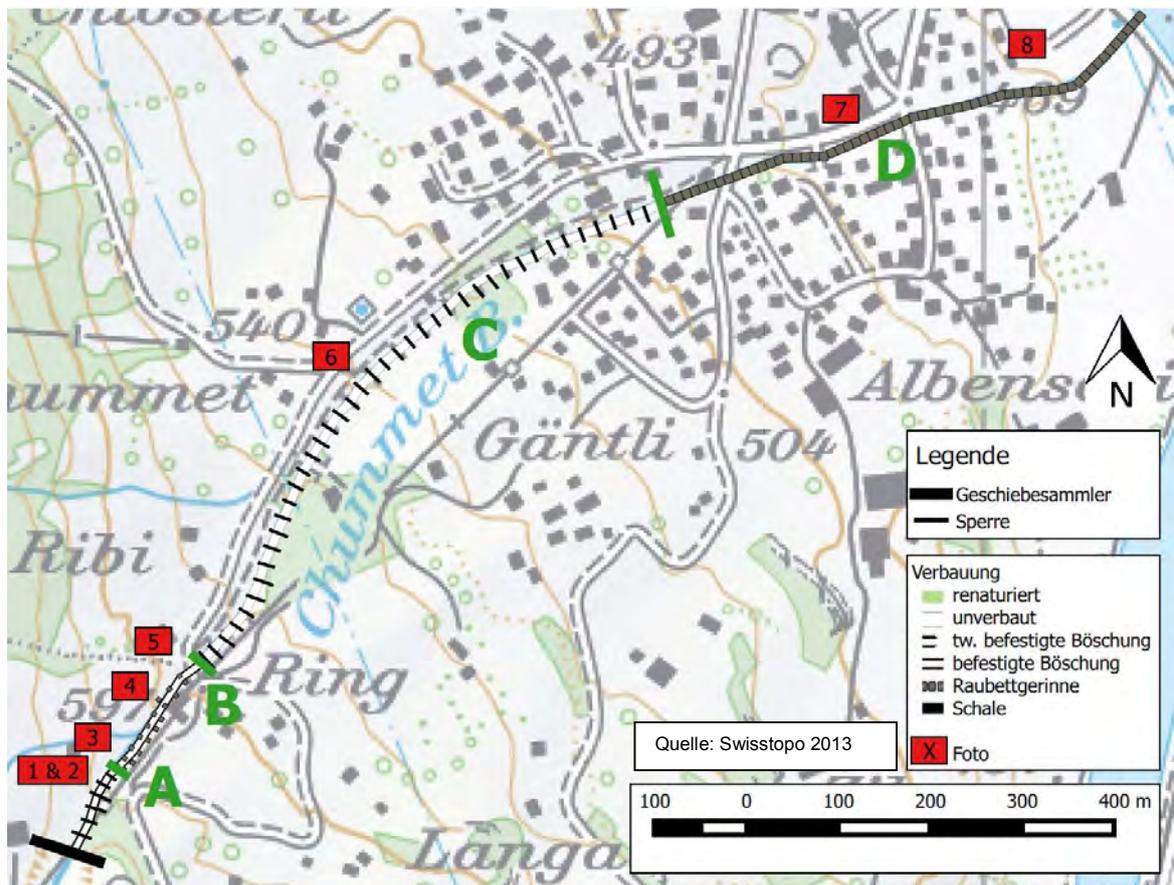
Der Chessibach in Altendorf mündet in den Obersee des Zürichsees. Die Gerinnesohle des Einlaufs befindet sich ca. 50 cm unterhalb des Pegels des Sees. An der Mündung und am Seeufer sind keine Ablagerungen durch den Chessibach erkennbar.

### Rückhalte-Index 4

Das kleinste Mass der drei Öffnungen auf Gerinnehöhe ist 0.2 m hoch und wird deshalb mit dem Index der sehr hohen Rückhaltung beurteilt. Aufgrund der Korngrösse von 0.75 m und der horizontalen Orientierung der Fenster ist keine Korrektur vorzunehmen.



## D15 Kummetbach Attinghausen



4 Eingestürzte Blockschwelle 10



5 Beschädigter Überfall bei Blockschwelle 12



7 Gepflästerte Sohle

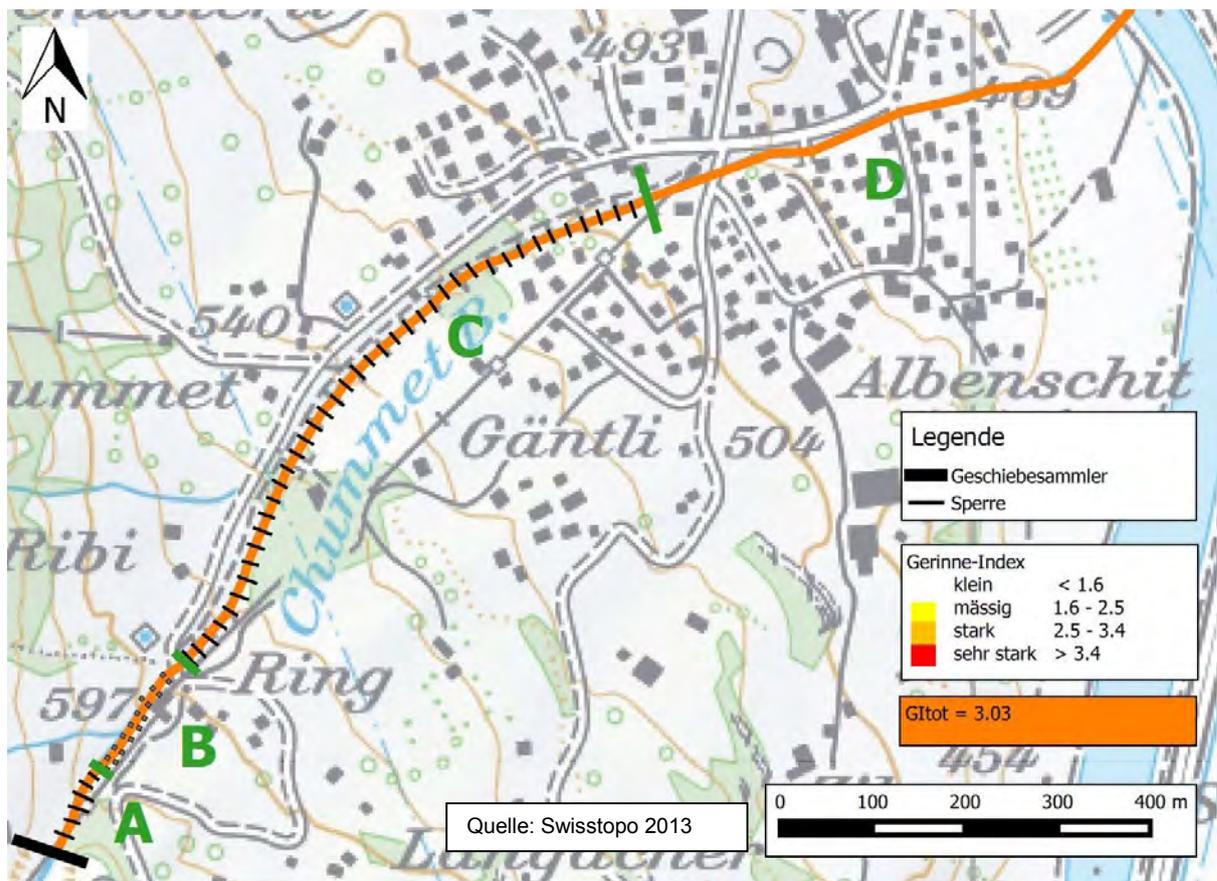


8 Mündung in Reuss mit Kolk

### **Gerinne-Index $GI_{\text{tot}}$ 3.67**

Am Kummelbach sind vier Abschnitte mit unterschiedlicher Verbauung vorzufinden. Im gesamten Unterlauf ist die Böschung befestigt.

- Der Abschnitt A weist intakte Sperren auf. In den Ablagerungen zwischen den Sperren ist lediglich die Feinfraktion ausgespült. Die Tiefenerosion und die Kolkentiefe werden zwischen 20–40 cm bemessen.
- Die Blocksperren in Abschnitt B weisen eine Überfallhöhe von ca. 50 cm auf. Sie sind stark beschädigt. Die Schäden erstrecken sich von einzelnen erodierten Blöcken des Überfalls bis zu zwei komplett eingestürzten Blocksperren. Zudem lassen sich stark ausgeprägte Erosionen der Deckschicht erkennen.
- Der Abschnitt C weist wiederum Sperrentreppen auf. Im Gerinne ist lediglich die Feinfraktion der Ablagerung ausgespült. Die Tiefenerosion und die Kolkbildung sind stark ausgeprägt.
- Die Sohle des untersten Abschnitts D ist gepflästert. Ablagerungen sind keine vorzufinden.



#### Mündungs-Index 4

Der gepflasterte Kummetbach mündet in die Reuss. Am Ufer der Reuss sind auf einer Breite von 10–50 cm einzelne Kiesablagerungen festzustellen. Auf der Höhe der Mündung des Kummetbachs hat sich in den Ablagerungen ein Kolk gebildet.

#### Rückhalte-Index 1.38

Der Sammler mit einer Schlitzsperre mit Balkenverschluss weist auf der Gerinnehöhe Öffnungen von 1.5 m x 2 m auf. Somit wird die Rückhaltewirkung mit dem Index 1 des schwachen Rückhalts beurteilt. Zudem liegt eine Korrektur durch die vertikale Orientierung der Öffnung vor. Aufgrund eines  $d_{90}$  von 0.8 m im Ablagerungsraum wird die Korngrösse nicht korrigiert.

