



2021

Die erforderliche Geschiebefracht

Fachbericht zum Modul «Geschiebehaushalt –
Massnahmen» der Vollzugshilfe Renaturierung
der Gewässer



Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU) Abteilung Wasser
Papiermühlestrasse 172
3003 Bern

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

Autoren

Dr. Ueli Schälchli, Flussbau AG SAH, 8008 Zürich; ueli.schaelchli@flussbau.ch
Dr. Lukas Hunzinger, Flussbau AG SAH, 8008 Zürich, lukas.hunzinger@flussbau.ch

Kontakt

Manuel Nitsche
058 464 07 05
manuel.nitsche@bafu.admin.ch

Impressum	2
1 Einleitung	4
1.1 Zweck des Fachberichts	4
1.2 Motivation, Ziele und Konzept der Methodik «erforderliche Geschiebefracht».....	4
1.3 Inhalt des Fachberichts.....	6
2 Herleitung	7
2.1 Ansätze der Regimetheorie.....	7
2.1.1 Gerinneform	7
2.1.2 Gerinnebreite	9
2.2 Datengrundlage.....	10
2.3 Erweiterung der Gerinneformklassen	12
2.4 Einfluss der Geschiebefracht auf die Gerinnebreite.....	14
2.4.1 Prozesse.....	14
2.4.2 Korrekturfaktor für die Gerinnebreite nach Parker.....	15
2.4.3 Berechnungsformeln	25
2.5 Einfluss der Geschiebefracht auf die Gerinneform	26
2.6 Ziele für Gerinneform und Anforderung an die Geschiebefracht.....	30
2.7 Vergleich der Auswertungen mit HQ_2 und HQ_5	35
3 Berechnungsschritte und Eingangsparameter	39
4 Sensitivitätsanalyse	42
5 Anwendungsempfehlung	44
6 Literatur	46
7 Symbole	48

Anhang Datensatz Beispielgewässer

1 Einleitung

1.1 Zweck des Fachberichts

Der vorliegende Fachbericht enthält die wissenschaftliche Beschreibung der Methodik «erforderliche Geschiebefracht», welche als Bestandteil des Vollzugshilfemoduls «Geschiebehaushalt – Massnahmen» (Hunzinger *et al.*, 2020, in Anhörung) der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer des Bundesamts für Umwelt (BAFU) publiziert werden soll. Im Fachbericht wird die Methodik detailliert hergeleitet, es werden Berechnungsschritte und Eingangsparameter nachvollziehbar definiert und es werden mögliche Fehler der Methodik quantifiziert.

Die vorliegende Arbeit wurde im Auftrag der Abteilung Wasser des Bundesamtes für Umwelt erstellt, damit Anwender und die projektbegleitende Expertengruppe die Methodik nachvollziehen und beurteilen können.

1.2 Motivation, Ziele und Konzept der Methodik «erforderliche Geschiebefracht»

Die Motivation für die Entwicklung der vorliegenden Methodik gründet auf den konkreten Anforderungen des Gewässerschutzgesetzes: Darin wird verlangt, dass Anlagen den Geschiebehaushalt nicht so verändern dürfen, dass Tiere, Pflanzen und deren Lebensräume, der Grundwasserhaushalt und der Hochwasserschutz wesentlich beeinträchtigt werden (Artikel 43a Gewässerschutzgesetz, GSchG). Unter «wesentlicher Beeinträchtigung» von Tieren, Pflanzen und deren Lebensräumen durch einen veränderten Geschiebehaushalt versteht der Gesetzgeber eine nachteilige Veränderung von «morphologischen Strukturen oder morphologischer Dynamik» (Artikel 42a Gewässerschutzverordnung, GSchV).

In der Vollzugshilfe wird diese Zielsetzung präzisiert, indem u. a. Ziele für die Morphologie des Gewässers und die Sohlenlage formuliert werden. Die konkreten Ziele für die Morphologie heissen:

- Die Gerinneform des Gewässers ist ähnlich wie im Referenzzustand (gleicher Typ).
- Geschiebeablagerungen haben eine ähnliche Ausdehnung und Mächtigkeit wie im Referenzzustand.
- Die örtliche Verteilung des Substrattypen ist anteilmässig ähnlich wie im Referenzzustand. Die Geschiebeablagerungen werden mehr als einmal im Jahr erneuert.

Daraus werden Anforderungen an die Geschiebefracht abgeleitet: Die Geschiebefracht ist so gross, dass sich in den naturnahen Abschnitten eine Morphologie und Dynamik wie oben beschrieben einstellen können.

Die Gesetzgebung bringt den Geschiebetransport als *Ursache* und morphologische Strukturen als *Wirkung* in einen Kausalzusammenhang. Auf diesen Zusammenhang hat beispielsweise Marti (2006) auf Basis von physikalischen Modellversuchen hingewiesen. In seiner Publikation erwähnt er in Kapitel 9.1.1 weitere Autoren, welche dieselbe Beobachtung beschreiben. Es existiert jedoch keine praxistaugliche Methode, die quantitativ beschreibt, wie sich eine veränderte Geschiebefracht auf morphologische Strukturen auswirkt. Für die konkrete, praxistaugliche Umsetzung der gesetzlichen Forderungen ist eine solche Methode aber zwingend.

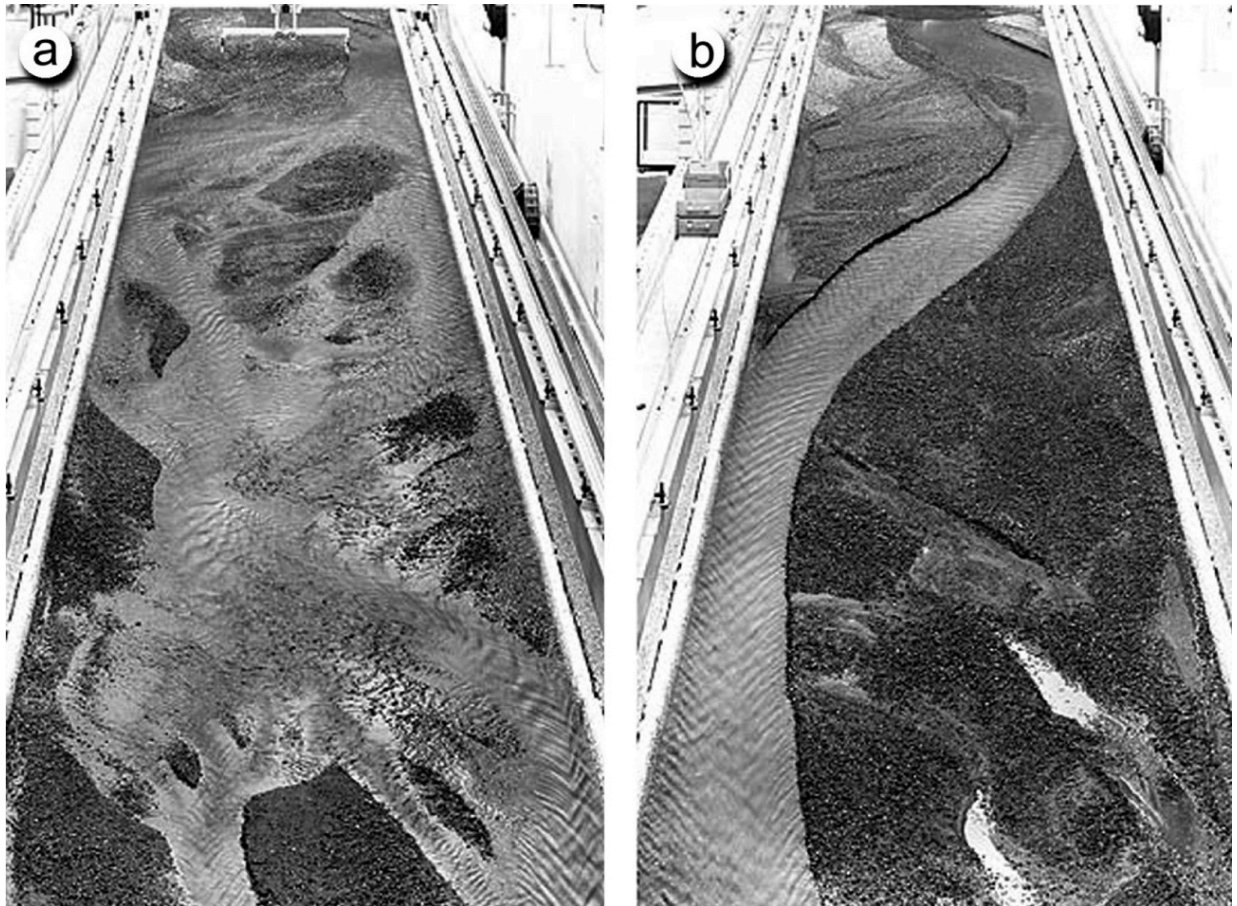


Bild 1 Veränderung eines Gewässers mit verzweigter Gerinneform (a) zu einem gewundenen Gerinne (b) nach dem Durchgang einer Hochwasserwelle mit auf 20% reduzierter Geschiebezufuhr. Physikalischer Modellversuch von Marti an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (Marti und Bezzola, 2004).

Aus diesem Grund beauftragte das BAFU 2016 die Flussbau AG SAH mit der Entwicklung praktischer Ansätze. Die erarbeiteten Ansätze gehen von der zentralen Hypothese aus, dass naturnahe morphologische Strukturen und eine morphologische Dynamik, wie sie in naturnahen oder revitalisierten Gewässerabschnitten angestrebt werden, nur bei genügend Geschiebezufuhr zu erzielen sind und dass sich bei zu geringer Geschiebezufuhr das Gerinne unter Verlust der Strukturen einengt. Die Geschiebefracht, die zur Erreichung der gesetzlich geforderten naturnahen morphologischen Strukturen nötig ist, wird als «erforderliche Geschiebefracht» bezeichnet. Mit der vorliegenden Methodik wird allerdings nicht die «erforderliche Fracht» an sich ermittelt, sondern der Anteil der erforderlichen Geschiebefracht an der Fracht im Referenzzustand, der erforderlich ist (zur Erreichung der in der Gewässerschutzverordnung geforderten morphologischen Strukturen). Methoden zur Ermittlung der Geschiebefracht im Referenzzustand sind nicht Bestandteil der vorliegenden Methodik.

Die Autoren haben bewusst eine empirische Methode verfolgt, die konkret berücksichtigt, welche Gerinnestrukturen sich tatsächlich im naturnahen Zustand des jeweiligen Gewässers bilden. Die empirische Methode bietet damit entscheidende Vorteile gegenüber theoretischen und numerischen Ansätzen. Sie liefert aufgrund der inhärenten Unsicherheit von Frachtabeschätzungen und empirischen Zusammenhängen keine abschliessend korrekte «erforderliche Geschiebefracht». Daher ist der Wert als beste Schätzung und damit als zentrale Planungsgrösse bei Sanierungs- und Wasserbauprojekten anzusehen. Mit einem geeigneten Monitoring kann das Ergebnis im Feld evaluiert und wenn notwendig angepasst werden.

1.3 Inhalt des Fachberichts

Der Fachbericht stellt eine Methode zur Ermittlung der «erforderlichen Geschiebefracht» dar, mit welcher das im Vollzugshilfemodul formulierte konkrete Ziel für die Gerinneform erreicht werden kann.

Das Kapitel 2 umfasst die Herleitung der Methode. In Kapitel 3 werden die einzelnen Berechnungsschritte zur Bestimmung der erforderliche Geschiebefracht und die dafür notwendigen Eingangsparameter beschrieben und in Kapitel 4 wird die Sensitivität der Berechnung auf Fehler an den Eingangsparametern aufgezeigt. Zum Schluss wird in Kapitel 5 eine Empfehlung zur Anwendung formuliert.

2 Herleitung

2.1 Ansätze der Regimetheorie

2.1.1 Gerinneform

Es bestehen verschiedene Ansätze der Regimetheorie, mit welchen die Gerinneform eines Gewässers beschrieben werden kann. In Bezzola (2003) werden beispielsweise folgende etablierte Ansätze beschrieben:

Anderson et al. (1975), Parker (1976) Die Gerinneformen werden in Abhängigkeit der Parameter h/B und J/Fr abgegrenzt (h = Abflusstiefe, B = Gerinnebreite, J = Gefälle, Fr = Froude-Zahl). Es wird unterschieden zwischen geraden Gerinnen mit ebener Sohle, Mäandern, Gerinnen mit 1-2 Teilgerinnen, 2-3 Teilgerinnen sowie verzweigten Gerinnen mit bis über 10 Teilgerinnen.

Jäggi (1983) Die Gerinneformen werden in Abhängigkeit von B/d_m und J abgegrenzt (d_m = mittlerer Korndurchmesser). Es wird unterschieden zwischen Gerinnen ohne Bänke sowie Gerinnen mit Bänken. Das Kriterium dient insbesondere zur Beurteilung des Auftretens von alternierenden Bänken.

da Silva (1991)
Bild 2

Die Gerinneformen werden in Abhängigkeit der Parameter h/D^1 und B_w/h abgegrenzt (B_w = Wasserspiegelbreite). Es wird unterschieden zwischen folgenden drei Teilflächen:

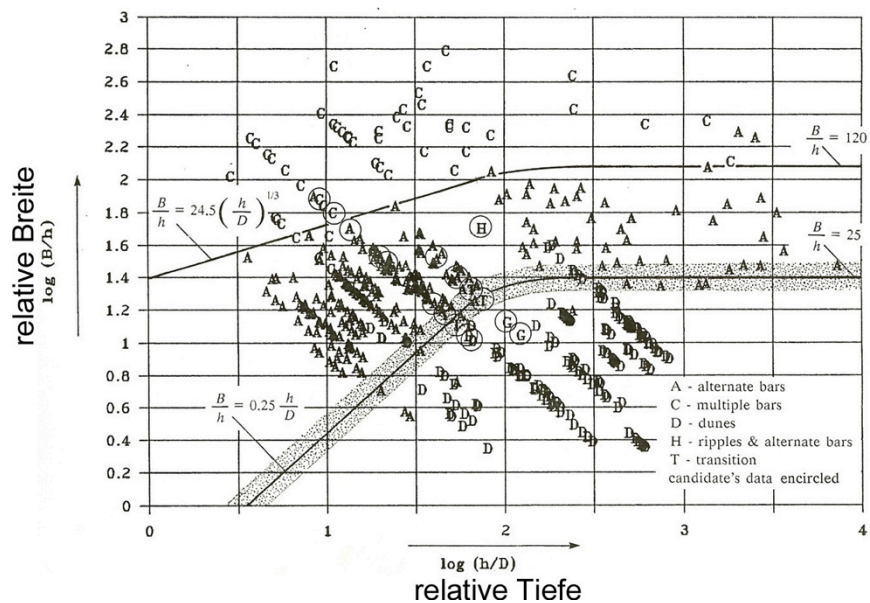


Bild 2

Einteilung der Gerinneform in der B/h zu h/D Ebene (Yalin / da Silva Diagramm).
Figur 5.2 aus da Silva (1991).

¹ $D = d_{50}$ des Sohlenmaterials. d_{50} im angelsächsischen Raum entspricht gemäss Marti (2006) etwa d_m nach Meyer-Peter und Müller.

- (1) Gerade Gerinne, Gerinne mit ebener Sohle / Dünen und mäandrierende Gewässer.
- (2) Alternierende Bänke.
- (3) Verzweigte Gerinne.

Zarn (1997) hat die Abgrenzung zwischen den Teilflächen (1) und (2) modifiziert.

Ahmari & da Silva
(2011),
Bild 3

In der Publikation von Ahmari & da Silva wird die Abgrenzung der Gerinneformen im sogenannten «Yalin/da Silva Diagramm» (Bild 2) anhand von physikalischen Modellversuchen und Naturbeobachtungen vertieft untersucht. Dabei werden folgende Bereiche unterschieden:

- (1) Gerinne mit ebener Sohle, graue Fläche.
- (2) Mäandrierende Gerinne, rot schraffierte Fläche. Im rot eingekreisten Bereich sind kaum Punkte vorhanden. In da Silva (1991) werden in diesem Bereich Gewässer mit Dünen angegeben (Bild 2).
- (3) Gerinne mit alternierenden Bänken, orange Fläche ("alternate bar region").
- (4) Verzweigte Gewässer mit 2 Teilgerinnen, grüne Fläche ("region of 2-row bars").
- (5) Verzweigte Gewässer mit mehr als 2 Teilgerinnen, blaue Fläche ("region of multiple bars having three or more rows").

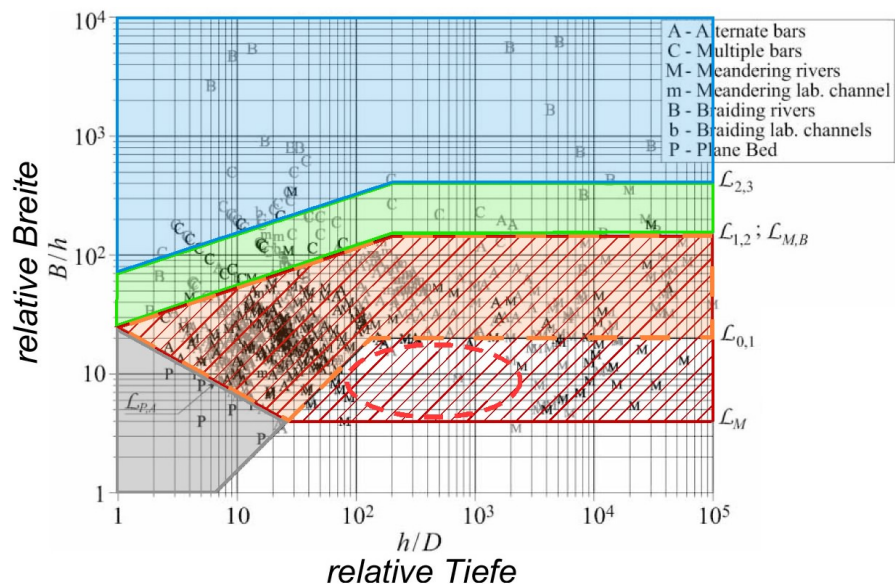


Bild 3

Yalin / da Silva Diagramm mit originalem Datensatz und Zuordnung der Gerinneform (Ahmari & da Silva 2011). Farben vgl. Text.

Wie die Literatur zeigt, wird die Gerinnebreite bei abnehmender Geschiebefracht kleiner.

Bei Ahmari & da Silva werden B_w/h und h/d_m als unabhängige Grössen betrachtet. Die Gerinneform ist die abhängige Grösse von $W = f(B_w/h; h/d_m)$. Nimmt B_w ab, so verändert sich die Gerinneform.

Wenn die Gerinnebreite (resp. die Wasserspiegelbreite B_w) von der Geschiebefracht abhängig ist und die Gerinneform von B_w , dann zeigt sich im Ahmari & da Silva Diagramm die Auswirkung einer veränderten Geschiebefracht.

Daher verwenden wir im Folgenden das Ahmari & da Silva Diagramm, um die Auswirkungen einer Abnahme der Geschiebefracht auf die Gerinneform aufzuzeigen.

2.1.2 Gerinnebreite

Empirische Formeln

Die Gerinnebreite eines Gewässers kann anhand von empirischen Formeln abgeschätzt werden. Als Eingangsgrössen benötigen die Formeln einen massgebenden Abfluss und einen charakteristischen Korndurchmesser des Sohlenmaterials (d_{50} , d_m). Die Formel von Parker (1979) hat die Form

$$BG_P = 4.4 \sqrt{\frac{Q}{\sqrt{(s-1)g} d_m}} \quad (1)$$

mit

BG_P = Gerinnebreite (Parker)

Q = Massgebender Abfluss bei "bankfull or dominant conditions"

s = Verhältnis der Feststoffdichte zur Dichte des Wassers (2.65)

g = Erdbeschleunigung (9.81 m/s²)

d_m = mittlerer Korndurchmesser des Sohlenmaterials².

Mit der dimensionslosen Gerinnebreite

$$B^* = \frac{BG_P}{d_m} \quad (2)$$

und dem dimensionslosen Abfluss

$$\bar{Q} = \frac{Q}{\sqrt{((s-1)g d_m^5)}} \quad (3)$$

ergibt sich gemäss Parker (1979)

$$B^* = 4.4 \sqrt{\bar{Q}} \quad (4)$$

Einige weitere Autoren (Ikeda *et al.* 1988, Ashmore 2001, Millar 2005) berücksichtigen in ihren Formeln zusätzlich das Gefälle und den Korndurchmesser d_{90} .

² In der Originalliteratur wird d_{50} anstelle von d_m verwendet. Vergleiche Fussnote 1.

Gerinnebreite in Funktion des Geschiebetransports

Eine weitere Formel von Parker (27c in Parker 1979) beschreibt die Gerinnebreite zusätzlich in Funktion der Geschiebetransportrate Q_b . Wird in der Formel Q_b zu Null gesetzt, so wird die Gerinnebreite auch Null.

Diese Formel ist für die vorliegende Fragestellung nicht geeignet, weil eine Übertragung der Transportrate auf eine jährliche Geschiebefracht nicht eindeutig machbar ist.

„bankfull or dominant conditions“

Die Wahl des Abflusses hat einen massgebenden Einfluss auf die Berechnung der Gerinnebreite. Der für die Gerinnegeometrie massgebende Abfluss wird je nach Studie als bordvoller (gerinnefüllender) oder als gerinnebildender Abfluss definiert. Der gerinnebildende oder effektive Abfluss wurde erstmals bei Wolman und Miller (1960) beschrieben: als Abfluss, bei dem das Produkt aus Geschiebetransportrate und Häufigkeit maximal ist. Der gerinnebildende Abfluss wird oft als Abfluss verstanden, der massgebend für den Erhalt der Gerinnegrösse und der Gerinneform ist.

Sowohl der bordvolle als auch der gerinnebildende Abfluss können als Jährlichkeit (HQ_x) angegeben werden – sie variieren aber zwischen Gewässern. Bei Talmäandern ist der bordvolle Abfluss kaum zu bestimmen und bei Gewässern mit grobem Sohlenmaterial dürfte der gerinnebildende Abfluss höher sein, als bei Gewässern, bei welchen Sohlenmaterial und Geschiebe identisch sind.

Als massgebender Abfluss wird oft ein Abfluss zwischen HQ_2 und HQ_5 angenommen. Im Folgenden werden diese zwei Abflüsse berücksichtigt.

Für die nachfolgende Herleitung der Methode zur Bestimmung der erforderlichen Geschiebefracht wird die Gerinnebreite nach Parker (Gleichung 1) als Referenzbreite aus folgenden Gründen verwendet:

- Die Formel ergibt einen plausiblen Mittelwert.
- Die Formel ist robust und unabhängig von sensiblen Parametern wie dem Gefälle.

2.2 Datengrundlage

Für die vorliegende Studie wurden 33 Gewässerabschnitte untersucht, die sich im natürlichen oder naturnahen Zustand befinden oder sich befunden haben (Tabelle 1). Im Anhang sind die Grundlagen dokumentiert.

Tabelle 1 Datensatz der ausgewerteten Gewässerabschnitte.
 HQ_2 , HQ_5 : Bettbildende Abflüsse. GF: Geschiebefracht. BG: Gerinnebreite.
 Geschiebefracht, Gerinnebreite und Gerinneform wurden für den Referenzzustand bestimmt.
 Klassen Gerinneform (vgl. Kapitel 2.1.3): 5: Verzweigt mit mehr als 2 Gerinnen, 4: Verzweigt mit 2 Gerinnen, 3: Gewunden mit Inseln und Bänken, 2: Gewunden mit Bänken, 1: Mäander.

Nr.	Gewässer	Abschnitt (Ort)	HQ_2 [m ³ /s]	HQ_5 [m ³ /s]	GF [m ³ /a]	BG [m]	Gerinneform
1	Alpenrhein	Mastrils	1'000	1'200	70'000	300	4
2	Alpenrhein	Kriessern	1'300	1'700	52'000	380	4

3	Alpenrhein	Rheineck	1'300	1'700	20'000	191	3
4	Aare	Grenchen	520	600	0	146	1
5	Aare	Wynau	720	860	13'500	93	2
6	Aare	Aarau-Biberstein	830	1'000	13'000	160	3
7	Aare	Wildeggen-Brugg	460	640	7'000	78	2
8	Aare	Klingnau	1'520	1'800	16'000	240	3
9	Hinterrhein	Cazis	360	500	60'000	500	5
10	Ilfis	Kröschenbrunnen	105	125	2'000	45	3
11	Kleine Emme	Malters-Emmen	306	400	15'000	189	5
12	Limmat	Dietikon	410	500	2'800	120	3
13	Reuss	Rathausen-Perlen	480	560	14'000	98	3
14	Reuss	Perlen-Gisikon	480	560	13'000	170	4
15	Sihl	Adliswil	160	220	3'300	51	3
16	Sellenbodenbach	Neuenkirch	9	14	30	7.5	2
17	Suhre	Triengen	14.2	19.7	130	12	2
18	Wiese	Basel	103	142	3'000	85	4
19	Wigger	Altishofen	70	95	1'500	45	3
20	Brenno	Castro	141	200	12'500	66	4
21	Brenno	Marogno	177	251	14'000	100	4
22	Brenno	Loderio	259	368	19'000	225	5
23	Schwarzwasser	Heubach	25	34	3'200	48	4
24	Thur	Wattwil	175	230	4'000	45	2
25	Thur	Niederstetten	490	640	12'000	180	4
26	Thur	Bürglen	590	750	18'500	170	4
27	Thur	Frauenfeld	580	750	18'500	250	4
28	Thur	Niederneunforn	570	750	20'000	175	4
29	Töss	Kollbrunn	77	96	2'600	110	5
30	Töss	Leisental	89	118	2'800	100	4
31	Töss	Dättlikon	115	160	2'800	120	4
32	Simme	Niedermettlisau	87	122	12'300	52	3
33	Gadmerwasser	Chalenegg	25	37	4'300	21	3

2.3 Erweiterung der Gerinneformklassen

Datensatz Schweizer Gewässer

In Bild 4 ist der in vorliegender Studie verwendete Datensatz von Schweizer Gewässern im natürlichen oder naturnahen Zustand im Diagramm von Ahmari & da Silva (2011) eingetragen. Der Datensatz verteilt sich auf die drei Bereiche „Verzweigte Gewässer mit mehr als 2 Gerinnen“, „Verzweigte Gewässer mit 2 Gerinnen“ und „Mäandrierende Gewässer und alternierende Bänke“.

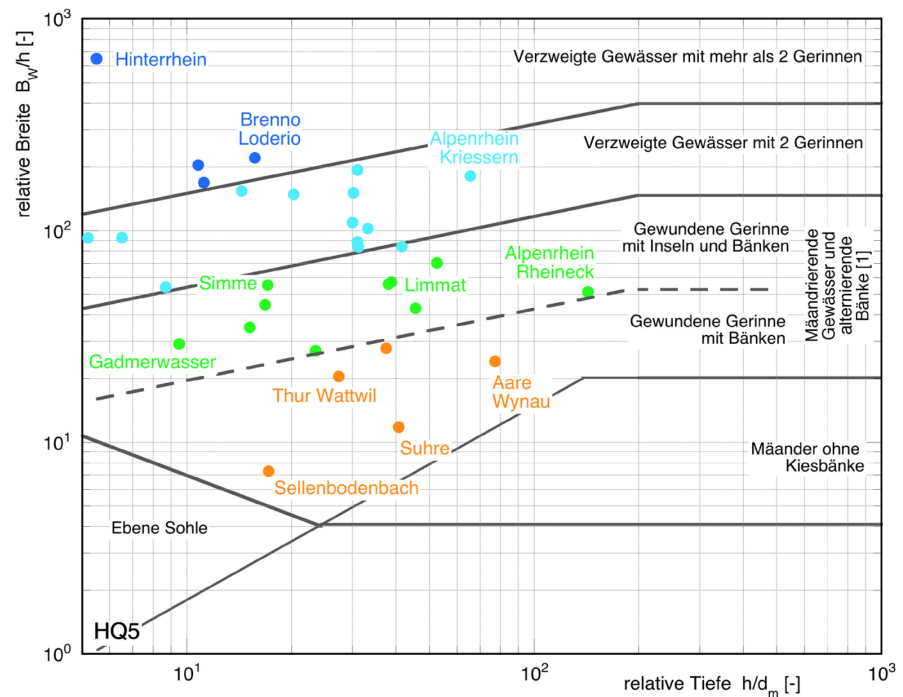


Bild 4 Datensatz von Schweizer Gewässern im modifizierten Ahmari & da Silva-Diagramm (2011). Der Bereich „mäandrierende Gewässer und alternierende Bänke“ ist unterteilt in „Gewundene Gewässer mit Inseln und Bänken“ sowie „Gewundene Gewässer mit Bänken“. Die Punktfarbe entspricht der Gerinneform nach Feldbeurteilung.

Dunkelblaue Punkte: Verzweigte Gewässer mit mehr als 2 Gerinnen

Hellblaue Punkte: Verzweigte Gewässer mit 2 Gerinnen

Grüne Punkte: Gewundene Gewässer mit Inseln und Bänken

Orange Punkte: Gewundene Gewässer mit Bänken

Berechnung der Wasserspiegelbreite B_w und der Abflusstiefe h mit HQ5.

Verzweigte Gewässer

In den Bereichen mit verzweigten Gewässern stimmt die beobachtete Gerinneform mit der Zuordnung im Ahmari & da Silva Diagramm überein. Alle verzweigten Gewässer zeigen ein sehr dynamisches Flussbett mit Teilgerinnen und Bänken ohne Gehölz. Der Auenwald begrenzt den dynamischen Bereich seitlich. **Stark verzweigte Gewässer mit mehr als 2 Gerinnen** weisen die grössten Werte B_w/h auf und befinden sich oben links (Beispiele: Hinterrhein bei Cazis, Brenno bei Loderio). **Verzweigte Gewässer mit durchschnittlich 2 Gerinnen** weisen ein etwas kleineres Verhältnis B_w/h auf (Beispiele: Alpenrhein Kriessern, Thur Frauenfeld, Reuss Perlen).

Mäandrierende Gewässer und alternierende Bänke

Im Bereich „Mäandrierende Gewässer und alternierende Bänke“ können folgende Gerinneformen identifiziert werden:

- Im oberen Bereich mit vergleichsweise grossen Werten B_w/h befinden sich vorwiegend Gewässer mit lokalen Verzweigungen, Inseln und Bänken. Die Inseln sind mit Gehölz bewachsen. Infolge der gegenüber den verzweigten Gewässern reduzierten morphologischen Dynamik wird der dynamische Bereich durch Gehölzstrukturen unterteilt. Diese Gerinneform bezeichnen wir als «**Gewundene Gewässer mit Inseln und Bänken**».
- Im unteren Bereich mit vergleichsweise kleinen Werten B_w/h befinden sich gewundene Gewässer mit Bänken. Die Bänke befinden sich entlang der Kurveninnenseiten und in gestreckten Abschnitten alternierend an den Ufern. Diese Gerinneform bezeichnen wir als «**Gewundene Gewässer mit Bänken**».

Unterteilung des Bereichs Mäandrierende Gewässer und alternierende Bänke

Wird einem gewundenen Gewässer mit Inseln und Bänken Geschiebe entzogen, so verändert es sich zu einem gewundenen Gewässer mit Bänken. Dabei verlanden und verbuschen die trocken fallenden Teilgerinne. Gleichzeitig verschwinden charakteristische morphologische Strukturen und der Lebensraum verändert sich. Die morphologischen Strukturen und Prozesse sind deutlich differenzierbar, sodass wir die oben vorgeschlagene Unterteilung für die Vollzugshilfe als sinnvoll erachten.

Mäandrierende Gewässer

Im Ahmari & da Silva Diagramm (Bild 3) befinden sich mäandrierende Gewässer zwischen den Linien L_M und $L_{0,1}$ mit $h/d_m > 2'000$. Entsprechend grosse Werte h/d_m können nur bei sehr feinem Sohlenmaterial erreicht werden. Solche Gewässer transportieren demnach kein Kies als Geschiebe.

Dem Bereich mit kleineren Werten h/d_m wurden in da Silva (1991) Gewässer mit Dünen zugeordnet (Bild 2). Entsprechende Gewässer verfügen nicht über Kiesbänke im engeren Sinne. Daher wird der Bereich (entspricht dem Bereich zwischen den Linien L_M und $L_{0,1}$ Bild 3) in der vorliegenden Arbeit als **Mäander ohne Kiesbänke** bezeichnet.

Im verwendeten Datensatz ist die Aare bei Grenchen das einzige Gewässer, das diesem Bereich zugeordnet werden kann. Bei einer feinkörnigen Sohle mit Dünen erreicht h/d_m einen Wert von 14'600. Der Datenpunkt liegt ausserhalb des in Bild 4 dargestellten Bereichs.

2.4 Einfluss der Geschiebefracht auf die Gerinnebreite

2.4.1 Prozesse

Wird aus einem geschiebeführenden Gewässer Kies entnommen, so nimmt dessen Gerinnebreite ab und die Gerinneform verändert sich hin zu einem gewundenen Gewässer mit Bänken. Wird einem Gewässer sämtliches Geschiebe entnommen, so wird eine minimale Breite erreicht, die Sohle pflästert sich stark ab und es bestehen keine sich regelmässig erneuernden Geschiebebänke mehr. Marti (2004, 2006) hat diese Zusammenhänge in physikalischen Modellversuchen untersucht und die Veränderung der Gerinneform infolge reduzierter Geschiebezufuhr aufgezeigt (Bild 1).

Beispiel Simme Niedermettlisau

Bild 5 zeigt die Simme bei der Niedermettlisau in den Jahren 1940 und 2015. Im Jahr 1940 war die Gerinneform gewunden mit Inseln und Bänken, die mittlere Geschiebefracht betrug $12'300 \text{ m}^3/\text{a}$ und die Gerinnebreite erreichte durchschnittlich 52 m. Im Jahr 2015 betrug die durchschnittliche Geschiebefracht $6'000 \text{ m}^3/\text{a}$ (Reduktion der Geschiebefracht aufgrund von Kiesentnahmen und dem Bau von Sammlern). Die Gerinneform war gewunden mit Bänken und die Gerinnebreite erreichte durchschnittlich noch 33 m. Das Abflussregime wurde nicht verändert und es sind keine bedeutenden Uferverbauungen vorhanden. Die Abnahme der Gerinnebreite ist alleine auf die reduzierte Geschiebefracht zurückzuführen.



Bild 5

Simme Niedermettlisau bei Därstetten.

Oben 1940, durchschnittliche Gerinnebreite 52 m, Geschiebefracht $12'300 \text{ m}^3/\text{a}$.

Unten 2015, durchschnittliche Gerinnebreite 33 m, Geschiebefracht $6'000 \text{ m}^3/\text{a}$.

Verlagerung im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm

Bild 6 zeigt für das Beispiel Simme Niedermettlisau die Verlagerung der dimensionslosen Variablen h/d_m und B_w/h im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm infolge der Abnahme der Gerinnebreite von 1940 bis 2015. Die Reduktion der Geschiebefracht führte demnach zu einer sichtbaren Veränderung der Gerinneform vom oberen Rand des Bereichs der gewundenen Gewässer mit Inseln und Bänken in den Übergangsbereich zu den gewundenen Gewässern mit Bänken. Die beobachteten Gerinneformen passen gut mit den Gerinneformen gemäss Bild 4 überein.

Ebenfalls dargestellt ist die Verlagerung der dimensionslosen Variablen h/d_m und B_w/h des Alpenrheins bei Kriessern, wenn man die Variablen bei einer schrittweisen Abnahme der Gerinnebreite um je 50 m berechnet. Damit kann die theoretische Veränderung der Gerinneform bei einer Reduktion der Gerinnebreite veranschaulicht werden. Es zeigt sich, dass die Punkte in doppeltlogarithmischer Darstellung etwa auf einer Geraden liegen.

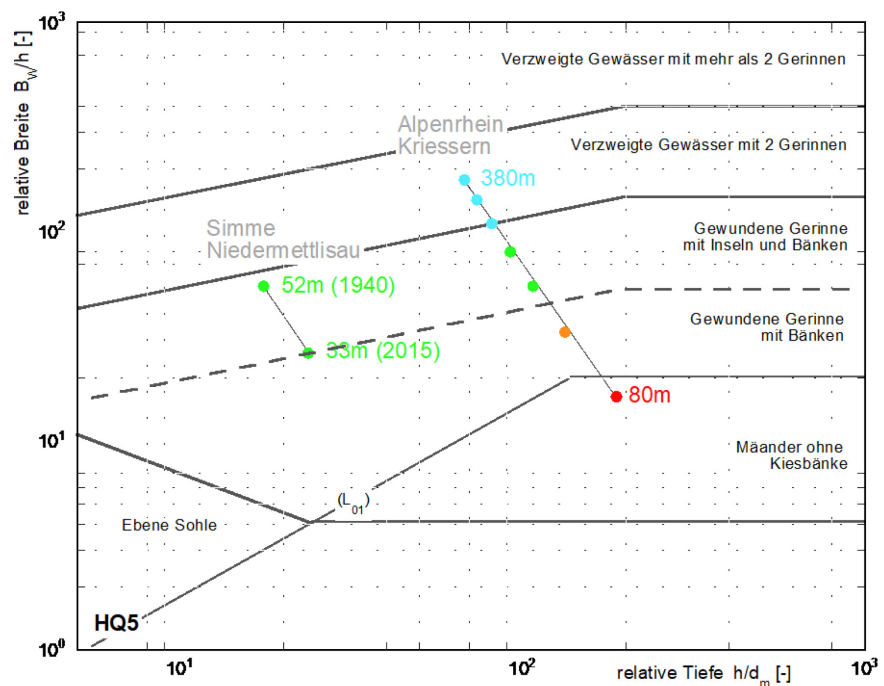


Bild 6 Veränderung der Gerinneform und Gerinnebreite der Simme Niedermettlisau zwischen 1940 und 2015. Dargestellt ist zudem die Veränderung der Gerinneform des Alpenrheins bei Kriessern bei einer schrittweisen Reduktion der Gerinnebreite um je 50 m.

2.4.2 Korrekturfaktor für die Gerinnebreite nach Parker

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, dass die Geschiebeführung einen massgebenden Einfluss auf die Gerinnebreite hat, aber keine praxistauglichen Formeln bestehen, deren Einfluss zu quantifizieren.

Daher wird im Folgenden eine empirische Beziehung hergeleitet, mit welcher der Einfluss der durchschnittlichen jährlichen Geschiebefracht auf die Gerinnebreite berechnet werden kann.

Relative Geschiebefracht

Als massgebender Parameter zur Berücksichtigung der Geschiebefracht wird die relative Geschiebefracht $\overline{GF}$ verwendet, welche durch das dimensionslose Verhältnis zwischen der Geschiebefracht GF und dem gerinnebildenden Abfluss HQ_x definiert wird:

$$\overline{GF} = \frac{GF}{HQ_x} \quad (5)$$

Werden die Geschiebefracht in $[m^3/a]$ und der Abfluss in $[m^3/s]$ eingesetzt, so resultiert aufgrund des Verhältnisses zwischen Jahr und Sekunde ein Faktor von 31'536'000.

Die relative Geschiebefracht $\overline{GF}$ hat den Vorteil, dass die normierten Frachten unterschiedlicher Gewässer verglichen werden können und nicht von der Grösse des Gewässers abhängig sind.

Anwendung der Gerinnebreite nach Parker für Schweizer Gewässer

In Bild 7 ist das Verhältnis der Gerinnebreite im Referenzzustand zur Gerinnebreite nach der Formel von Parker (Gleichung 1) in Funktion der relativen Geschiebefracht $\overline{GF}$ dargestellt. Dabei zeigt sich Folgendes:

- Mit der Formel von Parker wird die beobachtete Gerinnebreite teilweise unter- und teilweise überschätzt.
- Unterschätzt wird die Gerinnebreite von Gewässern mit hoher Abfluss- und Geschiebedynamik (Beispiele Kleine Emme, Alpenrhein).
- Überschätzt wird die Gerinnebreite von wenig dynamischen Gewässern (Beispiele Aare Wynau, Sellenbodenbach).

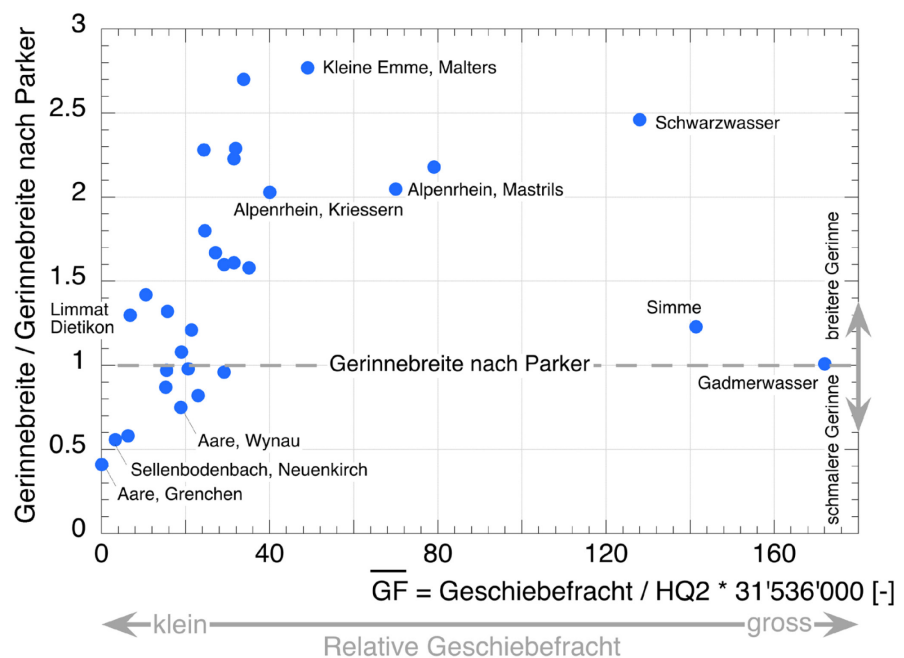


Bild 7

Verhältnis der beobachteten Gerinnebreite im Referenzzustand zur berechneten Gerinnebreite nach Parker in Funktion der relativen Geschiebefracht GF/HQ_2 für verschiedene Schweizer Gewässer.

Korrekturfaktor der Gerinnebreite nach Parker

Dividiert man die beobachtete Gerinnebreite des Gewässers BG durch die Gerinnebreite BG_P des Gewässers, welche nach der Formel von Parker (Gleichung 1) berechnet wird, ergibt das einen Korrekturfaktor KF an der Gerinnebreite nach Parker:

$$KF = \frac{BG}{BG_P} \quad (6)$$

Hypothesen

Für die Berechnung des Korrekturfaktors an der Gerinnebreite nach Parker in Funktion der Geschiebefracht werden die zwei Hypothesen (1) und (2) aufgestellt, welche in einem Diagramm mit folgenden Achsen visualisiert werden (Bild 8):

Abszisse: Relative Geschiebefracht $\overline{GF}$

Ordinate: Korrekturfaktor KF an der Gerinnebreite nach Parker

- (1) Ausgehend von einem Gewässer mit Geschiebefracht > 0 bewegt sich das Gewässer bei abnehmender Geschiebefracht auf einem linearen Pfad bis zum Schnittpunkt mit der Ordinate $(0; b)$.

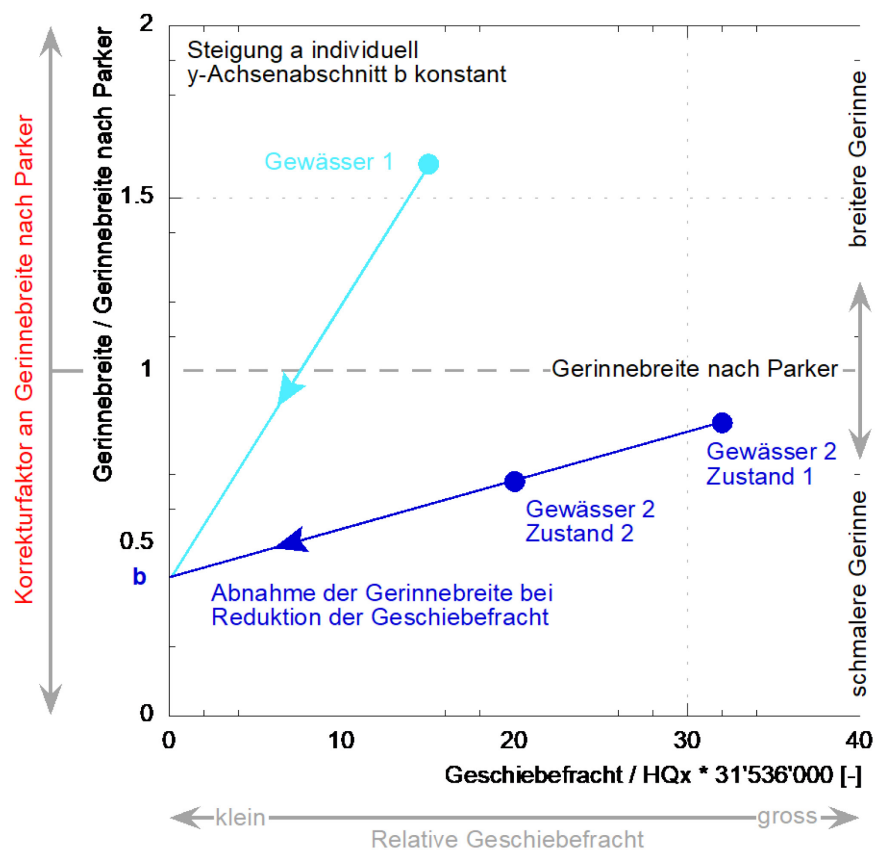


Bild 8

Korrekturfaktor an der Gerinnebreite nach Parker in Funktion der relativen Geschiebefracht.

Für zwei fiktive Gewässer dargestellt sind die linearen Pfade bei Abnahme der Geschiebefracht bis zum Erreichen des Korrekturfaktors b bei fehlender Geschiebefracht.

- (2) Alle Geraden schneiden die Ordinate bei b . Der Schnittpunkt b ist unabhängig vom Gewässer. Daraus folgt, dass für jedes Gewässer die Steigung a der Geraden individuell ist.

Dieser lineare Pfad kann für ein Gewässer i durch folgende Geradengleichung beschrieben werden:

$$KF = a_i \overline{GF} + b \quad (7)$$

Kalibrierungsgewässer

Für den Nachweis dieser Hypothese wurden Gewässer gesucht, bei denen die Gerinnebreite ausschliesslich durch Reduktion der Geschiebefracht abgenommen hat. Andere Einflussgrössen wie der Abfluss wurden nicht verändert und es bestehen auch keine Uferverbauungen. Die Verbindungslinie zwischen mehreren Zuständen desselben Gewässers sollte dann in Richtung des Punktes $(0; b)$ zeigen (Bild 8). Es wurden folgende Gewässerabschnitte gefunden, auf welche diese Anforderungen zutreffen und für welche ausreichend gute Grundlagen bestehen:

- (1) Simme Niedermettlisau, Därstetten
- (2) Schwarzwasser, Heubach
- (3) Gadmerwasser, Chalenegg
- (4) Aare Wildegg – Brugg (Zustand mit KW)
- (5) Alpenrhein Kriessern und Rheineck

Zusätzlich wurden Gewässer mit geringer oder fehlender Geschiebefracht gesucht. Trifft die Hypothese zu, so müssen die Wertepaare $(\overline{GF}; KF)$ dieser Gewässer nahe dem Ordinatenabschnitt b liegen. Es wurden folgende Gewässerabschnitte gefunden, auf welche diese Anforderungen zutreffen und für welche ausreichend gute Grundlagen bestehen:

- (6) Sellenbodenbach, Neuenkirch
- (7) Aare, Grenchen

Berechnungen mit HQ_2 und HQ_5

Für die Ermittlung der Wertepaare $(\overline{GF}_i; KF_i)$ werden folgende Grössen benötigt: HQ_x , d_m , $BGRZ$, BG_i , GF_{RZ} , GF_i . Die Auswertungen werden für die Abflüsse HQ_2 und HQ_5 separat durchgeführt.

Nachfolgend sind die Gewässerabschnitte beschrieben und die Zustände in Bild 9 und Bild 10 eingezeichnet. Dazugehörige Grundlagen sind in Anhang 1 und Anhang 2 zu finden.

Simme Niedermettlisau, Därstetten, BE

Flussbau AG et. al. (2013)

Referenzzustand um 1940:

Morphologie: Gewundenes Gewässer mit Inseln und Bänken

Dynamische Gerinnebreite 52 m

Durchschnittliche Geschiebefracht 12'300 m³/a

Relative Geschiebefracht $\overline{GF} = 141 (HQ_2); 101 (HQ_5)$

Korrekturfaktor an Gerinnebreite nach Parker 1.2 (HQ_2); 1.0 (HQ_5)

Aktueller Zustand (2015):

Morphologie: Übergangsbereich Gewundenes Gewässer mit Inseln und Bänken zu Gewundenem Gewässer mit Bänken
Dynamische Gerinnebreite 35 m
Durchschnittliche Geschiebefracht 6'000 m³/a
Relative Geschiebefracht $\overline{GF} = 69$ (HQ₂); 49 (HQ₅)
Korrekturfaktor an Gerinnebreite nach Parker 0.83 (HQ₂); 0.66 (HQ₅)

Die reduzierte Geschiebefracht ist auf Kiesentnahmen im Oberwasser des betrachteten Abschnittes zurückzuführen.

Schwarzwasser

Heubach, BE

Flussbau AG (2017)

Referenzzustand um 1950:

Morphologie: Verzweigtes Gewässer mit 2 Gerinnen
Dynamische Gerinnebreite 48 m
Durchschnittliche Geschiebefracht 3'200 m³/a
Relative Geschiebefracht $\overline{GF} = 128$ (HQ₂); 94 (HQ₅)
Korrekturfaktor an Gerinnebreite nach Parker 2.5 (HQ₂); 2.1 (HQ₅)

Aktueller Zustand (2015):

Morphologie: Verzweigtes Gewässer mit 2 Gerinnen und einzelnen bewachsenen Inseln (Übergangsbereich der 2 morphologischen Typen)
Dynamische Gerinnebreite 38 m
Durchschnittliche Geschiebefracht 2'400 m³/a
Relative Geschiebefracht $\overline{GF} = 96$ (HQ₂); 71 (HQ₅)
Korrekturfaktor an Gerinnebreite nach Parker 1.9 (HQ₂); 1.7 (HQ₅)

Die reduzierte Geschiebefracht ist auf Kiesentnahmen im Oberwasser des betrachteten Abschnittes zurückzuführen.

Gadmerwasser Chalenegg, BE

KW Oberhasli (2017)

Referenzzustand um 1960:

Morphologie: Übergangsbereich Gewundenes Gewässer mit Inseln und Bänken zu Gewundenem Gewässer mit Bänken
Dynamische Gerinnebreite 21 m
Durchschnittliche Geschiebefracht 4'300 m³/a
Relative Geschiebefracht $\overline{GF} = 172$ (HQ₂); 116 (HQ₅)
Korrekturfaktor an Gerinnebreite nach Parker 1.0 (HQ₂); 0.83 (HQ₅)

Zustand 1976 - 1993:

Morphologie: Gewundenes Gewässer mit Bänken
Dynamische Gerinnebreite 10 m
Durchschnittliche Geschiebefracht 300 m³/a
Relative Geschiebefracht $\overline{GF} = 12$ (HQ₂); 8.1 (HQ₅)
Korrekturfaktor an Gerinnebreite nach Parker 0.48 (HQ₂); 0.39 (HQ₅)

Die reduzierte Geschiebefracht ist auf Kiesentnahmen im Oberwasser des betrachteten Abschnittes zurückzuführen.

Es ist nicht auszuschliessen, dass lokale Uferverbauungen die Abnahme der Gerinnebreite leicht förderten.

Aare Wildegg – Brugg,
AG

Flussbau AG (2014)

Mit der Inbetriebnahme des KW Wildegg-Brugg 1945 wurde die Aare zur Restwasserstrecke, was zu einer starken Abnahme der Gerinnebreite führte. Luftbilder von 1961 und 1969 zeigen eine vergleichbare Gerinnebreite (Abschnitt Villnachern-Brugg). Infolge des Baus des Geschiebesammlers an der Emmemündung sowie weiterer Kiesentnahmen nahm die Geschiebefracht der Aare stark ab. Infolgedessen ist das Gerinne weiter eingewachsen. Es wird nur die Veränderung durch die reduzierte Geschiebefracht berücksichtigt.

Referenzzustand um 1970:

Morphologie: Gewundenes Gewässer mit Bänken nahe Übergangsbereich zu gewundenem Gewässer mit Inseln und Bänken

Dynamische Gerinnebreite 78 m

Durchschnittliche Geschiebefracht 7'000 m³/a

Relative Geschiebefracht $\overline{GF} = 15$ (HQ₂); 11 (HQ₅)

Korrekturfaktor an Gerinnebreite nach Parker 0.87 (HQ₂); 0.73 (HQ₅)

Zustand 2012:

Morphologie: Gewundenes Gerinne mit Bänken

Dynamische Gerinnebreite 42 m

Durchschnittliche Geschiebefracht 1'000 m³/a

Relative Geschiebefracht $\overline{GF} = 2.2$ (HQ₂); 1.5 (HQ₅)

Korrekturfaktor an Gerinnebreite nach Parker 0.5 (HQ₂); 0.42 (HQ₅)

Es ist nicht auszuschliessen, dass lokale Uferverbauungen die Abnahme der Gerinnebreite leicht förderten.

Alpenrhein Kriessern
und Rheineck, SG

Flussbau AG (2018)

Der Alpenrhein war im natürlichen Zustand eine Auflandungsstrecke. Mit dem Wachstum des Deltas in den Bodensee landete der Rhein langsam auf, womit die Geschiebefracht in Fliessrichtung abnahm. Im Folgenden werden die zwei Abschnitte bei Kriessern und bei Rheineck betrachtet. Weil es sich um zwei verschiedene Abschnitte desselben Gewässers handelt, sind andere Parameter nicht identisch (Korndurchmesser infolge Abrieb und Gefälle bei Rheineck leicht kleiner). Beide Abschnitte sind in historischen Karten gut dokumentiert.

Rhein Kriessern, Zustand 1770 - 1825:

Morphologie: Verzweigtes Gewässer mit 2 Gerinnen

Dynamische Gerinnebreite 380 m

Durchschnittliche Geschiebefracht 52'000 m³/a

Relative Geschiebefracht $\overline{GF} = 40$ (HQ₂); 31 (HQ₅)

Korrekturfaktor an Gerinnebreite nach Parker 2.0 (HQ₂); 1.8 (HQ₅)

Rhein Rheineck, Zustand 1770 - 1825:

Morphologie: Übergangsbereich Gewundenes Gewässer mit Inseln und Bänken zu Gewundenem Gewässer mit Bänken

Dynamische Gerinnebreite 190 m

Durchschnittliche Geschiebefracht 20'000 m³/a

Relative Geschiebefracht $\overline{GF} = 15$ (HQ₂); 12 (HQ₅)

Korrekturfaktor an Gerinnebreite nach Parker 0.97 (HQ₂); 0.85 (HQ₅)

Sellenbodenbach Neu-
enkirch, LU

Flussbau AG (2016)

Der Sellenbodenbach ist ein kleines Gewässer des Mittellandes mit geringer absoluter und relativer Geschiebefracht. Das Wertepaar ($\overline{GF}$; KF) liegt daher nahe beim Ordinatenschnittpunkt b . Der Gewässerabschnitt wird wegen der guten Datenlage (Abflussmessstation, Geschiebefracht, Korndurchmesser) berücksichtigt.

Naturnaher Zustand (kurze Abschnitte):

Morphologie: Gewundenes Gewässer mit Bänken

Dynamische Gerinnebreite 8 m

Durchschnittliche Geschiebefracht $30 \text{ m}^3/\text{a}$

Relative Geschiebefracht $\overline{GF} = 3.3 \text{ (HQ}_2\text{)}; 2.1 \text{ (HQ}_5\text{)}$

Korrekturfaktor an Gerinnebreite nach Parker 0.45 (HQ_2); 0.38 (HQ_5)

Aare Grenchen, SO

VAW (1987)

Die Aare war zwischen Büren und Solothurn bereits vor der Juragewässerkorrektur ein Gewässer mit Sandsohle und ohne Geschiebetrieb (Kies). Dementsprechend kann die Gerinnebreite im natürlichen Zustand einen Hinweis auf den Ordinatenabstand b liefern.

Zustand Erstausgabe Siegfriedkarte:

Morphologie: Mäandrierendes Gewässer ohne Kiesbänke

Dynamische Gerinnebreite 146 m

Durchschnittliche Geschiebefracht $0 \text{ m}^3/\text{a}$

Relative Geschiebefracht $\overline{GF} = 0 \text{ (HQ}_2\text{)}; 0 \text{ (HQ}_5\text{)}$

Korrekturfaktor an Gerinnebreite nach Parker 0.4 (HQ_2); 0.38 (HQ_5)

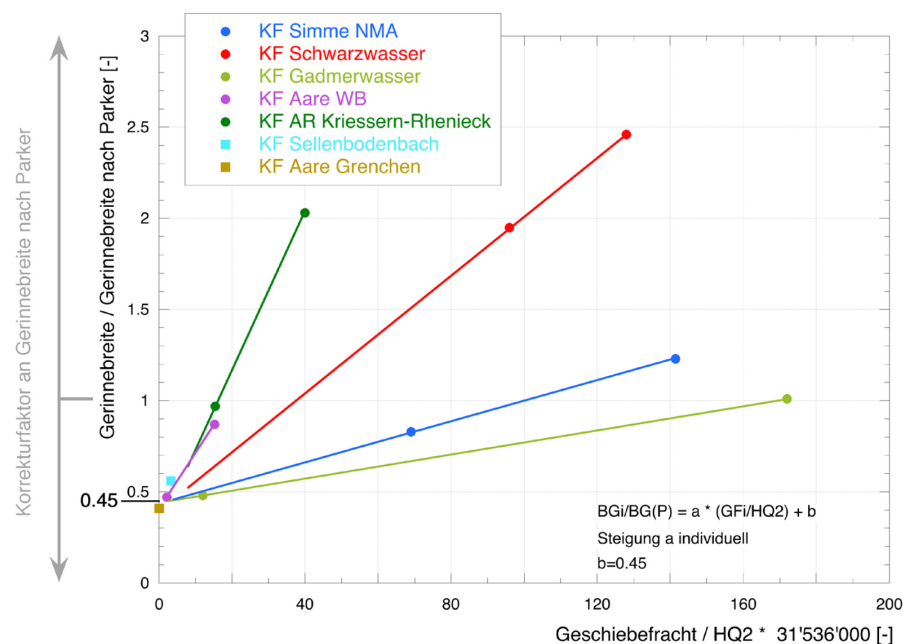


Bild 9

Korrekturfaktor für die Gerinnebreite nach Parker in Funktion der relativen Geschiebefracht unter Berücksichtigung des Abflusses HQ_2 . Dargestellt sind alle Kalibriergewässer.

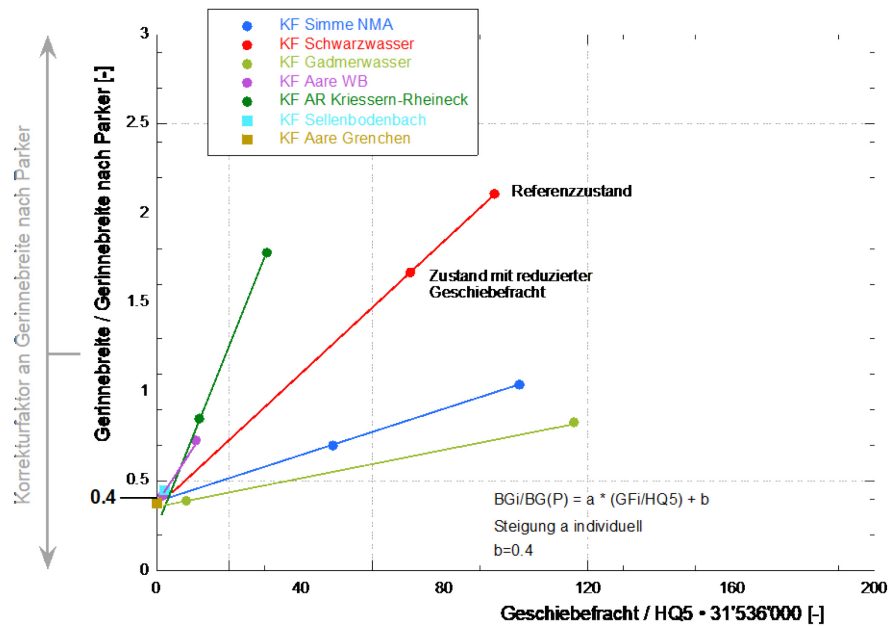


Bild 10 Korrekturfaktor für die Gerinnebreite nach Parker in Funktion der relativen Geschiebefracht unter Berücksichtigung des Abflusses HQ5. Dargestellt sind alle Kalibrierungsgewässer.

Zusammenfassung Bild 9, Bild 10

Werden die zwei Zustände der 5 Gewässer je mit einer Geraden verbunden, so schneiden diese Geraden die Ordinate bei den Werten gemäss Tabelle 2. Die Werte variieren für HQ_2 zwischen 0.41 und 0.44 und für HQ_5 zwischen 0.35 und 0.38. Der Alpenrhein wird zur Bestimmung des Ordinatenabschnitts nicht berücksichtigt, weil zwei verschiedene Gewässerabschnitte verglichen wurden.

Bei der Aare Grenchen (kein Geschiebetrieb) beträgt der Ordinatenabschnitt 0.41 (HQ_2), resp. 0.38 (HQ_5).

Der Ordinaten Schnittpunkt b kann für den Sellenbodenbach nicht bestimmt werden. Da die relative Geschiebefracht $\overline{GF}$ aber sehr klein ist, liegt der Punkt zumindest in der Nähe der Ordinate mit Werten für KF von 0.56 (HQ_2) und 0.45 (HQ_5).

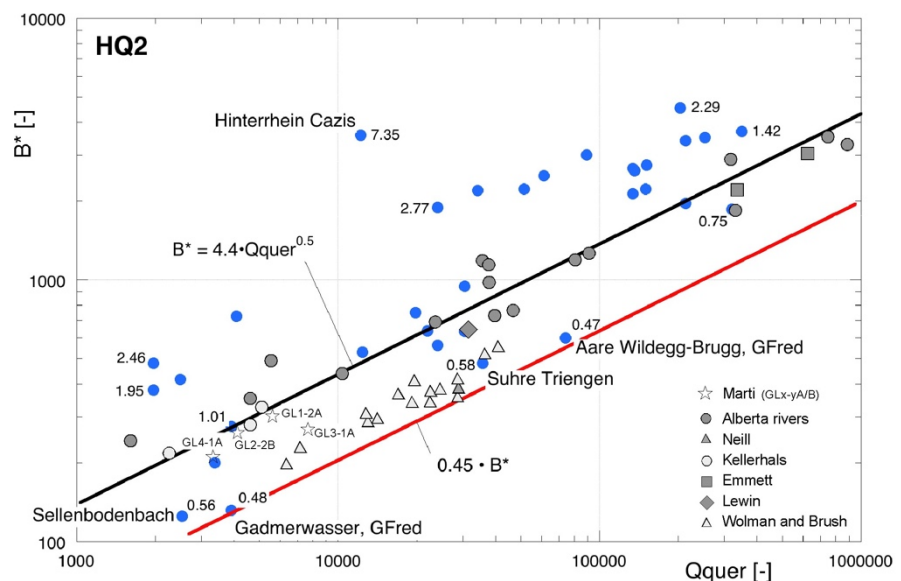
Ausgehend von einem konstanten Ordinatenabschnitt für alle Gewässer im Bereich von 0.4 sowie den 2 zusätzlichen Punkten für jedes Beispielgewässer ist ein linearer Zusammenhang zwischen relativer Geschiebefracht und dem Korrekturfaktor wahrscheinlich.

Tabelle 2 Ordinatenabschnitte b der 5 Beispielgewässer.

	Simme	Schwarzwasser	Gadmerwasser	Aare WB	Alpenrhein
HQ_2	0.44	0.41	0.44	0.43	0.30
HQ_5	0.38	0.37	0.35	0.38	0.26

Bild 11 und Bild 12

- Bei Bild 11 befinden sich alle Punkte auf oder über einer Geraden $0.45 \cdot B^*$ (rote Linie). Das heisst, die Gerinnebreite aller Gewässer ist gleich breit oder breiter als 0.45 mal die Breite nach Gleichung 1. Sowohl einzelne Punkte aus dem Datensatz aus Parker (1979), als auch Punkte aus dem vorliegenden Datensatz liegen auf der roten Linie.
- Bei Bild 12 befinden sich alle Punkte auf oder über einer Geraden $0.40 \cdot B^*$ (rote Linie). Das heisst, die Gerinnebreite aller Gewässer ist gleich breit oder breiter als 0.40 mal die Breite nach Gleichung 1.
- Mehrere blaue Punkte liegen deutlich über Gleichung 2 und den Datenpunkten aus Parker (1979). Das heisst, es wurden Gewässer ausgewertet, welche deutlich grössere dimensionslose Breiten aufweisen. Dabei handelt es sich um stark verzweigte Gewässer mit grosser Dynamik (Beispiel Hinterrhein bei Cazis).



Dimensionslose Gerinnebreite B^* in Funktion des dimensionslosen Abflusse $\bar{Q}$ gemäss Potenzfunktion (2), den Datenpunkten aus Parker 1979, den Modellversuchen von Marti 2006 und gemäss vorliegender Studie (blaue Punkte, Berechnung mit HQ_2 ; Zahlen: $KF = BG/BG_P$). Rote Linie = $0.45 \cdot B^*$

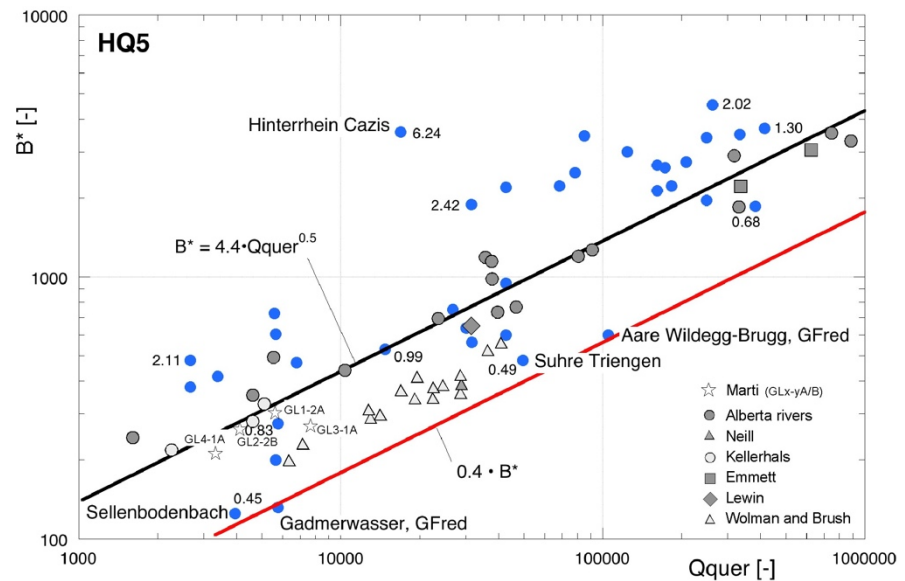


Bild 12 Dimensionslose Gerinnebreite B^* in Funktion des dimensionslosen Abflusses $\bar{Q}$ gemäss Potenzfunktion (2), den Datenpunkten aus Parker 1979, den Modellversuchen von Marti 2006 und gemäss vorliegender Studie (blaue Punkte, Berechnung mit HQ_5 ; Zahlen: $KF = BG/BG_p$. Rote Linie = $0.40 \cdot B^*$

Fazit:

Die zu Beginn des Kapitels aufgestellten Hypothesen können durch folgende Nachweise bestätigt werden:

- (1) Die Verbindungslinien der 2 Wertepaare der fünf Kalibriergewässer mit unterschiedlicher Geschiebefracht und Gerinnebreite schneiden die Ordinate im Bereich von 0.45 (Auswertung mit HQ_2), resp. 0.40 (Auswertung mit HQ_5).
- (2) Die Verbindungslinien weisen individuelle Steigungen auf.
- (3) Gewässer mit sehr kleiner oder fehlender Geschiebefracht weisen einen Ordinatenwert im Bereich von 0.45 (Auswertung mit HQ_2), resp. 0.40 (Auswertung mit HQ_5) auf.
- (4) Daten anderer Autoren weisen ebenfalls minimale Breiten von $0.45 \cdot B^*$ auf (Bild 12). Es ist jedoch nicht bekannt, mit welchen charakteristischen Abflüssen die Auswertungen durchgeführt wurden („bankfull or dominant conditions“, vgl. Abschnitt 2.1.2).

2.4.3 Berechnungsformeln

Die Geradensteigung a_i von Gleichung 7 lässt sich bestimmen, wenn für ein Zustand des Gewässers i der Korrekturfaktor KF und $\overline{GF}$ bekannt sind:

$$a_i = \frac{KF - b}{\overline{GF}} \quad (8)$$

Weil für ein Gewässer die Steigung a_i konstant ist, können die Steigungen zweier Zustände gleichgesetzt werden:

$$\frac{KF_1 - b}{\overline{GF}_1} = \frac{KF_2 - b}{\overline{GF}_2} \quad (9)$$

Mit den Gleichungen 5 und 6 ergibt sich

Gerinnebreite in Funktion der Geschiebefracht

$$BG_i = b \cdot BG_P + \frac{GF_i}{GF_{RZ}} (BG_{RZ} - b \cdot BG_P) \quad (10)$$

Gleichung 10 nach GF_i aufgelöst, ergibt

Geschiebefracht in Funktion der Gerinnebreite

$$GF_i = GF_{RZ} \frac{BG_i - b \cdot BG_P}{BG_{RZ} - b \cdot BG_P} \quad (11)$$

Darin bedeuten

BG_P = Gerinnebreite nach Parker (Gleichung 1)

BG_{RZ} = Gerinnebreite in einem bekannten Referenzzustand

BG_i = Gerinnebreite bei Geschiebefracht GF_i

GF_{RZ} = Geschiebefracht in einem bekannten Referenzzustand

GF_i = Geschiebefracht im Zustand i

Der Ordinatenabstand b nimmt folgende Werte an

$b = 0.40$ (Abfluss HQ_5)

$b = 0.45$ (Abfluss HQ_2)

Als Referenzzustand ist ein in der Breite nicht eingeschränkter Zustand mit bekannter Geschiebefracht zu berücksichtigen.

Gültigkeitsbereich

Die Formeln sind anwendbar für geschiebeführende Gewässer mit einem Gefälle bis ca. 3 % (Beispielgewässer: Schwarzwasser 2.6 %, Brenno bei Castro 2.7 %).

2.5 Einfluss der Geschiebefracht auf die Gerinneform

Vorgehen

Für den Datensatz der vorliegenden Studie (Anhänge 1 und 2) wurde untersucht, zu welcher Verschiebung der Wertepaare (B_w/h ; h/d_m) im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm es bei fehlender Geschiebefracht kommt. Dabei wurde die in Kapitel 2.4.2 hergeleitete Gerinnebreite von $b \cdot BG_P$ berücksichtigt mit

$b = 0.45$ für einen gerinnebildenden Abfluss HQ_2

$b = 0.40$ für einen gerinnebildenden Abfluss HQ_5

Eingabegrößen

Für die Berechnung der Wertepaare (B_w/h ; h/d_m) werden folgende Eingabegrößen benötigt. Zudem wird eine Angabe zur Genauigkeit der Daten gemacht.

Abfluss HQ_2 , HQ_5

Genauigkeit abhängig von der Verfügbarkeit einer Messstation und der Güte der Messdaten.

Korndurchmesser d_m , d_{90}

Genauigkeit abhängig von der Güte und der Anzahl der Probenahmen.

Uferrauheit

Erfahrungswert, abhängig von Bestockung.

Längsgefälle³ J_s

In der Regel zuverlässig zu ermitteln. Bei Kiesentnahmen wird eine Eintiefungstendenz ausgelöst, deren Ausmass bei Gewässern mit grober Sohle (latente Erosion) schwer abzuschätzen ist.

Parameter Breite

Es sind folgende Begriffe zu unterscheiden:

Gerinnebreite

Entspricht der Breite zwischen den Böschungsoberkanten. Die Gerinnebreite ist in der Regel mehr oder weniger identisch mit der Wasserspiegelbreite beim gerinnebildenden Abfluss (natürlicher Zustand). Dabei ist ein Teil des Ufergehölzes benetzt.

Dynamische Gerinnebreite

Die dynamische Gerinnebreite betrifft den gehölzfreien Bereich des Gerinnes (Niederwasserbereich zuzüglich Bänke, inkl. Pioniervegetation). Die dynamische Gerinnebreite dürfte etwa der Wasserspiegelbreite bei einem Q_9 entsprechen (Schälchli, Abegg + Hunzinger, 2000). Aus historischen Karten und Luftbildern wird oft die dynamische Gerinnebreite bestimmt.

Wasserspiegelbreite bei Mittelwasserabfluss

Bei gewundenen Gewässern mit Bänken wird in historischen Karten in der Regel der benetzte Bereich dargestellt. Es ist davon auszugehen, dass dies etwa dem Mittelwasserabfluss entspricht.

Sohlenbreite

Die Sohlenbreite ist um die Böschungsbereiche schmaler als die Gerinnebreite.

³ Gefälle im Istzustand; bei Vorhandensein von Schwellen wird das Bruttogefälle berücksichtigt.

In der vorliegenden Studie wird vereinfachend von einem Rechteckgerinne ausgegangen, das heisst, dass alle erwähnten Breiten identisch sind⁴.

Datensatz im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm mit HQ_2 , resp. HQ_5 , Rechteckgerinne

In Bild 13 und Bild 14 sind im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm alle Wertepaare (B_w/h ; h/d_m) des verwendeten Datensatzes der Schweizer Gewässer im Referenzzustand sowie im Zustand ohne Geschiebe bei hydraulischer Berechnung mit einem Rechteckgerinne eingezeichnet⁵. In Bild 13 sind die Punkte für HQ_2 und eine minimale Gerinnebreite mit einem Korrekturfaktor von 0.45 und in Bild 14 die Punkte für HQ_5 und eine minimale Gerinnebreite mit einem Korrekturfaktor von 0.40 eingezeichnet.

Im Referenzzustand (blaue Punkte) liegen alle Wertepaare verstreut über die vier Gerinneformen mit Geschiebetransport (Verzweigte Gewässer mit mehr als 2 Gerinnen bis Gewundene Gewässer mit Bänken).

Im Zustand ohne Geschiebe (rote Punkte) verlagern sich alle Wertepaare in den Übergangsbereich zwischen gewundenen Gewässern mit Bänken und Mäandern ohne Kiesbänke. Die Punktwolke kann durch eine Linie angenähert werden, die parallel zu den anderen Linien, welche die verschiedenen Gerinneformen gegeneinander abgrenzen, verläuft.

Bestätigung Ordinate - schnittpunkt b

Die ausgewerteten Kalibrierungsgewässer und die empirische Datenanalyse in Kapitel 2.4.2 haben gezeigt, dass bei fehlender Geschiebefracht die Gerinnebreite auf 40 % (HQ_5), resp. 45 % (HQ_2) der Gerinnebreite nach Parker abnimmt.

Gleichung 7 mit $b = 0.40 / 0.45$ wurde unabhängig vom Ahmari & da Silva Diagramm entwickelt. Kommen nun die Punkte bei fehlender Geschiebefracht in den Übergangsbereich zwischen den gewundenen Gewässern mit Bänken und den Mäandern zu liegen, so bestätigt dies die ermittelten b -Werte (rote Punkte in Bild 13 und Bild 14): Wäre der b -Wert grösser, so kämen die Punkte in die Gerinneform «gewundene Gewässer mit Bänken» zu liegen. In diesem Bereich ist aber immer Geschiebe verfügbar ($GF > 0$). Wäre der b -Wert kleiner, so kämen die Punkte in einen Bereich der Gerinneform «Mäander» zu liegen, in welchem sich gemäss Bild 2 Dünen bilden müssten, was bei geringer Geschiebeführung nicht zutreffen kann.

⁴ Bei Gewässern mit grosser Breite (verzweigte Gerinneform) hat die Wahl der Uferneigung keinen spürbaren Einfluss auf die Werte B_w und h . Bei gewundenen Gewässern ist die Uferneigung in der Regel steil und die Annahme eines Rechteckgerinnes entspricht eher der Realität.

⁵ Berechnung der Abflusstiefe mit dem logarithmischen Fließgesetz. Rauheitselement $2 \cdot d_{90}$, Wandrauheit $k_{Wand} = 21 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, reduziertes Gefälle bei kleiner Überdeckung nach Jäggi.

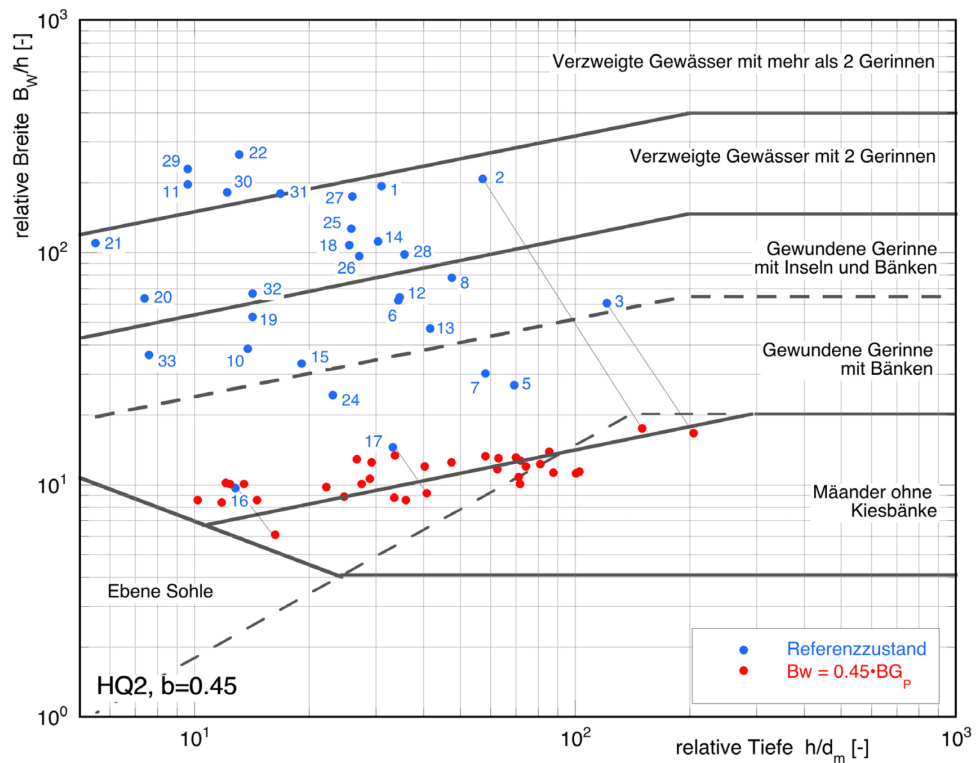


Bild 13

Datensatz der Schweizer Gewässer im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm im Referenzzustand sowie im Zustand ohne Geschiebe (Gerinnenbreite entspricht 0.45 mal der Gerinnenbreite nach Parker, Formel (1)) unter Berücksichtigung eines gerinnebildenden Abflusses HQ_2 . Hydraulische Berechnung mit einem Rechteckgerinne.

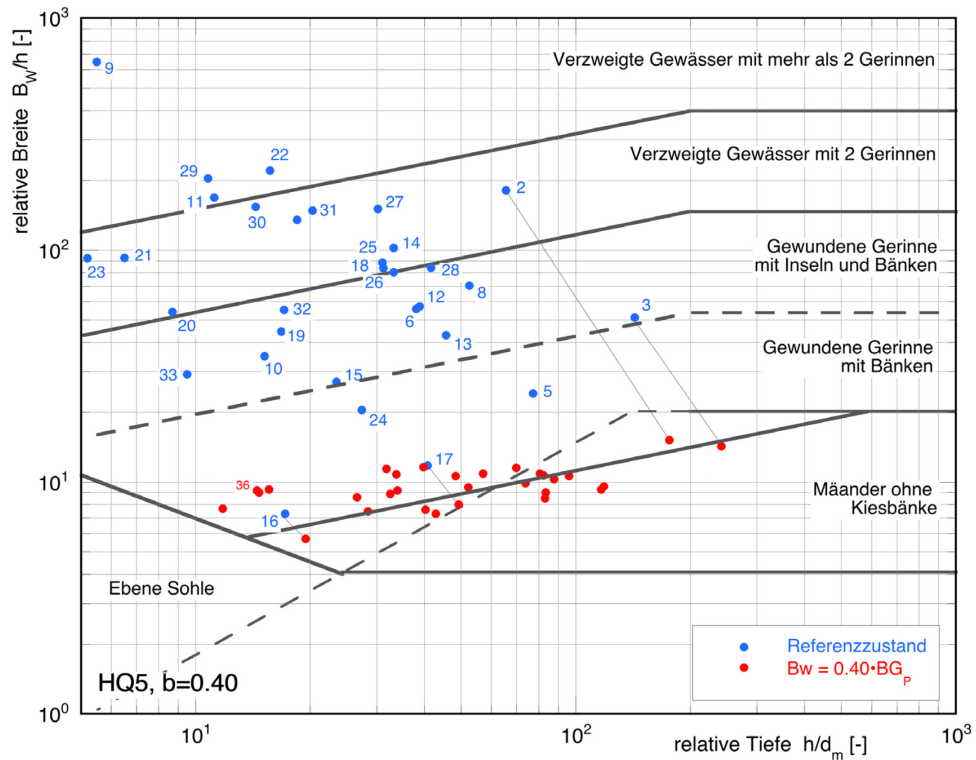


Bild 14

Datensatz der Schweizer Gewässer im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm im Referenzzustand sowie im Zustand ohne Geschiebe (Gerinnenbreite entspricht 0.40 mal der Gerinnenbreite nach Parker, Formel (1)) unter Berücksichtigung eines gerinnebildenden Abflusses HQ_5 . Hydraulische Berechnung mit einem Rechteckgerinne.

Kritischer Pfad

Wird einem natürlichen Gewässer Geschiebe entzogen, so nimmt dessen Gerinnebreite ab und die Position im modifizierten Ahmari & da Silva-Diagramm (B_w/h ; h/d_m) bewegt sich auf einem **kritischen Pfad** bis in den unteren Bereich der gewundenen Gewässer mit Bänken. Dabei verändert sich die Gerinneform vom Referenzzustand hin zu einem gewundenen Gewässer mit abgepflasterter Sohle ohne Geschiebebänke.

2.6 Ziele für Gerinneform und Anforderung an die Geschiebefracht

In der Vollzugshilfe wird das Ziel für die Morphologie des Gewässers wie folgt konkretisiert und daraus eine Anforderung an die Geschiebefracht abgeleitet:

Konkretes Ziel für die Gerinneform

Die Gerinneform des Gewässers ist ähnlich wie im Referenzzustand (gleicher Typ).

Anforderung an die Geschiebefracht

Die Geschiebefracht ist so gross, dass sich in den naturnahen Abschnitten eine Gerinneform wie oben beschrieben einstellen kann.

Begründung der Zielvorgabe

Wenn die Gerinneform annähernd erreicht ist, dann ist auch der Lebensraum ähnlich wie im Referenzzustand. Wenn die Gerinneform nicht annähernd erreicht wird, dann ist die Zusammensetzung des Lebensraums des Gewässers wesentlich anders als im Referenzzustand, was zur Folge hat, dass die gewässertypischen Tiere und Pflanzen im Vergleich zum Referenzzustand wesentlich beeinträchtigt sind.

Übertragen auf die Gerinneformen im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm kann man von einer ähnlichen Gerinneform sprechen, wenn sich die Position des Gewässers im Diagramm nicht mehr als um ungefähr den halben Abstand zwischen zwei Gewässerformgrenzen verschiebt. Für Gewässer, die sich im Referenzzustand weit oben in einem Bereich für eine Gerinneform befinden heisst das, dass sie sich im Zielzustand maximal in den mittleren Bereich der Gerinneform verlagern dürfen. Für Gewässer, die sich im Referenzzustand im unteren Bereich einer Gerinneform befinden heisst das, dass sie im Zielzustand die Grenzlinie⁶ zur nächsten Gerinneform nur leicht unterschreiten dürfen.

Diese qualitative Zielvorgabe wird mit der folgenden quantitativen Bedingung sichergestellt:

Bedingung 1

$$\left(\frac{B_w}{h}\right)_{Ziel} \geq 0.75 \left(\frac{B_w}{h}\right)_{RZ} \quad (12)$$

Das heisst, dass die relative Breite B_w/h um maximal 25% reduziert werden darf.

Bedingung 2

Bei gewundenen Gewässern mit Bänken, welche im Referenzzustand eine geringe Geschiebefracht aufweisen und deren Wertepaar $(B_w/h; h/d_m)$ sich im unteren Bereich der entsprechenden Fläche im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm befindet, könnte die oben definierte Anforderung dazu führen, dass die erforderliche Fracht null würde. Aus diesem Grund ist zusätzlich folgende Bedingung zu erfüllen:

$$\left(\frac{B_w}{h}\right)_{Ziel} \geq \frac{1}{2} \left(\left(\frac{B_w}{h}\right)_{RZ} + \left(\frac{B_w}{h}\right)_{GF=0}\right) \quad (13)$$

⁶ Wird einem Gewässer Geschiebe entzogen, so verändert sich die Gerinneform kontinuierlich. Die Übergänge der im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm definierten Flächen sind nicht scharf, sondern fließend.

Das heisst, dass sich das Wertepaar $(B_w/h; h/d_m)$ ausgehend vom Referenzzustand maximal um die halbe Distanz bis zu dessen Position ohne Geschiebefracht verlagern darf.

In Bild 15 ist die Veränderung der Gerinneform im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm bei einer schrittweisen Abminderung von der relativen Breite B_w/h um jeweils 25% beispielhaft dargestellt. Die entsprechende Veränderung der Gerinneform von einem Punkt zum anderen ist im Sinne der oben beschriebenen Bedingung 1 noch zulässig.

Bild 16 zeigt eine wesentliche Veränderung der Gerinneform am Beispiel des Schwarzwassers. Infolge von Kiesentnahmen nahm das Verhältnis B_w/h von 104.3 (1954) auf 74.5 (2016) ab, was einer Reduktion von 29 % entspricht. Dadurch hat sich die Gerinneform von einem verzweigten Gewässer mit 2 Gerinnen verändert zu einem Gewässer im Übergangsbereich zu gewundenen Gewässern mit Inseln und Bänken. Die zwei Gerinneformen sind nicht mehr ähnlich und die oben genannte Anforderung ist nicht mehr erfüllt.

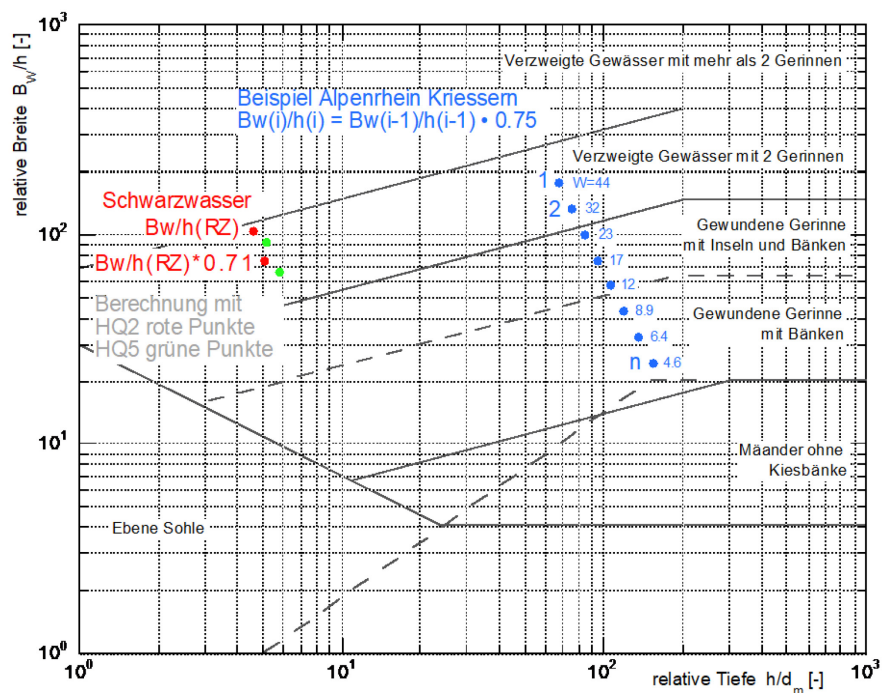


Bild 15

Modifiziertes Ahmari & da Silva Diagramm.

Beispiel Alpenrhein Kriessern: Verlagerung des Wertepaars $(B_w/h; h/d_m)$ bei einer schrittweisen Abminderung des Verhältnisses B_w/h um 25%. Angegeben ist zudem W gemäss Gleichung 14.

Beispiel Schwarzwasser: Verlagerung des Wertepaars von 1954 bis 2016 mit einer Reduktion von B_w/h um 29%.

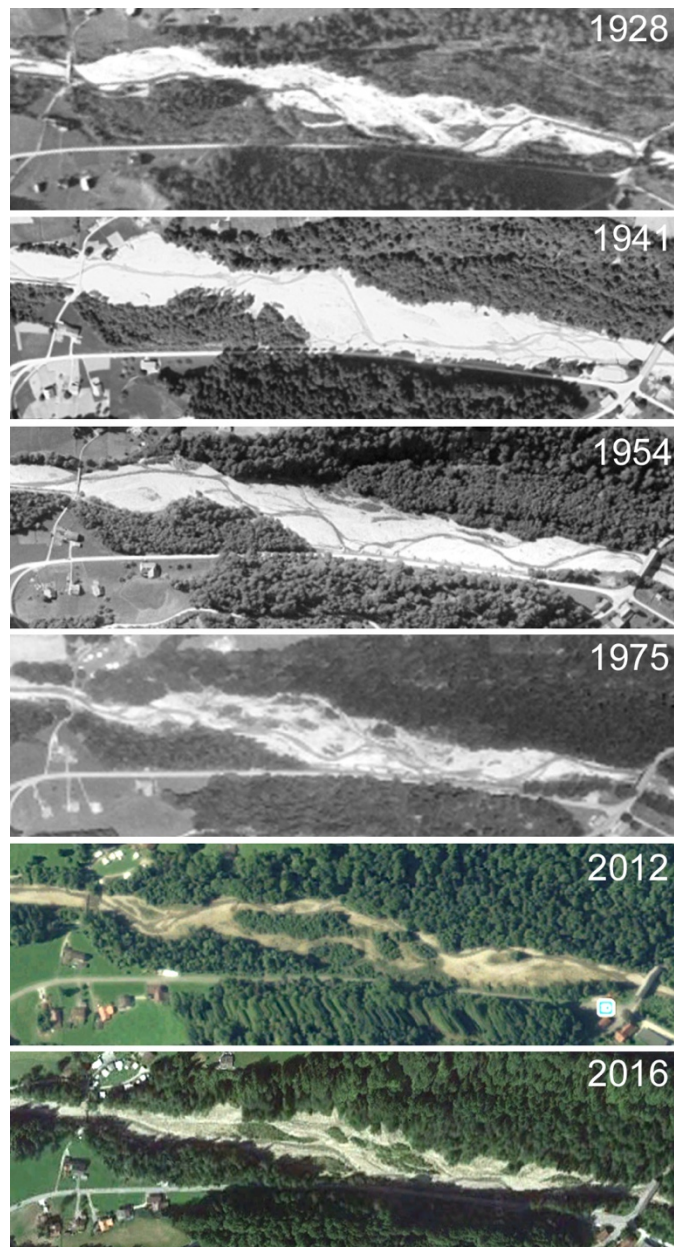


Bild 16 Schwarzwasser flussabwärts von Heubach. Orthofotos von 1928 bis 2016. Fliessrichtung von links nach rechts. Infolge von Kiesentnahmen nahm die dynamische Gerinnebreite ab und die Gerinneform hat sich von einem verzweigten Gewässer zu einem Gewässer im Übergangsbereich zu gewundenen Gewässern mit Inseln und Bänken verändert.

Erforderliche Geschiebefracht Beispielgewässer

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen lässt sich mit Gleichung 11 für alle Gewässer die erforderliche Geschiebefracht berechnen.

In Bild 17 und Bild 18 sind für Auswertungen mit HQ_5 und HQ_2 das Verhältnis zwischen der erforderlichen Geschiebefracht und der Fracht im Referenzzustand in Funktion der dimensionslosen Grösse

$$W = \left(\frac{B_w}{h} \right) \left(\frac{h}{d_m} \right)^{-0.34} \quad (14)$$

dargestellt. W kann als Mass der Gerinneform interpretiert werden.

Wertepaare (B_w/h ; h/d_m) mit gleichem W liegen im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm auf einer Geraden parallel zu den ansteigend verlaufenden Trennlinien zwischen den Gerinneformen. Je grösser W , desto stärker verzweigt ist das Gerinne.

Es zeigt sich Folgendes:

Verzweigte Gewässer mit mehr als 2 Gerinnen:

Die erforderliche Geschiebefracht liegt bei 80 % der Geschiebefracht im Referenzzustand (beim Hinterrhein mit $W = 390$ erreicht die erforderliche Geschiebefracht den Maximalwert von 81 %, Auswertung mit HQ_5).

Verzweigte Gewässer mit 2 Gerinnen:

Die erforderliche Geschiebefracht beträgt 73 bis 80 % der Geschiebefracht im Referenzzustand.

Gewundene Gewässer mit Inseln und Bänken:

Die erforderliche Geschiebefracht beträgt ca. 63 bis 78 % der Geschiebefracht im Referenzzustand.

Gewundene Gewässer mit Bänken:

Die erforderliche Geschiebefracht beträgt 47 bis etwa 70 % der Geschiebefracht im Referenzzustand. Beim Sellenbodenbach und der Suhre wurde Bedingung 2 massgebend.

Auf die Unterschiede zwischen den Auswertungen mit HQ_5 und HQ_2 wird in Kapitel 2.7 eingegangen.

Zusammenfassung

Damit die Gerinneform eines Gewässers nicht massgebend verändert wird, muss die Geschiebefracht mindestens folgende Prozentwerte der Fracht im Referenzzustand erreichen:

Verzweigte Gewässer	$\geq 75 - 80\%$
Gewundene Gewässer mit Inseln und Bänken	$\geq 63 - 78\%$
Gewundene Gewässer mit Bänken	$\geq 47 - 70\%$

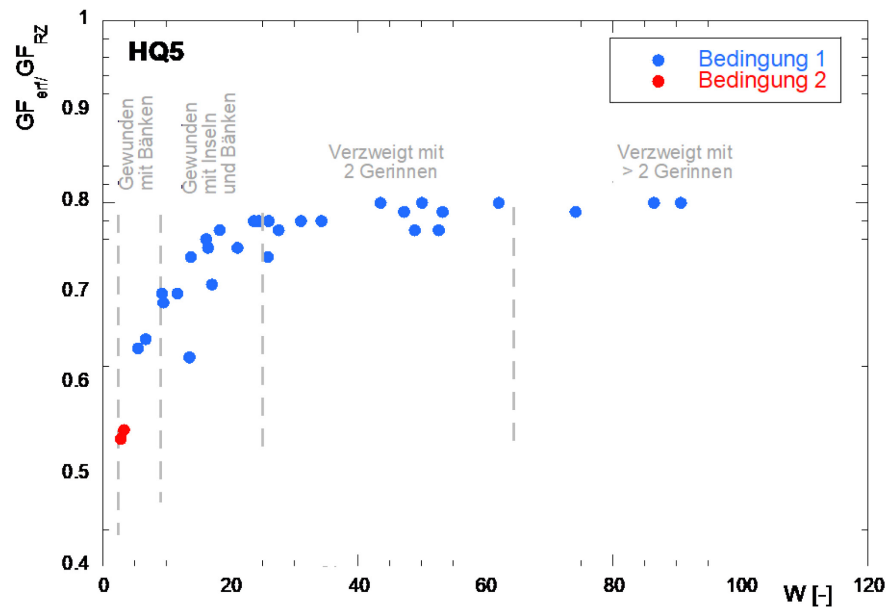


Bild 17 Verhältnis zwischen erforderlicher Geschiebefracht und der Geschiebefracht im Referenzzustand in Funktion der dimensionslosen Grösse W bei einer Auswertung mit HQ_5 . $W = f(Bw/h; h/dm)$, vgl. Gleichung 14 und Bild 15, ist ein Mass für die Gerinneform.

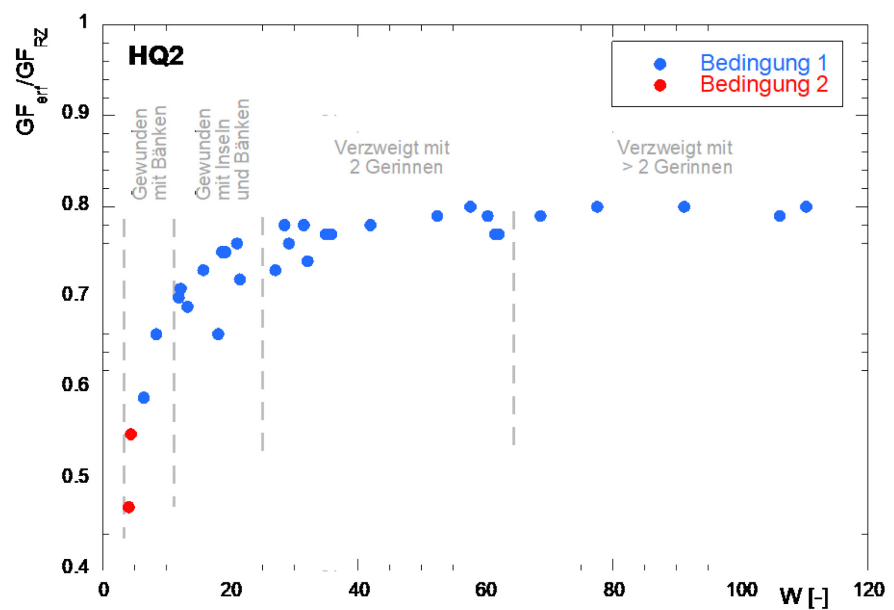


Bild 18 Verhältnis zwischen erforderlicher Geschiebefracht und der Geschiebefracht im Referenzzustand in Funktion der dimensionslosen Grösse W bei einer Auswertung mit HQ_2 . $W = f(Bw/h; h/dm)$, vgl. Gleichung 14 und Bild 15, ist ein Mass für die Gerinneform.

2.7 Vergleich der Auswertungen mit HQ_2 und HQ_5

Die Wahl des massgebenden Abflusses hat einen Einfluss auf die Gerinnebreite nach Parker, die Abflusstiefe h und den Ordinatenwert b (Diagramm Korrekturfaktor Parker).

„bankfull or dominant conditions“

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 ausgeführt, wird in der Literatur als massgebender Abfluss entweder der bordvolle oder der bettbildende Abfluss erwähnt.

Der bordvolle Abfluss, wie er bei Ahmari & da Silva verwendet wird, wird in der Literatur meist als $HQ_{1.5}$, manchmal als HQ_1 , selten über HQ_3 angegeben.

Zum bettbildenden oder morphologischen Abfluss gibt es sehr unterschiedliche Angaben. Bei Gebirgsflüssen mit steiler Geschiebefunktion kann der bettbildende Abfluss viel grösser als der bordvolle Abfluss sein (Bunte *et al.*, 2014). Bei alluvialen Flüssen im Gleichgewicht soll der bettbildende Abfluss aber nahe dem bordvollen Abfluss liegen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der massgebende Abfluss kein Abfluss mit konstanter Jährlichkeit HQ_x ist, sondern von Gewässer zu Gewässer verschieden ist. In der Regel dürfte er im Bereich von HQ_2 liegen, bei steilen Gewässern aber grösser sein.

Datenverfügbarkeit

Auf www.hydrodaten.admin.ch ist HQ_2 in einer Tabelle angegeben. HQ_5 ist aus einer Graphik zu lesen.

Gerinneform im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm
Bild 19

In Bild 19 sind alle Datenpunkte im Referenzzustand sowie ohne Geschiebe basierend auf Berechnungen mit HQ_2 und HQ_5 im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm eingezeichnet.

Bei der Auswertung mit HQ_2 befinden sich alle Punkte weiter oben links, als bei der Auswertung mit HQ_5 . Dementsprechend verläuft auch die Trennlinie, welche die Wertepaare bei fehlender Geschiebefracht annähert, etwas weiter oben. Dasselbe gilt für die Trennlinie zwischen den Gerinneformen «Gewundene Gewässer mit Inseln und Bänken» und «Gewundene Gewässer mit Bänken».

Wird die Lage einzelner Wertepaare mit Lagebestimmung mit HQ_2 und HQ_5 mit der Abgrenzung gemäss modifiziertem Ahmari & da Silva verglichen, so kann folgendes festgestellt werden (beobachtete Gerinneformen vgl. Anhang 2):

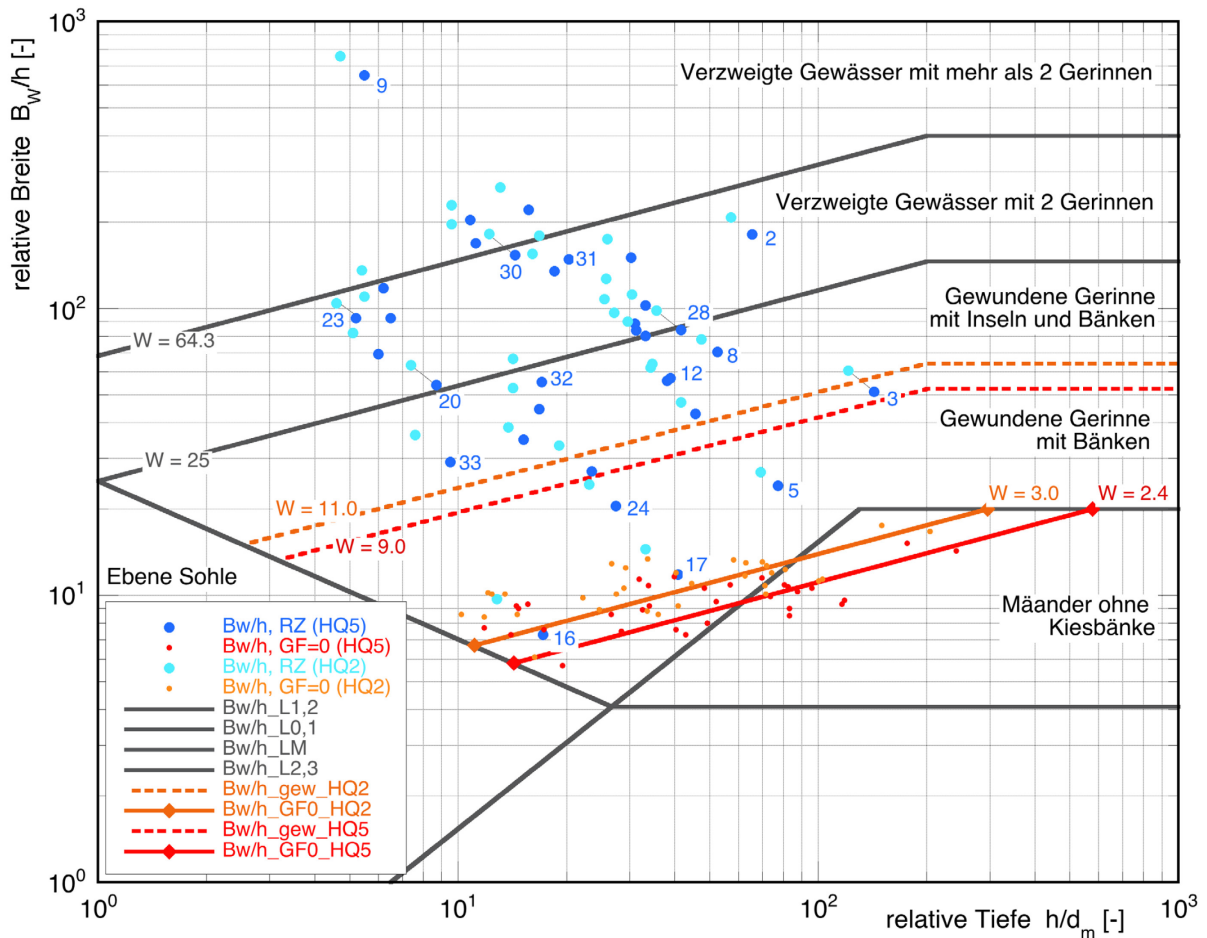


Bild 19 Vergleich der Auswertungen mit HQ₅ (dunkelblaue und rote Punkte) und HQ₂ (hellblaue und orange Punkte).

Brenno Castro (Nr. 20) Der Punkt befindet sich bei einer Auswertung mit HQ₅ an der unteren Grenze des Bereichs der verzweigten Gewässer mit 2 Gerinnen; bei einer Auswertung mit HQ₂ innerhalb des Bereichs der verzweigten Gewässer mit 2 Gerinnen. Auf Luftbildern (1934 – 2016) sind 2 Gerinne mit ausgedehnten Bänken sowie Inseln mit Gehölz zu erkennen. Die Gerinneform ist dem Übergangsbereich zuzuordnen.

Töss Dättlikon (Nr. 31) Der Punkt befindet sich bei einer Auswertung mit HQ₅ im Bereich der verzweigten Gewässer mit 2 Gerinnen; bei einer Auswertung mit HQ₂ auf der Grenzlinie zum Bereich der verzweigten Gewässer mit mehr als 2 Gerinnen. Auf der historischen Karte pendelt die Töss in der breiten Schotterebene mit 1 bis 3 Gerinnen. Die Gerinneform entspricht eher einem verzweigten Gewässer mit 2 Gerinnen.

Simme Därstetten, Niedermettlisau (Nr. 32) Der Punkt befindet sich bei einer Auswertung mit HQ₅ noch im Bereich der gewundenen Gewässer mit Inseln und Bänken; bei einer Auswertung mit HQ₂ im unteren Bereich der verzweigten Gewässer mit 2 Gerinnen. Der morphologisch nicht ganz einheitliche Abschnitt zeigt beide Gerinneformen.

Schwarzwasser Heubach (vgl. Bild 15)

Alle Punkte befinden sich im Bereich der verzweigten Gewässer mit 2 Gerinnen. Bei reduzierter Geschiebezufuhr zeigt das Gewässer Merkmale von gewundenen Gewässern mit Inseln und Bänken. Dies passt besser zur Auswertung mit HQ_5 .

Fazit

Weil die Grenzen zwischen den Gerinneformen fließend sind, zeigen Gewässer im Grenzbereich zweier Gerinneformen oft Merkmale beider Gerinneformen. Die Auswertung der Gewässerbeispiele zeigt eine etwas bessere Übereinstimmung für HQ_5 .

Vergleich der erforderlichen Geschiebefrachten bei Auswertungen mit HQ_2 und HQ_5

In Bild 20 ist der Vergleich der erforderlichen Geschiebefrachten bei Auswertungen mit HQ_5 und HQ_2 dargestellt.

Es zeigt sich, dass beide Auswertungen praktisch identische Resultate ergeben. Einzig bei der Aare Wynau und dem Sellenbodenbach (beides gewundene Gewässer mit Bänken) ergibt eine Auswertung mit HQ_2 eine um 8 bis 13% geringere Geschiebefracht.

Fazit

Die Berechnung der erforderlichen Geschiebefracht für die Beispielgewässer in Kapitel 2.6 hat gezeigt, dass der Einfluss der Wahl von HQ_2 und HQ_5 nicht signifikant ist. Dies bedeutet, dass eine Auswertung mit beiden Abflüssen zielführend ist und zu vergleichbaren Ergebnissen führt. Eine Auswertung mit dem Abfluss HQ_2 bietet aber folgende Vorteile:

- Ungefähre Übereinstimmung mit dem bordvollen Abfluss, wie er bei Ahmari & da Silva verwendet wird.
- Direkte Verfügbarkeit bei den BAFU-Messstationen auf www.hydrodaten.admin.ch.

Ein Nachteil ist die vergleichsweise kleinere erforderliche Geschiebefracht bei einzelnen gewundenen Gewässern mit Bänken.

Wir empfehlen daher, eine Auswertung mit HQ_2 zu verwenden, die in Kapitel 2.5 formulierten Bedingungen aber wie folgt zu ergänzen:

Die erforderliche Geschiebefracht ist $\geq 50\%$ der Geschiebefracht im Referenzzustand.

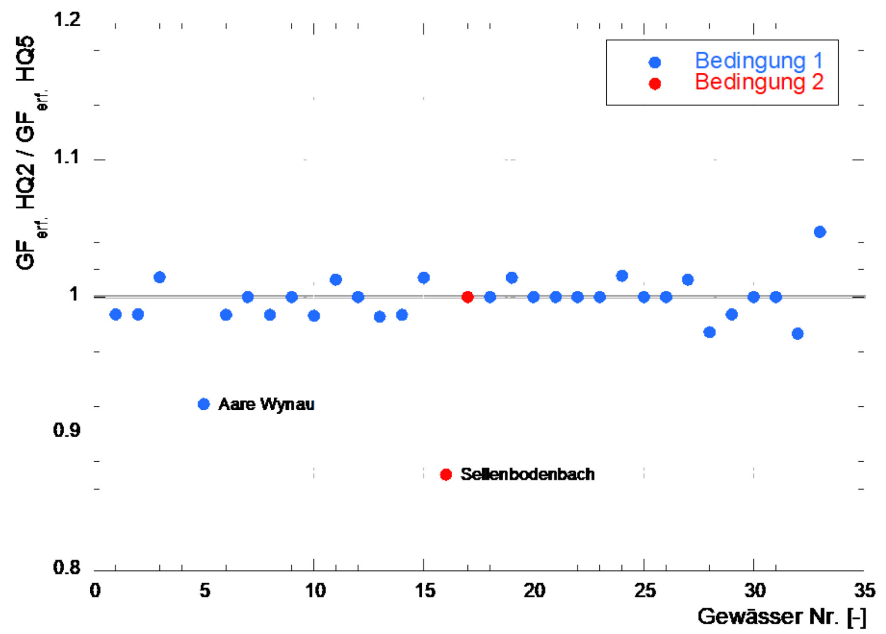


Bild 20 Vergleich der erforderlichen Geschiebefracht bei einer Auswertung mit HQ₂ und HQ₅ für die untersuchten Gewässerstrecken.

3 Berechnungsschritte und Eingangsparameter

Schritt 1

Gerinnebreite des Referenzzustandes

Historische Karten und Pläne, Luftbilder oder Felderhebungen in Vergleichsstrecken veranschaulichen die charakteristische Gerinneform im Referenzzustand.

Zur Bestimmung der dynamischen Gerinnebreite wird die gehölzfreie Fläche eines Gewässerabschnitts dividiert durch die Länge des Talwegs des Abschnitts (Bild 21).

Schritt 2

h und B_W des massgebenden Abflusses

Mit einer Normalabflussberechnung im Rechteckgerinne wird für den massgebenden Abfluss (HQ_2) das Wertepaar (B_W/h ; h/d_m) bestimmt, das zur Darstellung des Referenzzustands im modifizierten Diagramm von Ahmari & da Silva nötig ist. Dabei ist h die Abflusstiefe und B_W die Wasserspiegelbreite bei HQ_2 (Wasserspiegelbreite B_W und Gerinnebreite B_G sind wegen der Annahme eines Rechteckgerinnes identisch). d_m ist der mittlere Korndurchmesser des Sohlenmaterials. HQ_2 ist der Abfluss eines 2-jährlichen Ereignisses und dient als pragmatische Annäherung an den bordvollen Abfluss.

Schritt 3

Gerinneform des Referenzzustandes

Das Wertepaar (B_W/h ; h/d_m) für den Referenzzustand wird im modifizierten Diagramm von Ahmari & da Silva markiert und die entsprechende Gerinneform abgelesen (Bild 22). Zur Plausibilisierung ist das Resultat mit der Gerinneform zu vergleichen, welche in den historischen Karten oder Luftbildern sichtbar ist.

Schritt 4

Gerinnebreite nach Parker

Berechnung der Gerinnebreite nach Parker (1979) aus:

$$BG_P = 4.4 \sqrt{\frac{HQ_2}{\sqrt{(s-1)g} d_m}} \quad (15)$$

mit

s = relative Dichte von Sediment und Wasser (= 2.65)

g = Erdbeschleunigung (= 9.81 m/s²)

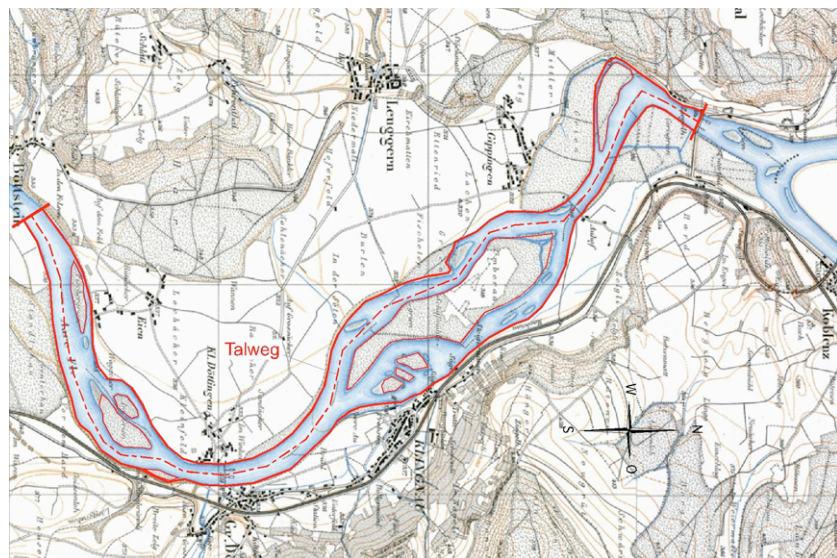


Bild 21

Beispiel Aare Klingnau: Gehölzfreie Fläche und Talweg. Fliessrichtung von links nach rechts.

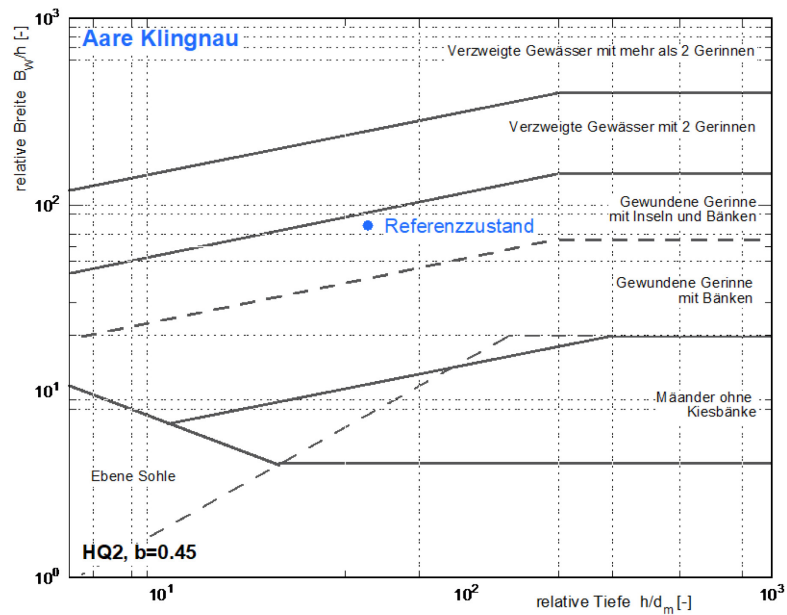


Bild 22 Beispiel Aare Klingnau: Position des Wertepaares (B_w/h ; h/d_m) des Referenzzustandes im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm mit Zuordnung der Gerinneform (Schritt 3).

Schritt 5

Gerinnebreite bei fehlender Geschiebezufuhr

Die Gerinnebreite bei fehlender Geschiebezufuhr ergibt sich aus der Gerinnebreite nach Parker und dem Korrekturfaktor 0.45 (bei Verwenden von HQ_2):

$$BG_{GF=0} = 0.45 BG_P \quad (16)$$

Schritt 6

Gerinneform bei fehlender Geschiebezufuhr

Für die Gerinneform bei fehlender Geschiebezufuhr wird mit einer Normalabflussberechnung das Wertepaar ($BG_{GF=0}/h$; h/d_m) berechnet und im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm eingezeichnet (Bild 23).

Zwischen den Wertepaaren (B_w/h ; h/d_m) für den Referenzzustand und bei fehlender Geschiebezufuhr wird eine Verbindungslinie gezogen. Diese stellt den kritischen Pfad dar, auf welchem sich das Wertepaar (B_w/h ; h/d_m) verändert, wenn die Geschiebefracht kleiner ist als die Fracht im Referenzzustand (Bild 23).

Schritt 7

Relative Breite im Zielzustand

Es sind folgende zwei Bedingungen zu erfüllen:

$$\left(\frac{B_w}{h}\right)_{Ziel} \geq 0.75 \left(\frac{B_w}{h}\right)_{RZ} \quad (17)$$

und

$$\left(\frac{B_w}{h}\right)_{Ziel} \geq \frac{1}{2} \left(\left(\frac{B_w}{h}\right)_{RZ} + \left(\frac{B_w}{h}\right)_{GF=0} \right) \quad (18)$$

Bei Erfüllung dieser Bedingungen ist die Gerinneform ähnlich derjenigen im Referenzzustand (Bild 24).

Schritt 8

Gerinnebreite im Zielzustand

Die Gerinnebreite BG_{Ziel} , welche sich im Zielzustand einstellt, wird mit einer Normalabflussberechnung bestimmt, indem iterativ für verschiedene Breiten der Term B_w/h berechnet und mit $(B_w/h)_{Ziel}$ verglichen wird.

Schritt 9

Erforderliche Geschiebefracht

Die erforderliche Geschiebefracht wird berechnet aus

$$GF_{erf} = GF_{RZ} \frac{BG_{Ziel} - 0.45 BG_P}{BG_{RZ} - 0.45 BG_P} \quad (19)$$

Die resultierende erforderliche Geschiebefracht muss grösser sein als

$$GF_{erf} \geq 0.5 GF_{RZ} \quad (20)$$

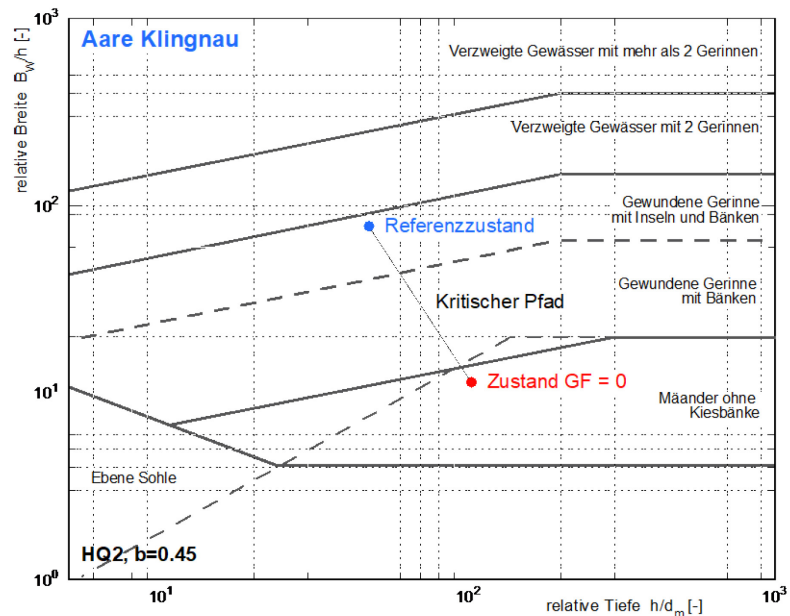


Bild 23

Beispiel Aare Klingnau: Position des Wertepaares (B_w/h ; h/d_m) im Referenzzustand und im Zustand ohne Geschiebe mit dem kritischen Pfad im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm (Schritt 6).

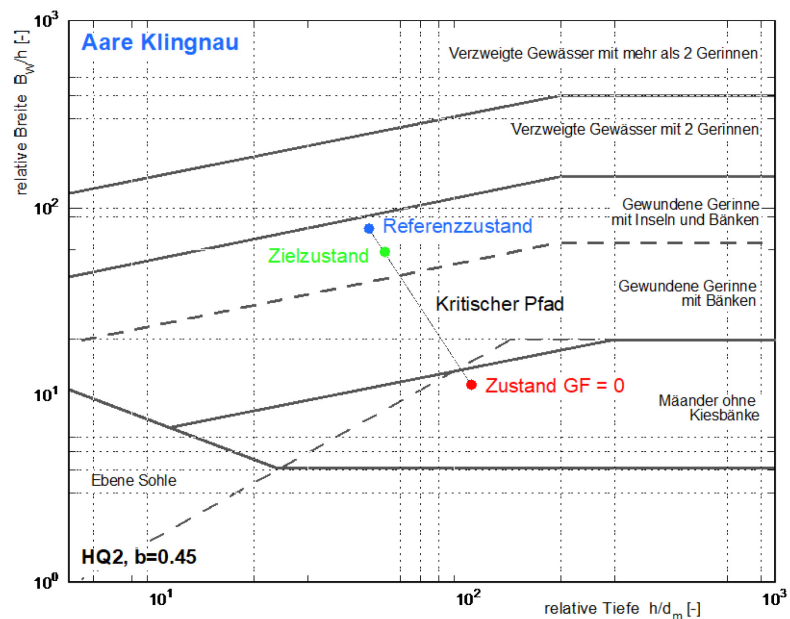


Bild 24

Beispiel Aare Klingnau: Position des Wertepaares (B_w/h ; h/d_m) bei Erfüllung von Bedingung 1, resp. im Zielzustand im modifizierten Ahmari & da Silva Diagramm (Schritt 7).

4 Sensitivitätsanalyse

Ziel der Sensitivitätsanalyse

Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse soll aufgezeigt werden, wie robust die hier vorgestellte Methode bei der Anwendung in der Praxis ist. Die Methode erfordert die Erhebung von Messgrößen aus Karten (Gerinnebreite im Referenzzustand, Gefälle), aus der Natur (Korndurchmesser) oder deren Schätzung mit Hilfe empirischer Ansätze (Abflusswerte). Die Messgrößen sind mit Fehlern behaftet, welche sich auf die Unschärfe des Endergebnisses, das Verhältnis der erforderlichen Fracht zur Fracht im Referenzzustand, auswirkt. Mit der Sensitivitätsanalyse wird das Ausmass dieser Unschärfe bestimmt.

Vorgehen

Der Einfluss eines Fehlers an den Eingangsgrößen wird mit Hilfe einer Variation der Eingangsgrößen bestimmt. Das für die Beispielgewässer von Anhang 1 bestimmte Verhältnis der erforderlichen Fracht zur Fracht im Referenzzustand (Bild 18) wird als beste Schätzung betrachtet. Jede Eingangsgrösse wird um Werte zwischen $\pm 10\%$ und $\pm 20\%$ variiert und die Abweichung von der besten Schätzung in Prozent bestimmt. Die einzelnen prozentualen Abweichungen werden nach dem Gauss'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz geometrisch addiert und daraus ein mittlerer Fehler am Endergebnis abgeleitet.

Eingangsgrösse	geschätzter mittlerer Fehler
BG_{RZ}	$\pm 10\%$
J	$\pm 10\%$
d_{90}	$\pm 20\%$
d_m	$\pm 20\%$
HQ_2	$\pm 15\%$
k_{Wand}	$\pm 3 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

Tabelle 3 Variation der Eingangsgrößen für die Sensitivitätsanalyse

Ergebnisse

In Bild 25 und Bild 26 sind die relativen Fehler am berechneten Verhältnis GF_{erf}/GF_{RZ} in Funktion von W (im Referenzzustand) für verschiedene Eingangsgrößen bzw. Kombinationen davon abgebildet. Der relative mittlere Fehler am Endergebnis nimmt mit zunehmender Verzweigung (zunehmendem Wert W) ab. Für gewundene Gewässer mit Bänken wurden relative mittlere Fehler zwischen 6 % und 13 % bestimmt. Für alle übrigen Gewässer relative mittlere Fehler kleiner als 5 % (Bild 25). Die Methode erweist sich insgesamt also als robust.

Eine Unsicherheit an der Bestimmung der Gerinnebreite im Referenzzustand BG_{RZ} wirkt sich am stärksten auf das Endergebnis aus. Unsicherheiten an den Eingangsgrößen, welche die Abflussberechnung beeinflussen (Gefälle J , Korngrösse d_{90} und Wandrauheit k_{Wand}), wirken sich weniger stark aus als Unsicherheiten an HQ_2 und d_m , welche beide für die Bestimmung der Gerinnebreite nach Parker verwendet werden.

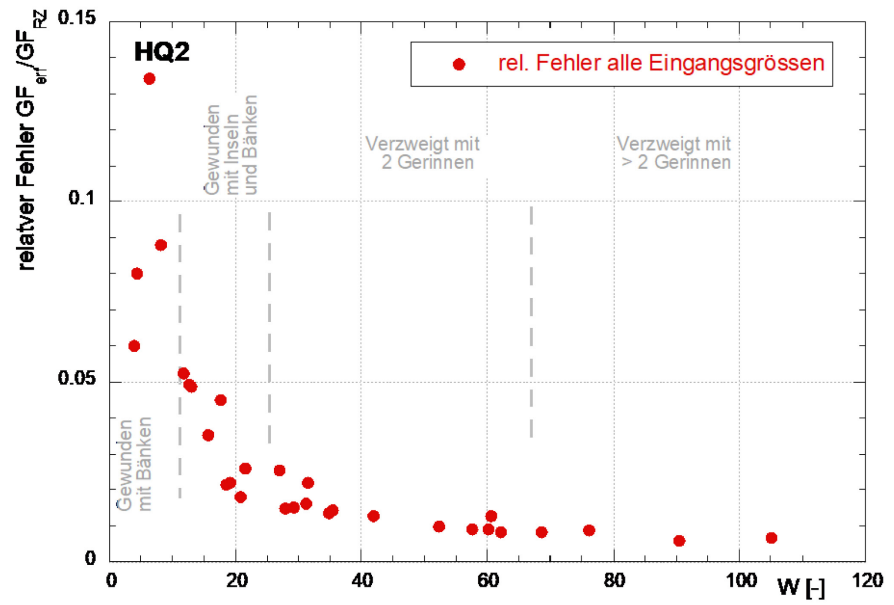


Bild 25 Relativer mittlerer Fehler am Ergebnis GF_{eff}/GF_{RZ} bei einer Variation der Eingangsgrössen gemäss Tabelle 3.

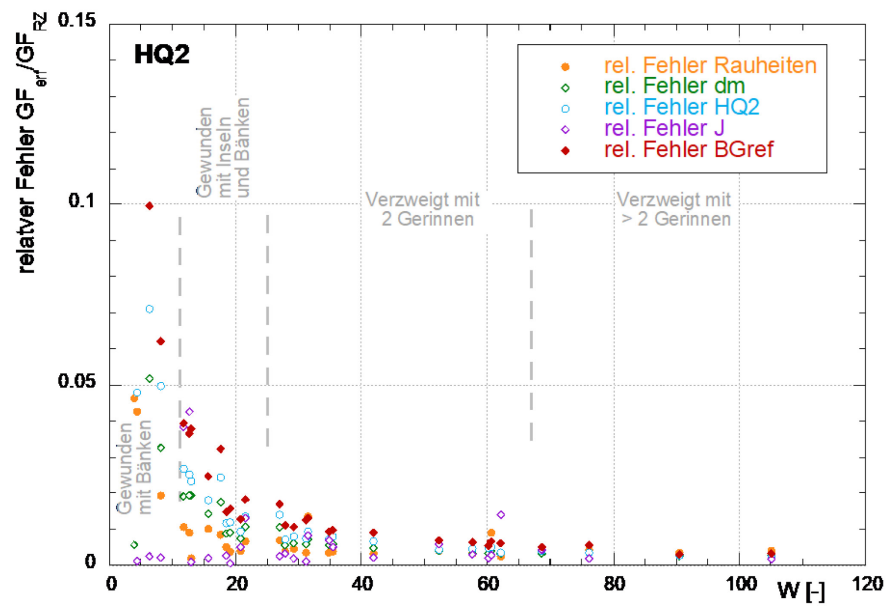


Bild 26 Relativer mittlerer Fehler am Ergebnis GF_{eff}/GF_{RZ} bei einer Variation ausgewählter Eingangsgrössen gemäss Tabelle 3.

Einfluss der Geschiebefracht im Referenzzustand

Die Berechnung der erforderlichen Geschiebefracht ist abhängig von der Geschiebefracht im Referenzzustand. Fehler an der Geschiebefracht im Referenzzustand wirken sich linear auf die erforderliche Geschiebefracht aus. Aus diesen Gründen ist der Bestimmung der Geschiebefracht im Referenzzustand grosse Aufmerksamkeit zu schenken und, soweit möglich, aufgrund verschiedener Ansätze zu bestimmen und zu plausibilisieren.

Mit der Methode 1 wird der *Anteil* an der Geschiebefracht im Referenzzustand bestimmt. Damit ist die Methodik selbst nicht von der Genauigkeit der Geschiebefracht im Referenzzustand abhängig.

5 Anwendungsempfehlung

Die in Kapitel 2 vorgestellte Methode wurde spezifisch für die Anforderungen an die Gewässerschutzgesetzgebung entwickelt. Sie ist robust und geeignet, um die erforderliche Geschiebefracht im Verhältnis zur Geschiebefracht im Referenzzustand zu ermitteln und wird für die Massnahmenplanung zur Sanierung des Geschiebehaushaltes nach Gewässerschutzgesetz empfohlen. Es sind zwei Varianten zur Anwendung geeignet:

1. Umfassende Variante (Vorgehen gemäss Kapitel 3)
2. Vereinfachte Variante (ohne hydraulische Berechnungen)

Mit der **umfassenden Variante** wird die erforderliche Geschiebefracht mithilfe von morphologischen Berechnungen bestimmt. Sie erlaubt eine zuverlässige und gewässerspezifische Abschätzung der erforderlichen Geschiebefracht. Die umfassende Variante wird für die Herleitung der erforderlichen Geschiebefracht von **grossen Gewässern** empfohlen.

Mit der **vereinfachten Variante** wird anhand der Gerinneform im Referenzzustand schnell und einfach abgeschätzt, wie gross die erforderliche Geschiebefracht relativ zur Referenzfracht ist. Dabei wird $GF_{\text{erf}}/GF_{\text{RZ}}$ auf 5% gerundet (Bild 27). Dementsprechend hat die erforderliche Geschiebefracht folgende Prozentwerte der Referenzfracht zu erreichen:

Verzweigte Gewässer mit mehr als 2 Gerinnen	80%
Verzweigte Gewässer mit 2 Gerinnen	75%
Gewundene Gewässer mit Inseln und Bänken	70%
Gewundene Gewässer mit Bänken	65%

Die Gerinneform im Referenzzustand wird mit Hilfe historischer Karten und Luftbildern oder bestehender naturnaher Gewässerabschnitte bestimmt. Die vereinfachte Variante wird für die Herleitung der erforderlichen Geschiebefracht von **kleinen Gewässern** empfohlen.

Beide Varianten sind anwendbar für Gefälle bis 3%.

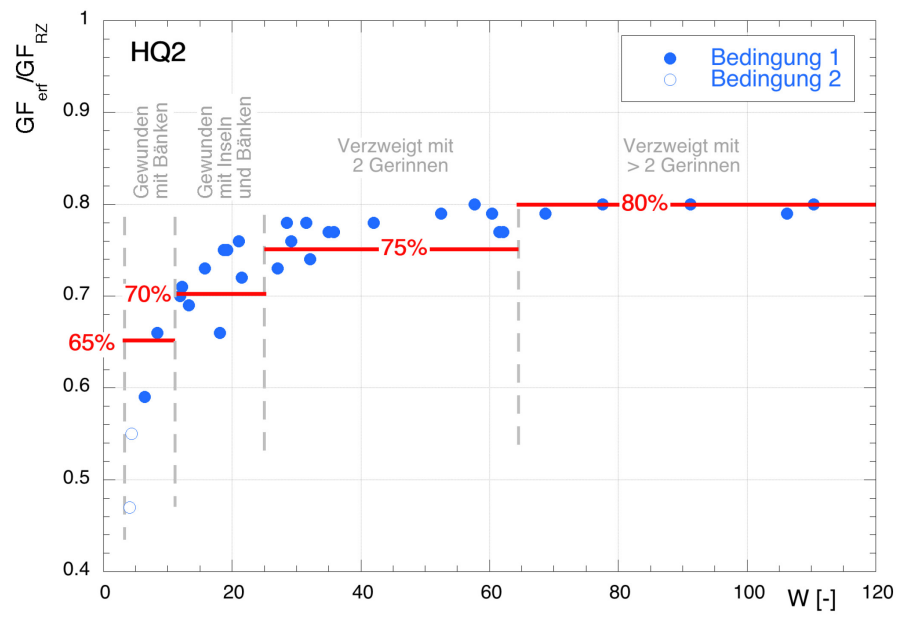


Bild 27 Vereinfachte Variante zur Bestimmung der erforderlichen Geschiebefracht in Abhängigkeit der Gerinneform.

6 Literatur

- Ahmari H. & da Silva A.M.F. (2011): Regions of bars, meandering and braiding in da Silva and Yalin's plan. *Journal of Hydraulic Research*, 49, 718-727.
- Anderson A.G., Parker G., Wood A. (1975): The flow and stability characteristics of alluvial channels. St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, 161, Minneapolis, Minnesota. Zitiert in Bezzola (2003)-
- Ashmore P.E. (2001): Braiding Phenomena: statics and kinetics. In: *Gravel-Bed River V* (Ed M.P. Mosley), pp.95-120. New Zealand Hydrological Society. Wellington New Zealand.
- Bezzola G.R. (2003): Vorlesungsmanuskript Flussbau. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Bunte K., Abt S.R., Swingle K.W., Cenderelli D.A. (2014): Effective discharge in Rocky Mountain headwater streams. *Journal of Hydrology*, 519, 2136-2147.
- da Silva A.M.A.F. (1991): Alternate bars and Related Alluvial Processes. Thesis of Master of Science, Queens University, 225 S.
- Flussbau AG & NDR Consulting GmbH (2013): Simme. Studie über den Geschiebehaushalt (2013). Im Auftrag des Tiefbauamts des Kantons Bern. Bern und Thun, 2013
- Flussbau AG (2014): Aare Bielersee – Rhein, Sanierungsplanung Geschiebehaushalt, Schlussbericht. Im Auftrag des Tiefbauamts des Kantons Bern, des Amtes für Umwelt des Kantons Solothurn und des Departements Bau, Verkehr und Umwelt des Kantons Aargau. Zürich, 2014
- Flussbau AG (2016): Sellenbodenbach, Neuenkirch. Sanierungs- und Aufwertungskonzept. Im Auftrag der Gemeinde Neuenkirch. Zürich, 2016.
- Flussbau AG (2017): Sanierung Geschiebehaushalt Schwarzwasser. Im Auftrag des Tiefbauamts des Kantons Bern. Bern, 2017.
- Flussbau AG (2018): Hochwasserschutz Alpenrhein, Internationale Strecke, km65 – km91, Generelles Projekt, Fachplanung Hydraulik und Geschiebe, Morphologie. Im Auftrag der Internationalen Rheinregulierung. Zürich, 2018.
- Hunzinger L., Schälchli U., Nitsche M., Kirchofer A., Roulier C., Rüesch T. (2020, in Anhörung): Geschiebehaushalt – Massnahmen. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Ikeda S., Parker G., Kimura Y. (1988). Stable Width and Depth of Straight Gravel Rivers with Heterogeneous Bed Materials. *Water Resources Research*, 24(5), 713-722.
- Jäggi M. (1983): Alternierende Kiesbänke. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 62, Zürich.
- KW Oberhasli AG (2017): Baumgartner Jan: Mailverkehr.
- Marti Ch. & Bezzola G.R. (2004): Sohlenmorphologie in Flussaufweitungen. Jahrestagung der SGMG 2003 in Erstfeld: Turbulenzen in der Geomorphologie. Mitteilung Nr. 184 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich. 173-188.
- Marti Ch. (2006): Morphologie von verzweigten Gerinnen. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Mitteilung Nr. 199.
- Millar R.G. (2005): Theoretical regime equations for mobile gravel bed rivers with stable banks. *Geomorphology*, 64, 207-220.
- Parker G. (1976): On the Cause and Characteristic Scales of Meandering and Braiding Rivers. *Journal of Fluid Mechanics*, 76, 457-480. Zitiert in Bezzola (2003).
- Parker G. (1979): Hydraulic Geometry of Active Gravel Rivers. *Journal of the Hydraulics Division*, HY9, pp 1185-1201.
- Schälchli, Abegg + Hunzinger (2000): Auenschutzpark Rohr-Rupperswil, Restwasserstrecke Kraftwerk Rupperswil – Auenstein. Ökologisch begründetes Dotierregime. Im Auftrag des Baudepartements des Kantons Aargau. Bern, 2000.

- VAW (1987): Aare-Erosion. Bericht über die Untersuchungen betreffend das Ausmass und den zeitlichen Ablauf der erwarteten Sohlenerosion in der Aarestrecke zwischen Büren und Solothurn. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Bericht Nr. 919.
- VAW (2017): Grundlagenversuche zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Geschiebefracht und Morphodynamik in Kiesflüssen. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Bericht Nr. 4348, Januar 2017.
- Wolman M.G. & Miller J.P. (1960). Magnitude and Frequency of Forces in Geomorphic Processes. The Journal of Geology 68(1): 54-74.
- Zarn B. (1997): Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität. Mitteilung Nr. 154 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.

7 Symbole

B	Breite	[m]
b	Ordinatenabschnitt	[-]
B^*	Breite, an $\bar{Q}$ normiert	[-]
BG	Gerinnebreite	[-]
BG_i	Gerinnebreite im Zustand i	[m]
BG_P	Gerinnebreite nach Parker	[m]
BG_{RZ}	Gerinnebreite im Referenzzustand	[m]
BG_{Ziel}	Gerinnebreite im Zielzustand	[m]
B_w	Wasserspiegelbreite	[m]
d_m	Mittlerer Korndurchmesser einer Mischung	[m]
d_x	Korndurchmesser, welcher von x Gewichtsprozenten der Körner einer Mischung unterschritten wird	[m]
GF	Geschiebefracht	[m ³ /a]
GF_i	Geschiebefracht im Zustand i	[m ³ /a]
GF_{RZ}	Geschiebefracht im Referenzzustand	[m ³ /a]
$\overline{GF}$	Geschiebefracht, an HQ_x normiert	[-]
h	Abflusstiefe	[m]
HQ_x	Hochwasserabfluss, der statistisch gesehen alle x Jahre einmal erreicht oder überschritten wird	[m ³ /s]
J	Gefälle	[-]
KF	Korrekturfaktor zur Berechnung der Gerinnebreite nach Parker	[-]
Q	Abfluss	[m ³ /s]
Q_0	Grenzabfluss für den Geschiebetransportbeginn	[m ³ /s]
Q_b	Geschiebetransportrate	[m ³ /s] oder [kg/s]
Q_D	Grenzabfluss für das Aufreissen der Deckschicht	[m ³ /s]
Q_x	Abfluss, der an x Tagen im Jahr erreicht oder überschritten wird	[m ³ /s]
$\bar{Q}$	Abfluss, an der Korngrösse im Gerinne normiert	[-]



2021

Die erforderliche Geschiebefracht

Fachbericht zum Modul «Geschiebehaushalt – Massnahmen» der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer

Anhang – Datensatz Beispielgewässer



Anhang 1

Die erforderliche Geschiebefracht

Beispielgewässer

Massgebender Abfluss HQ2

Naturnaher Zustand / Referenzzustand

Nr.	Gewässer	Ort	HQ2 [m³/s]	SM dm [m]	SM d90 [m]	Js [-]	BG Parker	BG nZ,nnZ [mmZ] / BG(P)	KF	GF mm²F(mmZ) / HQ2	Bs mmZ	Berechnung mit Rechteckgerinne			
												h(HQ2)	Bw(HQ2)	h/dm	Bw/h
1	Alpenrhein	Mastrils	780	0.100	0.270	0.0030	109	250	2.29	128.2	250.0	1.61	250.0	16.1	155.3
2	Alpenrhein	Kriessern km75	1300	0.032	0.080	0.0013	187	380	2.03	40.0	380.0	1.83	380.0	57.2	207.7
3	Alpenrhein	Rheineck	1300	0.026	0.065	0.0008	197	191	0.97	15.4	191.0	3.15	191.0	121.2	60.6
4	Aare	Grenchen	520	0.00040	0.450	0.00008	354	146	0.41	0	146.0	5.38	146.0	13450.0	27.1
5	Aare	Wynau	720	0.050	0.110	0.0010	124	93	0.75	13500	93.0	3.46	93.0	69.2	26.9
6	Aare	Aarau-Biberstein	830	0.075	0.160	0.0013	121	160	1.32	13000	15.7	2.57	160.0	34.3	62.3
7	Aare	Wildegg-Brugg	830	0.075	0.160	0.0013	121	200	1.66	7000	8.4	2.22	200.0	29.6	90.1
8	Aare	Klingnau	1520	0.065	0.150	0.0010	169	240	1.42	16000	10.5	3.08	240.0	47.4	77.9
9	Hinterrhein	Cazis	360	0.140	0.300	0.0060	68	500	7.35	60000	166.7	0.66	500.0	4.7	757.6
10	Ilfis	Kröschenbrunnen	105	0.085	0.200	0.0048	42	45	1.08	2000	19.0	1.17	45.0	13.8	38.5
11	Kleine Emme	Malters-Emmen	306	0.100	0.240	0.0050	68	189	2.77	15000	49.0	0.96	189.0	189.0	196.9
12	Limmat	Dietikon	410	0.054	0.120	0.0015	92	120	1.30	2800	6.8	1.87	120.0	34.6	64.2
13	Reuss	Rathausen-Perlen	480	0.050	0.110	0.0021	102	98	0.96	14000	29.2	2.08	98.0	41.6	47.1
14	Reuss	Perlen-Gisikon	480	0.050	0.110	0.0020	102	170	1.67	13000	27.1	1.52	170.0	30.4	111.8
15	Sihl	Adliswil	160	0.080	0.200	0.0038	52	51	0.98	3300	20.6	1.53	51.0	19.1	33.3
16	Sellenbodenbach	Neuenkirch	9	0.060	0.140	0.0060	13	7.5	0.56	30	3.3	0.77	7.5	12.8	9.7
17	Suhre	Triengen	14.2	0.025	0.070	0.0030	21	12	0.58	90	6.3	0.83	12.0	33.2	14.5
18	Wiese	Basel	103	0.031	0.087	0.0031	53	85	1.60	3000	29.1	0.79	85.0	25.5	107.6
19	Wigger	Altshofen	70	0.060	0.120	0.0050	37	45	1.21	1500	21.4	0.85	45.0	14.2	52.9
20	Brenno	Castro	141	0.140	0.580	0.0270	43	66	1.55	12500	88.7	1.04	66.0	7.4	63.5
21	Brenno	Marogno	177	0.165	0.420	0.0180	46	100	2.18	14000	79.1	0.91	100.0	5.5	109.9
22	Brenno	Loderio	259	0.065	0.144	0.0050	70	225	3.22	19000	73.4	0.85	225.0	13.1	264.7
23	Schwarzwasser	Heubach	25	0.100	0.310	0.0260	20	48	2.46	3200	128.0	0.46	48.0	4.6	104.3
24	Thur	Wattwil	175	0.080	0.180	0.0026	55	45	0.82	4000	22.9	1.85	45.0	23.1	24.3
25	Thur	Niederstetten	490	0.055	0.120	0.0024	100	180	1.80	12000	24.5	1.42	180.0	25.8	126.8
26	Thur	Bürglen	590	0.065	0.145	0.0020	106	170	1.61	18500	31.4	1.76	170.0	27.1	96.6
27	Thur	Frauenfeld	580	0.055	0.125	0.0017	109	250	2.29	18500	31.9	1.43	250.0	26.0	174.8
28	Thur	Niederneunforn	570	0.050	0.120	0.0016	111	175	1.58	20000	35.1	1.78	175.0	35.6	98.3
29	Töss	Kollbrunn	77	0.050	0.100	0.0066	41	110	2.70	2600	33.8	0.48	110.0	9.6	229.2
30	Töss	Leisental	89	0.045	0.090	0.0059	45	100	2.23	2800	31.5	0.55	100.0	12.2	181.8
31	Töss	Dättlikon	115	0.040	0.080	0.0033	53	120	2.28	2800	24.3	0.67	120.0	16.8	179.1
32	Simme	Niedermettlisa	87	0.055	0.133	0.0083	42	52	1.23	12300	141.4	0.78	52.0	14.2	66.7
33	Gadmerwasser	Chaleneegg	25	0.076	0.165	0.0180	21	21	1.01	4300	172.0	0.58	21.0	7.6	36.2

- 5
- 4
- 3
- 2
- 1
- Verzweigte Gewässer mit mehr als 2 Gerinnen
- Verzweigte Gewässer mit 2 Gerinnen
- Gewundene Gerinne mit Inseln und Bänken
- Gewundene Gerinne mit Bänken
- Mäander ohne Kiesbänke

Anhang 1

Die erforderliche Geschiebefracht

Beispielgewässer

Massgebender Abfluss HQ2

GF=0

KF																
Berechnung mit Rechteckgerinne																
Nr.	Gewässer	Ort	HQ2 [m3/s]	SM d50 [m]	SM d90 [m]	Js [-]	BG Parker	BG nZ,mnZ	BG(GF=0)/BG(P)	GF mnZ	GF(mnZ) / HQ5	BG GF=0	h(HQ5)	Bw(HQ5)	h/dm	Bw/h
1	Alpenrhein	Mastrils	780	0.100	0.270	0.0030	109	250	0.45	0	0.0	49.0	4.45	49.0	44.5	11.0
2	Alpenrhein	Kriessern km75	1300	0.032	0.080	0.0013	187	380	0.45	0	0.0	84.2	4.80	84.2	150.0	17.5
3	Alpenrhein	Rheineck	1300	0.026	0.065	0.0008	197	191	0.45	0	0.0	88.6	5.32	88.6	204.6	16.7
4	Aare	Grenchen	520	0.00040	0.450	0.00008	354	146	0.45	0	0.0	159.2	5.09	159.2	12725.0	31.3
5	Aare	Wynau	720	0.050	0.110	0.0010	124	93	0.45	0	0.0	56.0	5.02	56.0	100.4	11.2
6	Aare	Aarau-Biberstein	830	0.075	0.160	0.0013	121	160	0.45	0	0.0	54.3	5.37	54.3	71.6	10.1
7	Aare	Wildegg-Brugg	830	0.075	0.160	0.0013	121	200	0.45	0	0.0	54.3	5.37	54.3	71.6	10.1
8	Aare	Klingnau	1520	0.065	0.150	0.0010	169	240	0.45	0	0.0	76.2	6.67	76.2	102.6	11.4
9	Hinterrhein	Cazis	360	0.140	0.300	0.0060	68	500	0.45	0	0.0	30.6	3.11	30.6	22.2	9.8
10	Ilfis	Kröschenbrunnen	105	0.085	0.200	0.0048	42	45	0.45	0	0.0	18.7	2.10	18.7	24.7	8.9
11	Kleine Emme	Malters-Emmen	306	0.100	0.240	0.0050	68	189	0.45	0	0.0	30.7	2.89	30.7	28.9	10.6
12	Limmat	Dietikon	410	0.054	0.120	0.0015	92	120	0.45	0	0.0	41.5	3.84	41.5	71.1	10.8
13	Reuss	Rathausen-Perlen	480	0.050	0.110	0.0021	102	98	0.45	0	0.0	45.7	3.50	45.7	70.0	13.1
14	Reuss	Perlen-Gisikon	480	0.050	0.110	0.0020	102	170	0.45	0	0.0	45.7	3.59	45.7	71.8	12.7
15	Sihl	Adliswil	160	0.080	0.200	0.0038	52	51	0.45	0	0.0	23.5	2.68	23.5	33.5	8.8
16	Sellenbodenbach	Neuenkirch	9	0.060	0.140	0.0060	13	7.5	0.45	0	0.0	6.0	0.98	6.0	16.3	6.1
17	Suhre	Triengen	14.2	0.025	0.070	0.0030	21	12	0.45	0	0.0	9.4	1.02	9.4	40.8	9.2
18	Wiese	Basel	103	0.031	0.087	0.0031	53	85	0.45	0	0.0	23.9	1.8	23.9	58.1	13.3
19	Wigger	Altshofen	70	0.060	0.120	0.0050	37	45	0.45	0	0.0	16.7	1.65	16.7	27.5	10.1
20	Brenno	Castro	141	0.140	0.580	0.0270	43	66	0.45	0	0.0	19.2	1.89	19.2	13.5	10.1
21	Brenno	Marogno	177	0.165	0.420	0.0180	46	100	0.45	0	0.0	20.6	2.05	20.6	12.4	10.1
22	Brenno	Loderio	259	0.065	0.144	0.0050	70	225	0.45	0	0.0	31.5	2.62	31.5	40.3	12.0
23	Schwarzwasser	km14.64	25	0.100	0.310	0.0260	20	48	0.45	0	0.0	8.8	1.02	8.8	10.2	8.6
24	Thur	Wattwil	175	0.080	0.200	0.0026	55	45	0.45	0	0.0	24.6	2.87	24.6	35.9	8.6
25	Thur	Niederstetten	490	0.055	0.120	0.0024	100	180	0.45	0	0.0	45.1	3.46	45.1	62.9	13.0
26	Thur	Bürglen	590	0.065	0.145	0.0020	106	170	0.45	0	0.0	47.5	4.06	47.5	62.5	11.7
27	Thur	Frauenfeld	580	0.055	0.125	0.0017	109	250	0.45	0	0.0	49.1	4.08	49.1	74.2	12.0
28	Thur	Niederneunforn	570	0.050	0.120	0.0016	111	175	0.45	0	0.0	49.8	4.05	49.8	81.0	12.3
29	Töss	Kollbrunn	77	0.050	0.100	0.0660	41	110	0.45	0	0.0	18.3	1.46	18.3	29.2	12.5
30	Töss	Leisental	89	0.045	0.090	0.0059	45	100	0.45	0	0.0	20.2	1.51	20.2	33.6	13.4
31	Töss	Dättlikon	115	0.040	0.080	0.0033	53	120	0.45	0	0.0	23.7	1.89	23.7	47.3	12.5
32	Simme	Niedermettlisau	87	0.055	0.133	0.0083	42	52	0.45	0	0.0	19.0	1.47	19.0	26.7	12.9
33	Gadmerwasser	Chaleneegg	25	0.076	0.165	0.0180	21	21	0.45	0	0.0	9.4	0.92	9.4	12.1	10.2

Anhang 1

Die erforderliche Geschiebefracht

Beispielgewässer

Massgebender Abfluss HQ5

Naturnaher Zustand / Referenzzustand

Nr.	Gewässer	Ort	HQ5 [m³/s]	SM dm [m]	SM d90 [m]	Js [-]	BG Parker	BG nZ,nmZ [nmZ] / BG(P)	GF nm² F(nmZ) / HQ5	Bs nmZ	Berechnung mit Rechteckgerinne				
											h(HQ5)	Bw(HQ5)	h/dm	Bw/h	
1	Alpenrhein	Mastrils	1000	0.100	0.270	0.0030	123	250	2.03	100000	250.0	1.85	250.0	18.5	135.1
2	Alpenrhein	Kriessern km75	1700	0.032	0.080	0.0013	214	380	1.78	52000	380.0	2.1	380.0	65.6	181.0
3	Alpenrhein	Rheineck	1700	0.026	0.065	0.0008	225	191	0.85	20000	191.0	3.72	191.0	143.1	51.3
4	Aare	Grenchen	600	0.00040	0.450	0.00008	380	146	0.38	0	146.0	5.85	146.0	14625.0	25.0
5	Aare	Wynau	860	0.050	0.110	0.0010	136	93	0.68	13500	93.0	3.86	93.0	77.2	24.1
6	Aare	Aarau-Biberstein	1000	0.075	0.160	0.0013	133	160	1.21	13000	160.0	2.86	160.0	38.1	55.9
7	Aare	Wildegg-Brugg	1000	0.075	0.160	0.0013	133	200	1.51	7000	200.0	2.49	200.0	33.2	80.3
8	Aare	Klingnau	1800	0.065	0.150	0.0010	184	240	1.30	16000	240.0	3.41	240.0	52.5	70.4
9	Hinterrhein	Cazis	500	0.140	0.300	0.0060	80	500	6.24	60000	500.0	0.77	500.0	5.5	649.4
10	Ilfis	Kröschenbrunnen	125	0.085	0.200	0.0048	45	45	0.99	2000	45.0	1.29	45.0	15.2	34.9
11	Kleine Emme	Malters-Emmen	400	0.100	0.240	0.0050	78	189	2.42	15000	37.5	1.12	189.0	11.2	168.8
12	Limmat	Dietikon	500	0.054	0.120	0.0015	102	120	1.18	2800	5.6	2.1	120.0	38.9	57.1
13	Reuss	Rathausen-Perlen	560	0.050	0.110	0.0021	110	98	0.89	14000	25.0	2.28	98.0	45.6	43.0
14	Reuss	Perlen-Gisikon	560	0.050	0.110	0.0020	110	170	1.55	13000	23.2	1.66	170.0	33.2	102.4
15	Sihl	Adliswil	220	0.080	0.200	0.0038	61	51	0.83	3300	15.0	1.88	51.0	23.5	27.1
16	Sellenbodenbach	Neuenkirch	14	0.060	0.140	0.0060	17	7.5	0.45	30	2.1	1.03	7.5	17.2	7.3
17	Suhre	Triengen	19.7	0.025	0.070	0.0030	24	12	0.49	130	6.6	1.02	12.0	40.8	11.8
18	Wiese	Basel	142	0.031	0.087	0.0031	62	85	1.36	3000	21.1	0.96	85.0	31.0	88.5
19	Wigger	Altshofen	95	0.060	0.120	0.0050	43	45	1.04	1500	15.8	1.01	45.0	16.8	44.6
20	Brenno	Castro	200	0.140	0.580	0.0270	51	66	1.30	12500	62.5	1.22	66.0	8.7	54.1
21	Brenno	Marogno	251	0.165	0.420	0.0180	55	100	1.83	14000	55.8	1.08	100.0	6.5	92.6
22	Brenno	Loderio	368	0.065	0.144	0.0050	83	225	2.70	19000	51.6	1.02	225.0	15.7	220.6
23	Schwarzwasser	Heubach	34	0.100	0.310	0.0260	23	48	2.11	3200	94.1	0.52	48.0	5.2	92.3
24	Thur	Wattwil	230	0.080	0.180	0.0026	63	45	0.72	4000	17.4	2.19	45.0	27.4	20.5
25	Thur	Niederstetten	640	0.055	0.120	0.0024	115	180	1.57	12000	18.8	1.65	180.0	30.0	109.1
26	Thur	Bürglen	750	0.065	0.145	0.0020	119	170	1.43	18500	24.7	2.03	170.0	31.2	83.7
27	Thur	Frauenfeld	750	0.055	0.125	0.0017	124	250	2.02	18500	24.7	1.66	250.0	30.2	150.6
28	Thur	Niederneunforn	750	0.050	0.120	0.0016	127	175	1.38	20000	26.7	2.08	175.0	41.6	84.1
29	Töss	Kollbrunn	96	0.050	0.100	0.0066	45	110	2.42	2600	27.1	0.54	110.0	10.8	203.7
30	Töss	Leisental	118	0.045	0.090	0.0059	52	100	1.93	2800	23.7	0.65	100.0	14.4	153.8
31	Töss	Dättlikon	160	0.040	0.080	0.0033	62	120	1.93	2800	17.5	0.81	120.0	20.3	148.1
32	Simme	Niedermettlisau	122	0.055	0.133	0.0083	50	52	1.04	12300	100.8	0.94	52.0	17.1	55.3
33	Gadmerwasser	Chaleneegg	37	0.076	0.165	0.0180	25	21	0.83	4300	21.0	0.72	21.0	9.5	29.2

- 5 Verzweigte Gewässer mit mehr als 2 Gerinnen
- 4 Verzweigte Gewässer mit 2 Gerinnen
- 3 Gewundene Gerinne mit Inseln und Bänken
- 2 Gewundene Gerinne mit Bänken
- 1 Mäander ohne Kiesbänke

Anhang 1

Die erforderliche Geschiebefracht

Beispielgewässer

Massgebender Abfluss HQ5

GF=0

Kf															Berechnung mit Rechteckgerinne				
Nr.	Gewässer	Ort	HQ5 [m3/s]	SM d50 [m]	SM d90 [m]	Js [-]	BG Parker	BG nZ,nmZ [nmZ] / BG(P)	GF nmZF(nmZ) / HQ5	Bs nmZ	h(HQ5)	Bw(HQ5)	h/dm	Bw/h					
1	Alpenrhein	Mastrils	1000	0.100	0.270	0.0030	123	0.40	0.0	49.3	5.21	49.3	52.1	9.5					
2	Alpenrhein	Kriessern km	1700	0.032	0.080	0.0013	214	0.40	0.0	85.5	5.64	85.5	176.3	15.2					
3	Alpenrhein	Rheinneck	1700	0.026	0.065	0.0008	225	0.40	0.0	90.1	6.29	90.1	241.9	14.3					
4	Aare	Grenchen	600	0.00040	0.450	0.00008	380	0.40	0.0	152.0	3.95	152.0	9875.0	38.5					
5	Aare	Wynau	860	0.050	0.110	0.0010	136	0.40	0.0	54.4	5.83	54.4	116.6	9.3					
6	Aare	Aarau-Bibers	1000	0.075	0.160	0.0013	133	0.40	0.0	53.0	6.23	53.0	83.1	8.5					
7	Aare	Wildegg-Brug	1000	0.075	0.160	0.0013	133	0.40	0.0	53.0	6.23	53.0	83.1	8.5					
8	Aare	Klingnau	1800	0.065	0.150	0.0010	184	0.40	0.0	73.7	7.7	73.7	118.5	9.6					
9	Hinterrhein	Cazis	500	0.140	0.300	0.0060	80	0.40	0.0	32.1	3.72	32.1	26.6	8.6					
10	Ilfis	Kröschenbrun	125	0.085	0.200	0.0048	45	0.40	0.0	18.2	2.41	18.2	28.4	7.5					
11	Kleine Emme	Malters-Emm	400	0.100	0.240	0.0050	78	0.40	0.0	31.2	3.4	31.2	34.0	9.2					
12	Limmat	Dietikon	500	0.054	0.120	0.0015	102	0.40	0.0	40.7	4.5	40.7	83.3	9.0					
13	Reuss	Rathausen-Pf	560	0.050	0.110	0.0021	110	0.40	0.0	43.9	4.02	43.9	80.4	10.9					
14	Reuss	Perlen-Gisik	560	0.050	0.110	0.0020	110	0.40	0.0	43.9	4.12	43.9	82.4	10.7					
15	Sihl	Adliswil	220	0.080	0.200	0.0038	61	0.40	0.0	24.5	3.22	24.5	40.3	7.6					
16	Sellenboden	Neuenkirch	14	0.060	0.140	0.0060	17	0.40	0.0	6.6	1.17	6.6	19.5	5.7					
17	Suhre	Triengen	19.7	0.025	0.070	0.0030	24	0.40	0.0	9.8	1.23	9.8	49.2	8.0					
18	Wiese	Basel	142	0.031	0.087	0.0031	62	0.40	0.0	24.9	2.16	24.9	69.7	11.5					
19	Wigger	Altshofen	95	0.060	0.120	0.0050	43	0.40	0.0	17.3	1.95	17.3	32.5	8.9					
20	Brenno	Castro	200	0.140	0.580	0.0270	51	0.40	0.0	20.3	2.19	20.3	15.6	9.3					
21	Brenno	Marogno	251	0.165	0.420	0.0180	55	0.40	0.0	21.8	2.42	21.8	14.7	9.0					
22	Brenno	Loderio	368	0.065	0.144	0.0050	83	0.40	0.0	33.3	3.14	33.3	48.3	10.6					
23	Schwarzwass	km14.64	34	0.100	0.310	0.0260	23	0.40	0.0	9.1	1.18	9.1	11.8	7.7					
24	Thur	Wattwil	230	0.080	0.200	0.0026	63	0.40	0.0	25.0	3.42	25.0	42.8	7.3					
25	Thur	Niederstette	640	0.055	0.120	0.0024	115	0.40	0.0	45.8	4.14	45.8	75.3	11.1					
26	Thur	Bürglen	750	0.065	0.145	0.0020	119	0.40	0.0	47.6	4.79	47.6	73.7	9.9					
27	Thur	Frauenfeld	750	0.055	0.125	0.0017	124	0.40	0.0	49.6	4.82	49.6	87.6	10.3					
28	Thur	Niederneunf	750	0.050	0.120	0.0016	127	0.40	0.0	50.8	4.8	50.8	96.0	10.6					
29	Töss	Kollbrunn	96	0.050	0.100	0.0660	45	0.40	0.0	18.2	1.69	18.2	33.8	10.8					
30	Töss	Leisental	118	0.045	0.090	0.0059	52	0.40	0.0	20.7	1.79	20.7	39.8	11.6					
31	Töss	Dättlikon	160	0.040	0.080	0.0033	62	0.40	0.0	24.8	2.28	24.8	57.0	10.9					
32	Simme	Niedermettli	122	0.055	0.133	0.0083	50	0.40	0.0	20.0	1.75	20.0	31.8	11.4					
33	Gadnerwass	Chaleneegg	37	0.076	0.165	0.0180	25	0.40	0.0	10.2	1.1	10.2	14.5	9.2					

Anhang 2

Dokumentation Beispielgewässer

Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 780 m ³ /s	HQ ₅ : 1000 m ³ /s
Quelle:	BAFU, Abflussmessstation Rhein, Domat-Ems	

Gefälle	J: 0.0030
Quelle:	Querprofile

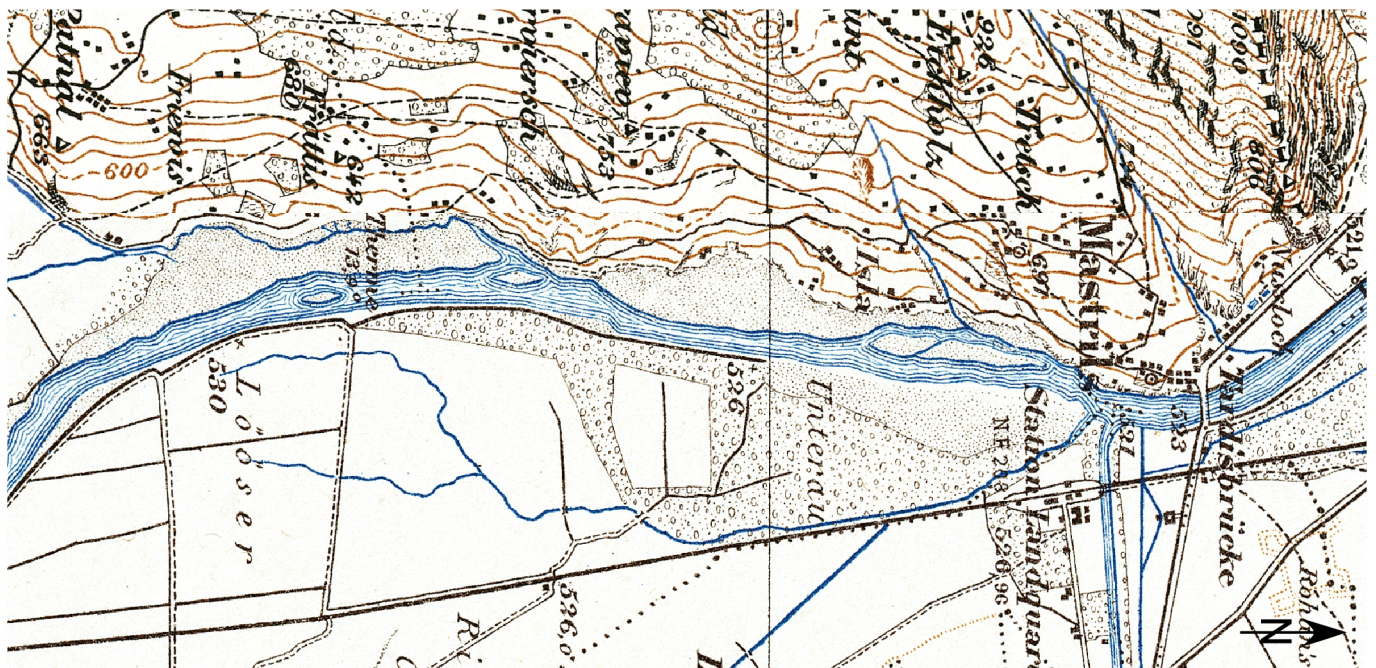
Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.270 m	d _m : 0.100 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: ca. 100'000 m ³ /a
Quelle:	Flussbau AG

Gerinneform:	④ Verzweigtes Gewässer mit 2 Gerinnen
--------------	---------------------------------------

Historische Darstellungen

1. Siegfriedkarte:	Jahr: 1882 (Blatt 415, Zizers)	Massstab: 1:25'000
--------------------	--------------------------------	--------------------



Luftbilder

2. Jahr: 2015

Massstab: 1:25'000



Hochwasserabflüsse Quelle:	HQ ₂ : 1300 m ³ /s BAFU, Abflussmessstation Rhein, Diepoldsau, Rietbrücke	HQ ₅ : 1700 m ³ /s
Gefälle Quelle:	J: 0.0013 Querprofile	
Sohlenmaterial Quelle:	d ₉₀ : 0.080 m Flussbau AG	d _m : 0.032 m
Geschiebefracht Quelle:	im naturnahen Zustand: ca. 52'000 m ³ /a Flussbau AG	
Gerinneform:	④ Verzweigtes Gewässer mit 2 Gerinnen	

Historische Darstellungen

1. Römerkarte: Jahr: 1769 Massstab: 1:40'000





Hochwasserabflüsse Quelle:	HQ ₂ : 1300 m ³ /s BAFU, Abflussmessstation Rhein, Diepoldsau, Rietbrücke	HQ ₅ : 1700 m ³ /s
Gefälle Quelle:	J: 0.0008 Angenähert aus Lauflänge	
Sohlenmaterial Quelle:	d ₉₀ : 0.065 m Flussbau AG	d _m : 0.026 m
Geschiebefracht Quelle:	im naturnahen Zustand: ca. 20'000 m ³ /a Flussbau AG	
Gerinneform:	Übergang gewundenes Gerinne mit Inseln und Bänken ③ zu gewundenem Gerinne mit Bänken ②	

Historische Darstellungen

1. Römerkarte: Jahr: 1769 Massstab: 1:40'000



2. Duile- Karte

Jahr: 1825

Massstab: 1:40'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 520 m ³ /s	HQ ₅ : 600 m ³ /s
Quelle:	BAFU, Abflussmessstation Aare, Brügg, Ägerten	

Gefälle	J: 0.00008
Quelle:	Bericht VAW: Aare-Erosion

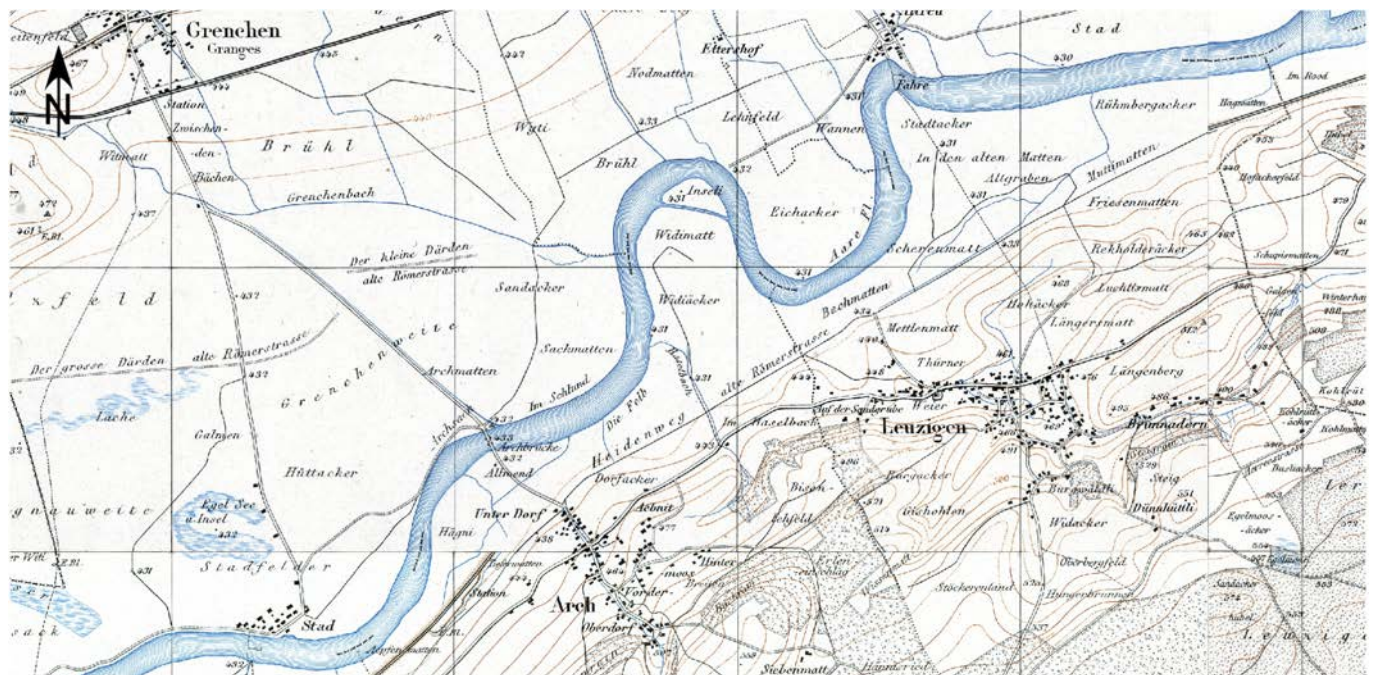
Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.4500 m	d _m : 0.0004 m
Quelle:	Bericht VAW: Aare-Erosion	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 0 m ³ /a
Quelle:	Flussbau AG

Gerinneform:	① Mäander ohne Kiesbänke
--------------	--------------------------

Historische Darstellungen

1. Siegfriedkarte Jahr: 1875 (Blatt 123, Grenchen) Massstab: 1:40'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 720 m ³ /s	HQ ₅ : 860 m ³ /s
Quelle:	BAFU, Abflussmessstation Aare, Murgenthal	

Gefälle	J: 0.0010
Quelle:	Bafu Querprofile

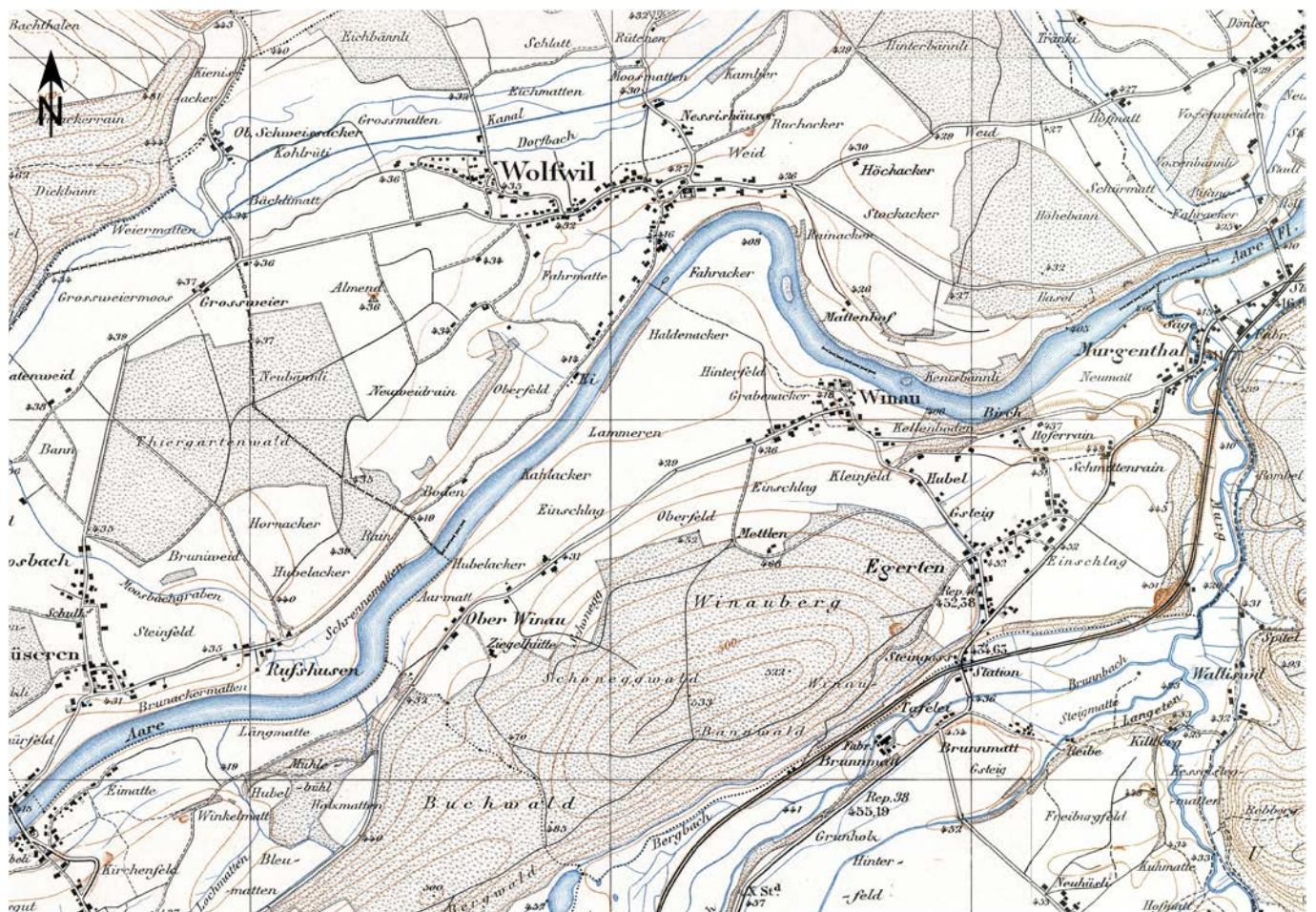
Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.110 m	d _m : 0.050 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 13'500 m ³ /a
Quelle:	Flussbau AG

Gerinneform:	② Gewundenes Gerinne mit Bänken
--------------	---------------------------------

Historische Darstellungen

1. Siegfriedkarte Jahr: 1884 (Blatt 164, Aarwangen) Massstab: 1:30'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 830 m ³ /s	HQ ₅ : 1000 m ³ /s
Quelle:	BAFU, Abflussmessstation Aare, Brugg	

Gefälle	J: 0.0013
Quelle:	Karten, Querprofile (mittleres Gefälle Aarau – Wildegg)

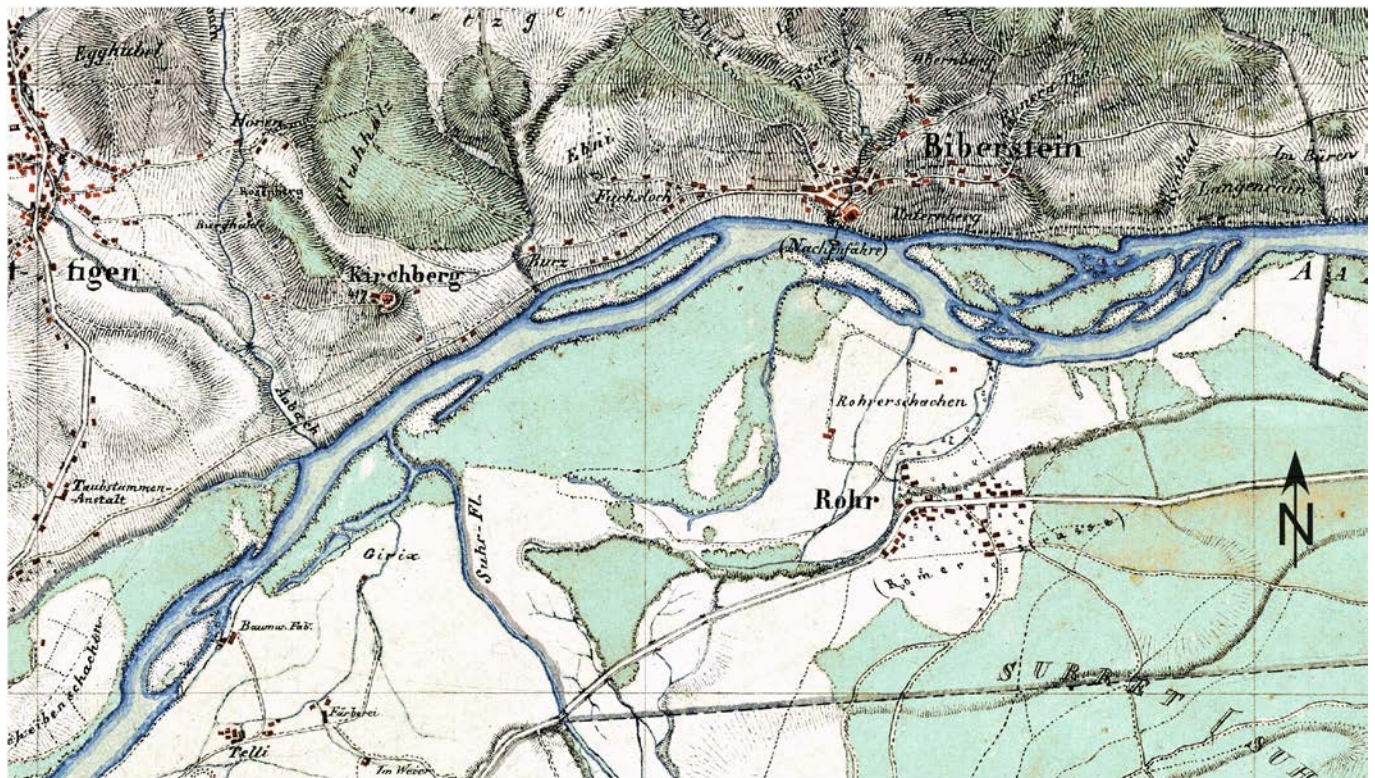
Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.160 m	d _m : 0.075 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 13'000 m ³ /a	
Quelle:	Flussbau AG	

Gerinneform:	③ Gewundenes Gerinne mit Inseln und Bänken
--------------	--

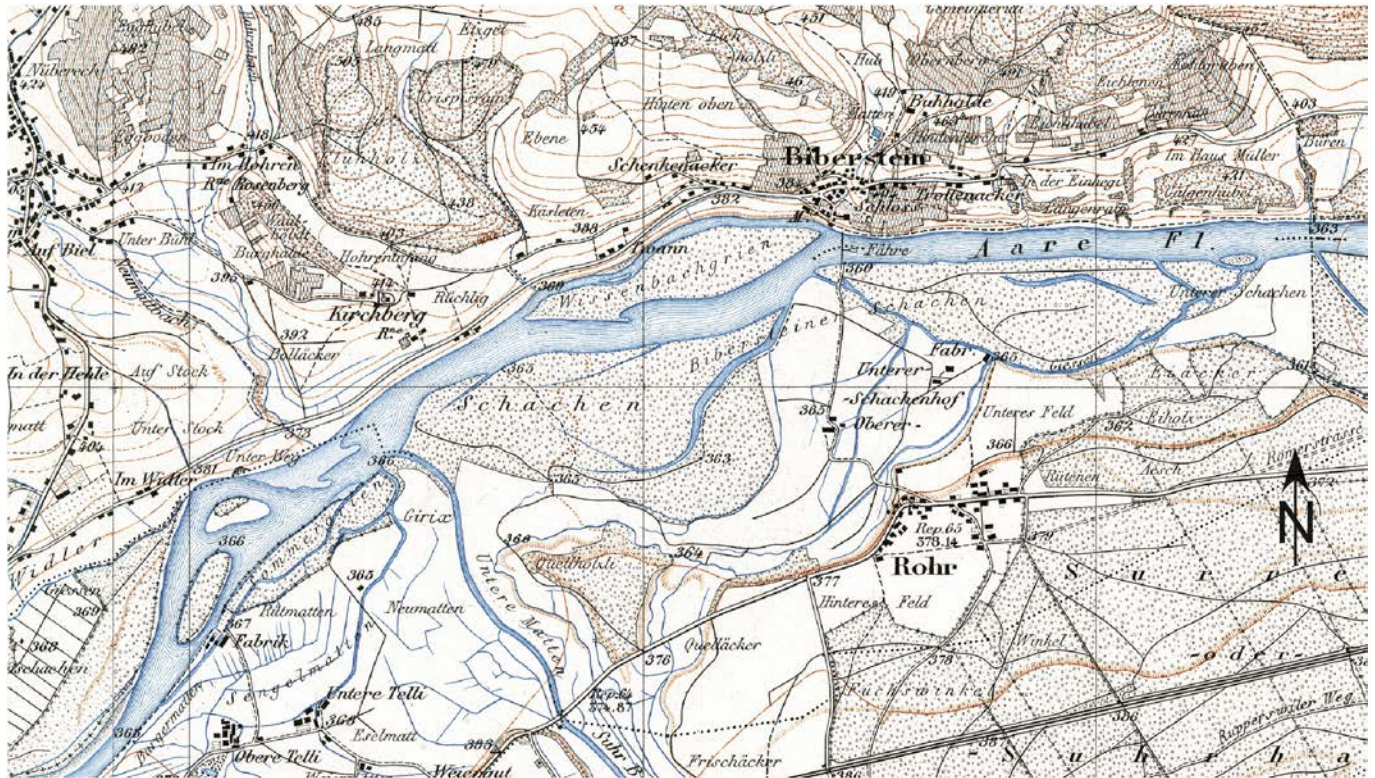
Historische Darstellungen

1. Michaeliskarte:	Jahr: 1837-1843	Massstab: 1:25'000
--------------------	-----------------	--------------------



2. Siegfriedkarte

Jahr: 1878 (Blatt 151, Ruppertswil) Massstab: 1:25'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 830 m ³ /s (red: 460m ³ /s)	HQ ₅ : 1000 m ³ /s (red: 650 m ³ /s)
Quelle:	BAFU, Abflussmessstation Aare, Brugg	

Gefälle	J: 0.0013
Quelle:	Querprofile

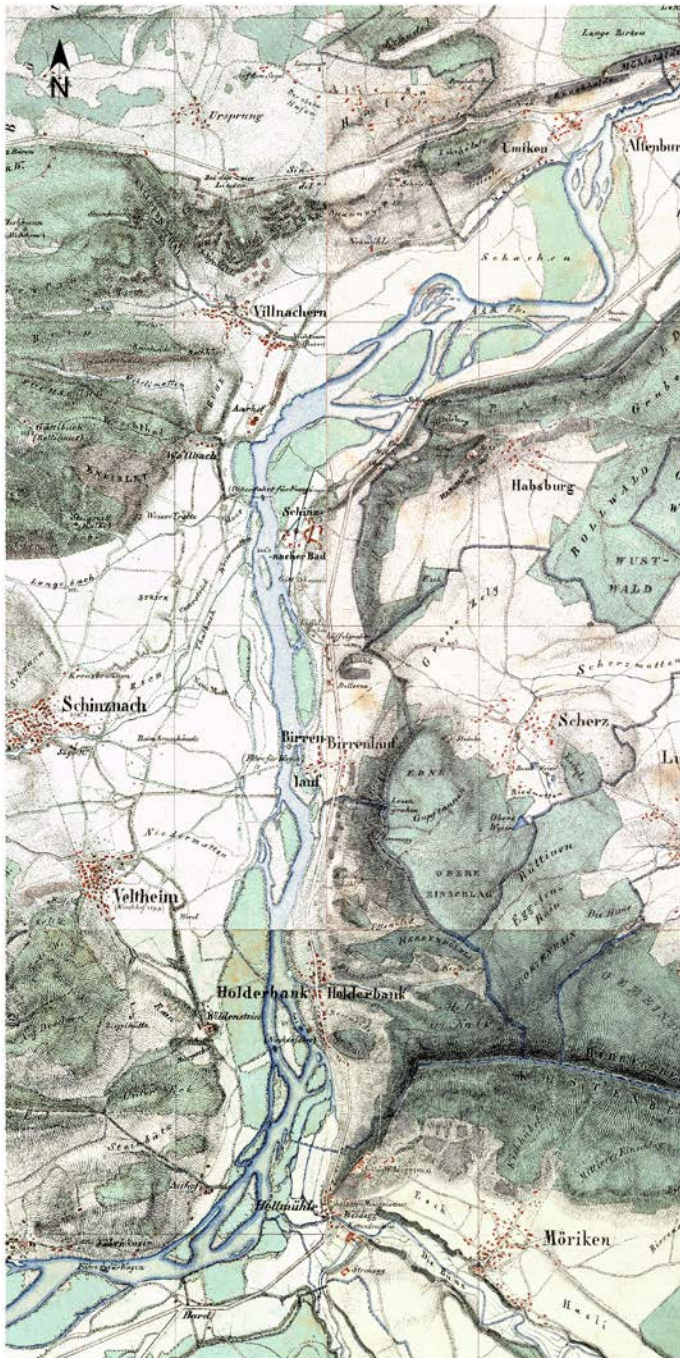
Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.160 m	d _m : 0.075 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 13'000 m ³ /a
Quelle:	Flussbau AG

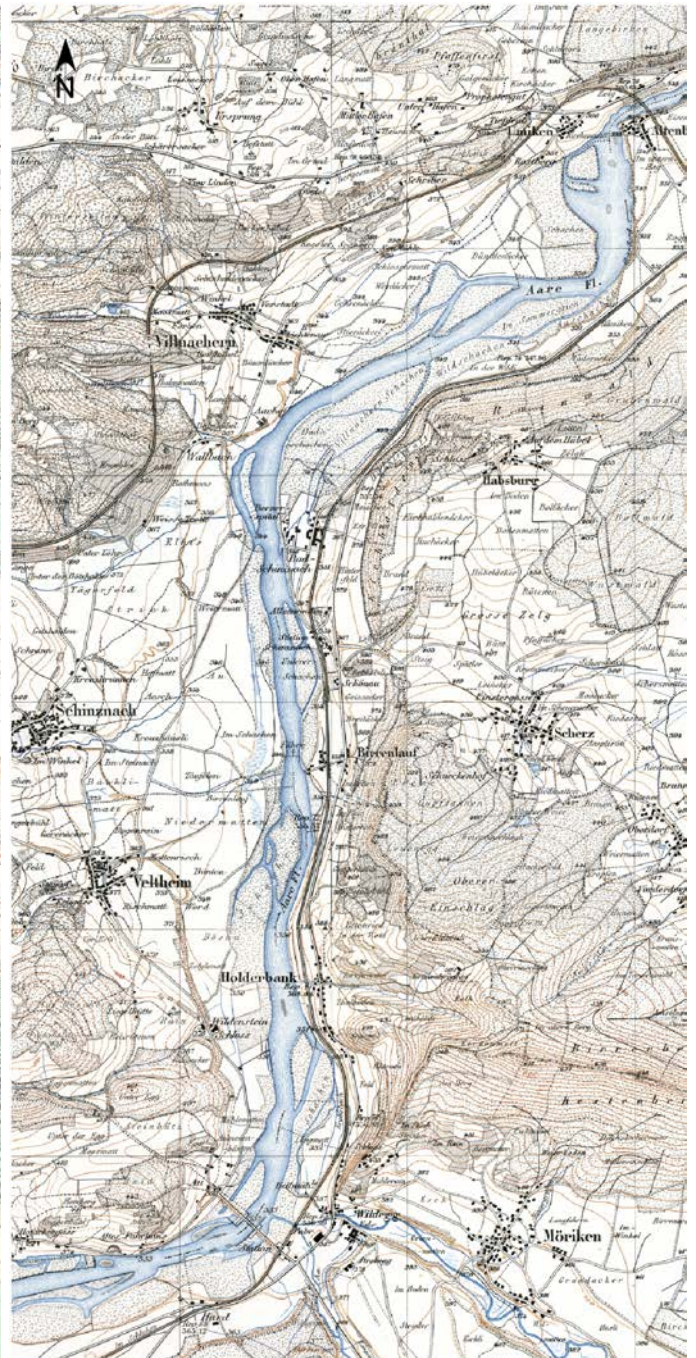
Gerinneform:	
Naturnaher Zustand	③ Gewundenes Gerinne mit Inseln und Bänken
Reduzierter Abfluss (1961)	② Gewundenes Gerinne mit Bänken
Zustand 2012	② Gewundenes Gerinne mit Bänken

Historische Darstellungen (nächste Seite)

1. Michaeliskarte:
Jahr: 1837- 1843
Massstab: 1:50'000



2. Siegfriedkarte:
Jahr: 1878 (Blatt 038, Brugg/ Blatt 151 Rapperswil)- 1882 (Blatt 053, Veltheim)
Massstab: 1:50'000



Luftbilder

3. Jahr: 1961

Massstab: 1:10'000



4. Jahr: 1969

Massstab: 1:10'000



5. Jahr: 2012

Massstab: 1:10'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 1'520 m ³ /s	HQ ₅ : 1800 m ³ /s
Quelle:	BAFU, Abflussmessstation Aare, Untersiggenthal Stilli	

Gefälle	J: 0.0010
Quelle:	BAFU -Querprofile

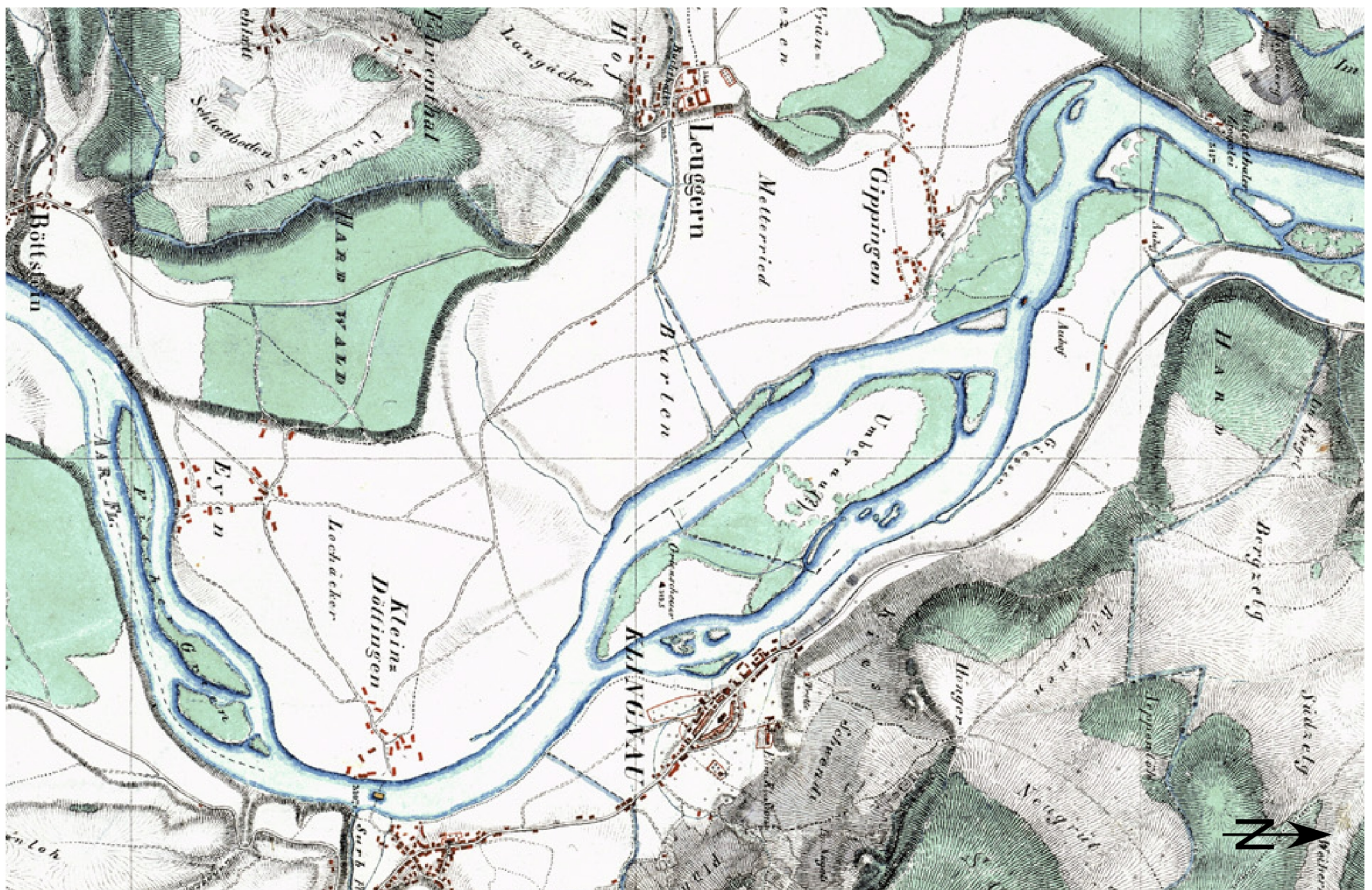
Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.150 m	d _m : 0.065m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 16'000 m ³ /a	
Quelle:	Flussbau AG	

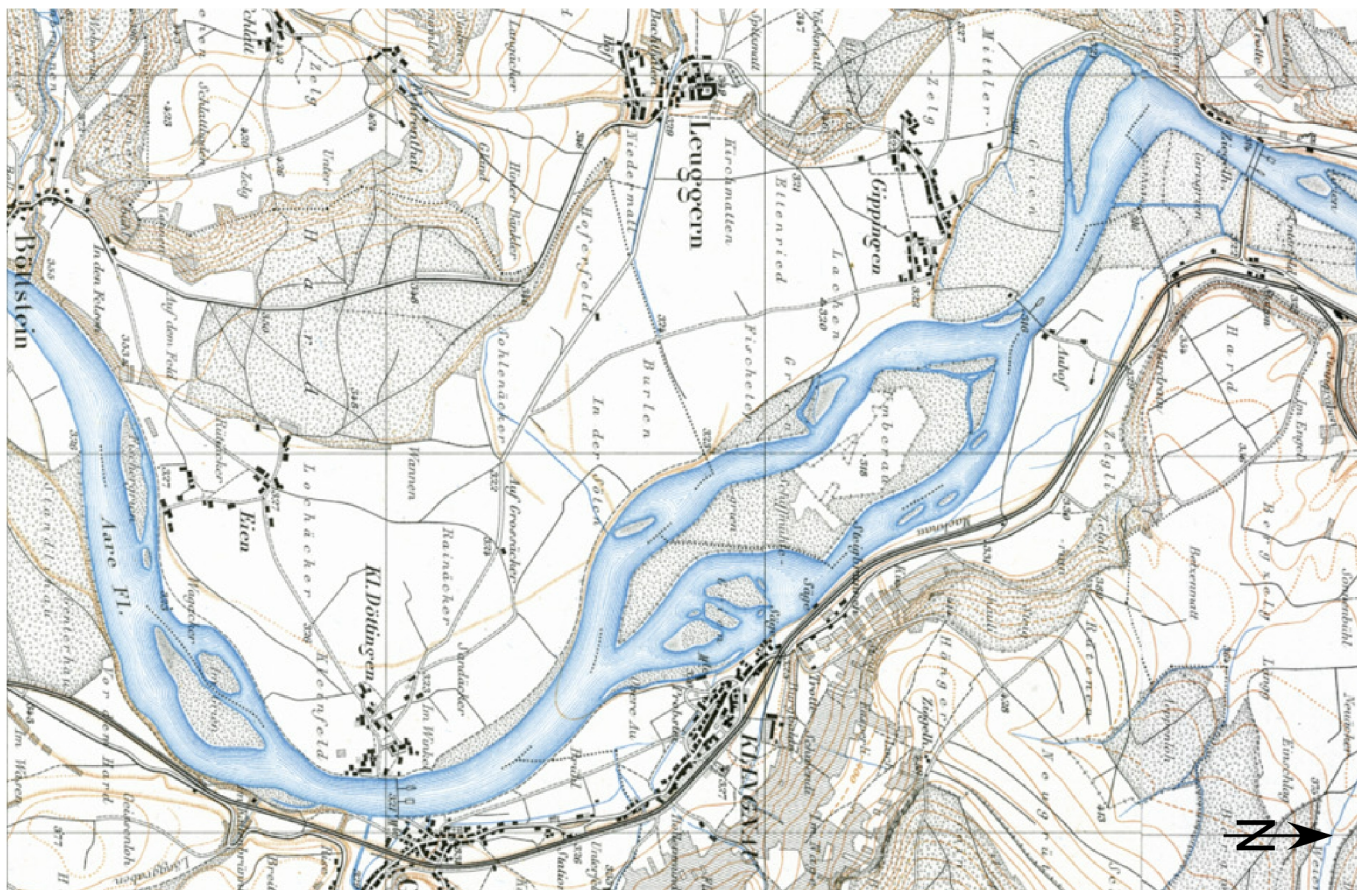
Gerinneform:	③ Gewundenes Gerinne mit Inseln und Bänken
--------------	--

Historische Darstellungen

1. Michaeliskarte:	Jahr: 1837- 1843	Massstab: 1:30'000
--------------------	------------------	--------------------



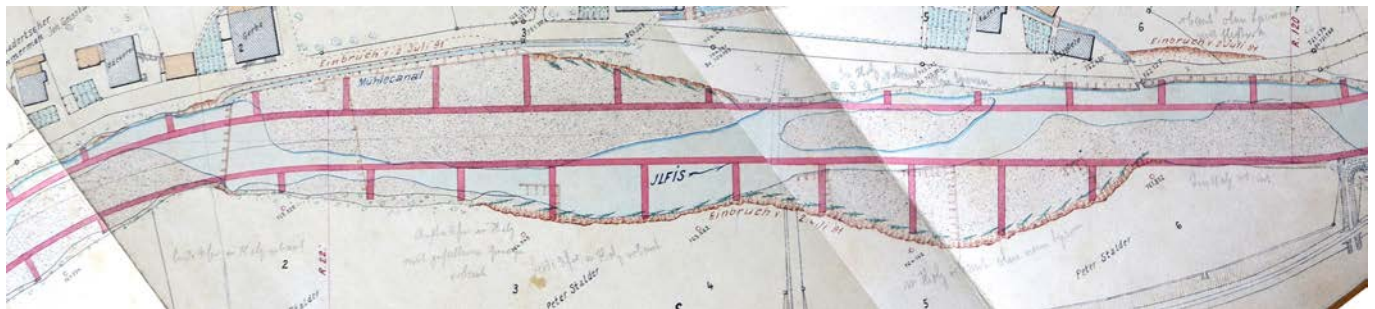
2. Siegfriedkarte: Jahr: 1882 (Blatt 022, Klingnau) Massstab: 1:30'000



Hochwasserabflüsse Quelle:	HQ ₂ : 105 m ³ /s Gewässerraum Wigger, Luthern, Suhre, Ilfis (Bericht Flussbau AG, 2013) Im Auftrag des Kt. Luzern	HQ ₅ : 125 m ³ /s
Gefälle	J: 0.0048 Mittleres Gefälle LK 1:25'000	
Sohlenmaterial Quelle:	d ₉₀ : 0.200 m Flussbau AG	d _m : 0.085 m
Geschiebefracht Quelle:	im naturnahen Zustand: 2'000 m ³ /a Flussbau AG	
Gerinneform:	③ Gewundenes Gerinne mit Inseln und Bänken	

Historische Darstellungen

1. Projektplan Jahr: 1891/92 Massstab: 1:2'500



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 306 m ³ /s	HQ ₅ : 400 m ³ /s
Quelle:	BAFU, Abflussmessstation Kleine Emme, Emmen	

Gefälle	J: 0.0050
Quelle:	LK 1:25'000

Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.240 m	d _m : 0.100 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 15'000 m ³ /a
Quelle:	Flussbau AG

Gerinneform:	⑤ Verzweigtes Gewässer mit mehr als 2 Gerinnen
--------------	--

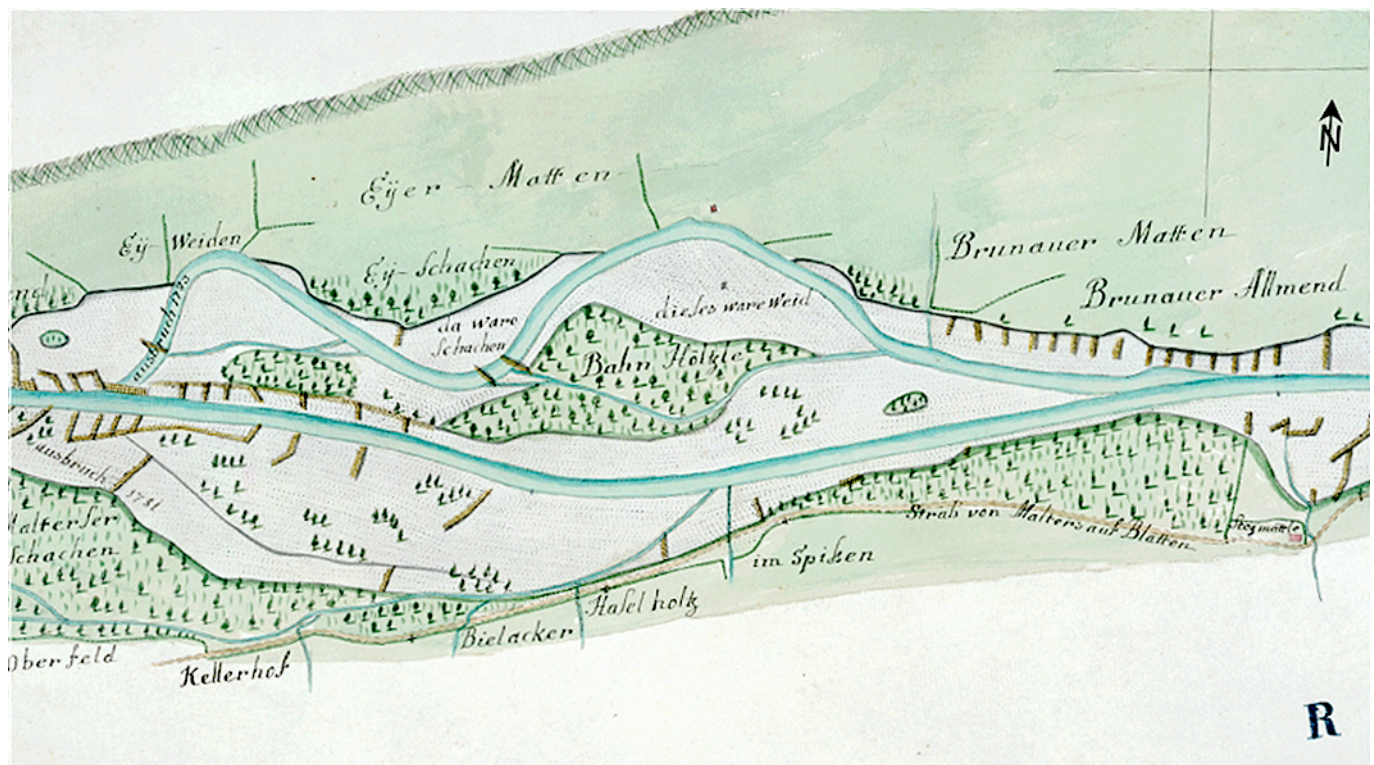
Historische Darstellungen

1. Plan der Emme

Jos. Hess

Jahr: 1784 (Blatt Nr. 4)

Massstab: 1:10'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 410 m ³ /s	HQ ₅ : 500 m ³ /s
Quelle:	BAFU, Abflussmessstation Limmat, Zürich Unterhard	

Gefälle	J: 0.0015
Quelle:	BAFU Querprofile

Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.120 m	d _m : 0.054 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 2'800 m ³ /a
Quelle:	Flussbau AG

Gerinneform:	③ Gewundenes Gerinne mit Inseln und Bänken
--------------	--

Historische Darstellungen

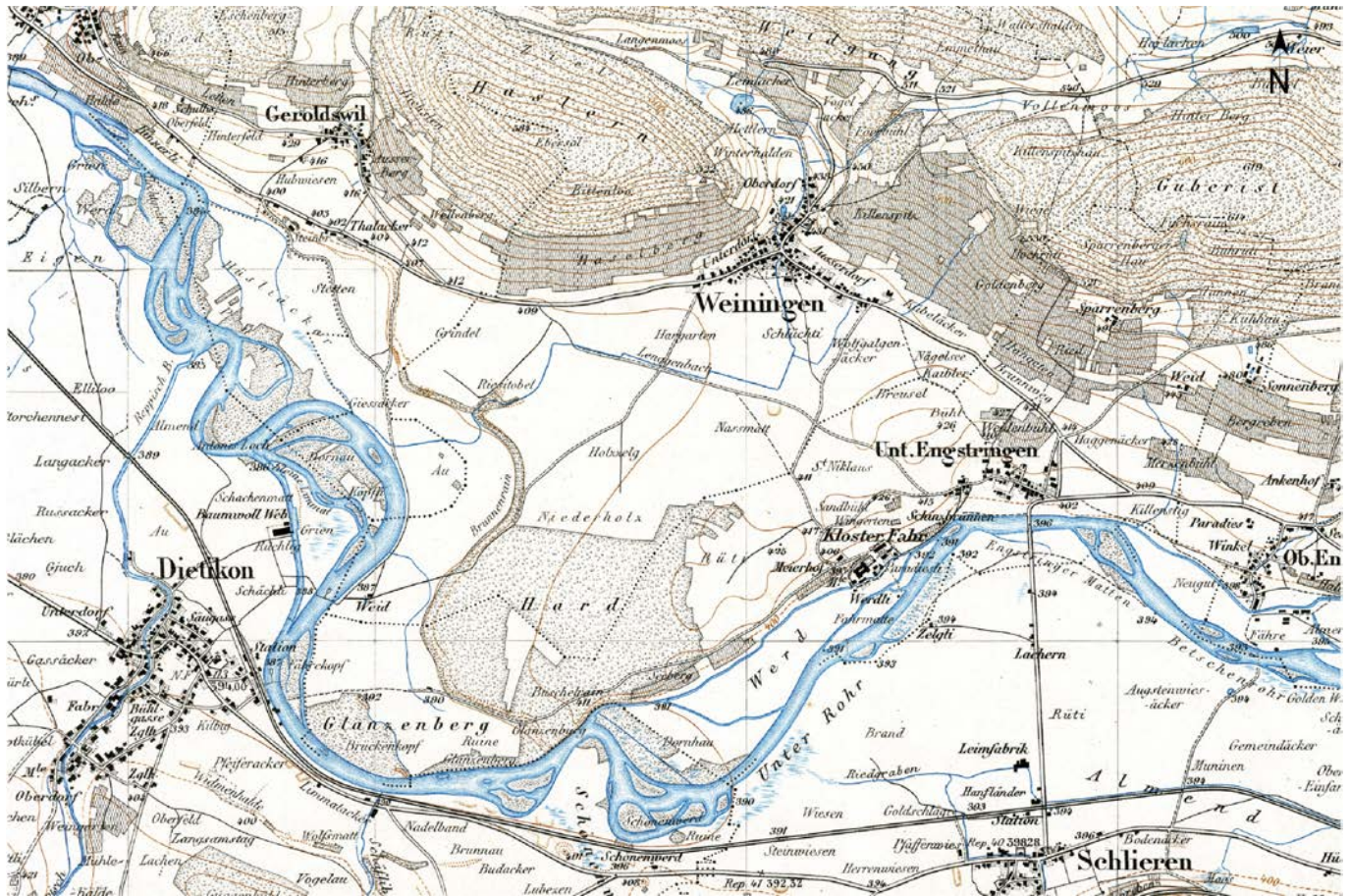
1. Wildkarte	Jahr: 1850	Masstab: 1:30'000
--------------	------------	-------------------



2. Siegfriedkarte

Jahr: 1877 (Blatt 158, Schlieren)

Masstab: 1:30'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 480 m ³ /s	HQ ₅ : 560 m ³ /s
Quelle:	BAFU, Abflussmessstation Reuss, Mühlau, Hünenberg	

Gefälle	J: 0.0020
Quelle:	Querprofile

Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.110 m	d _m : 0.050 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 13'000 m ³ /a	
Quelle:	Flussbau AG	

Gerinneform:	④ Verzweigtes Gewässer mit 2 Gerinnen
--------------	---------------------------------------

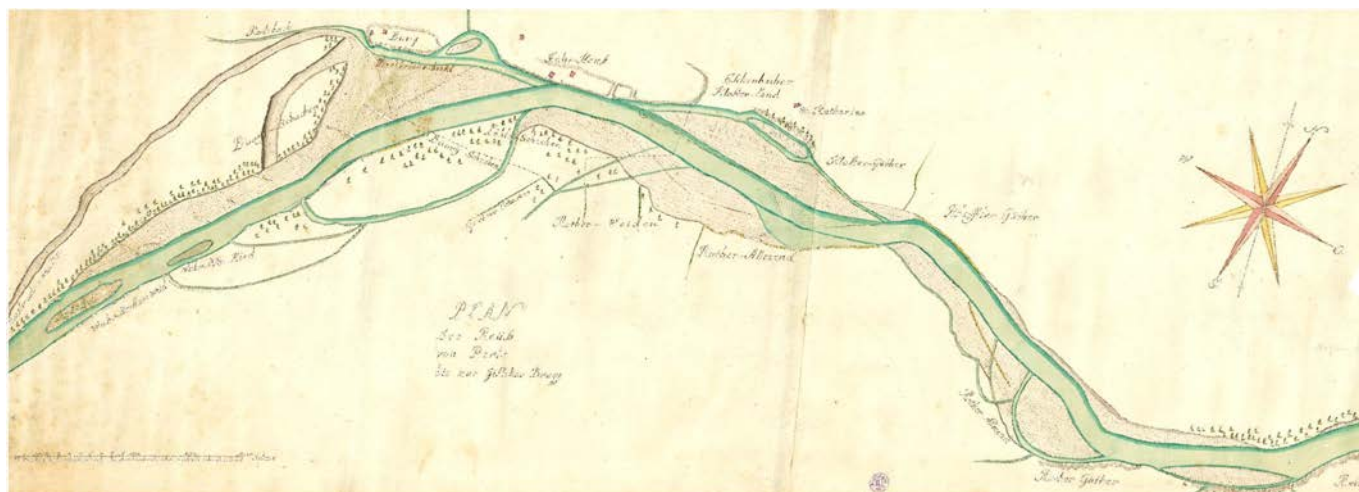
Historische Darstellungen

1. Plan der Reuss

Jos. Hess

Jahr: 1794

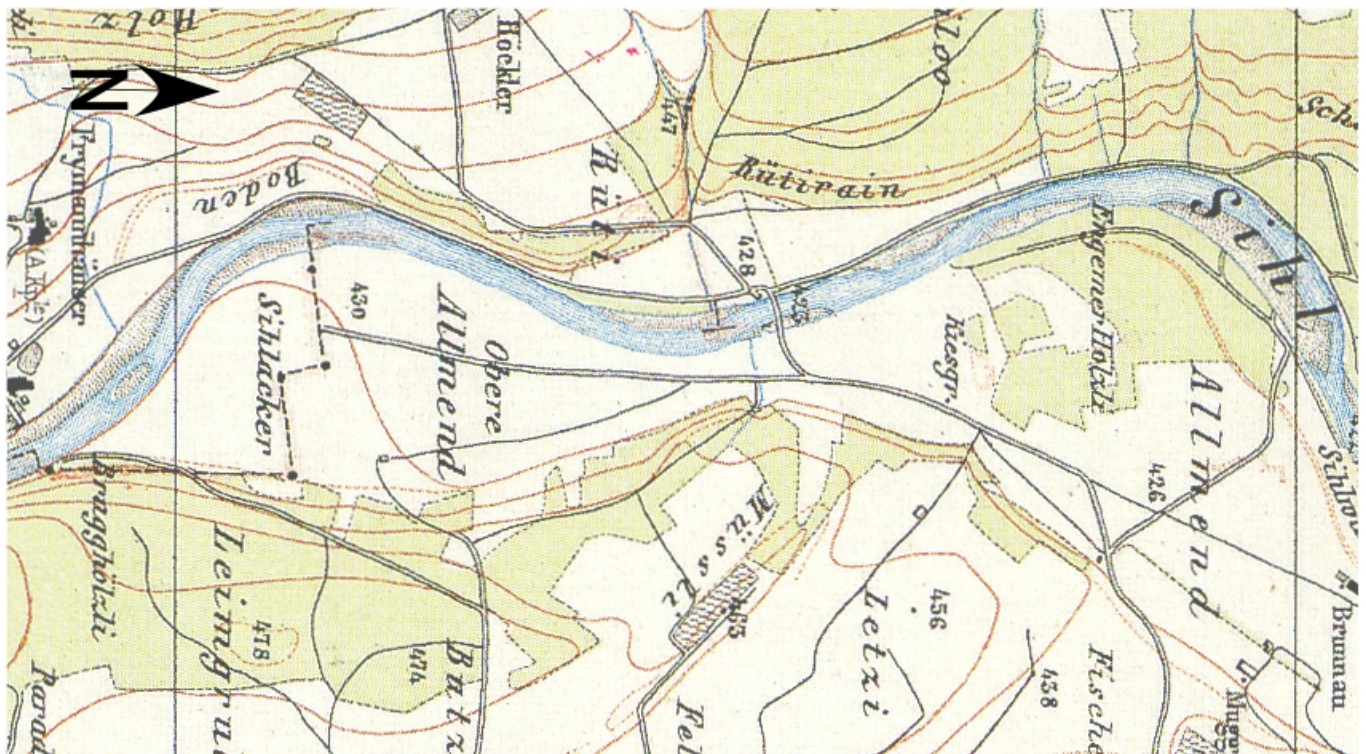
Massstab: 1:20'000

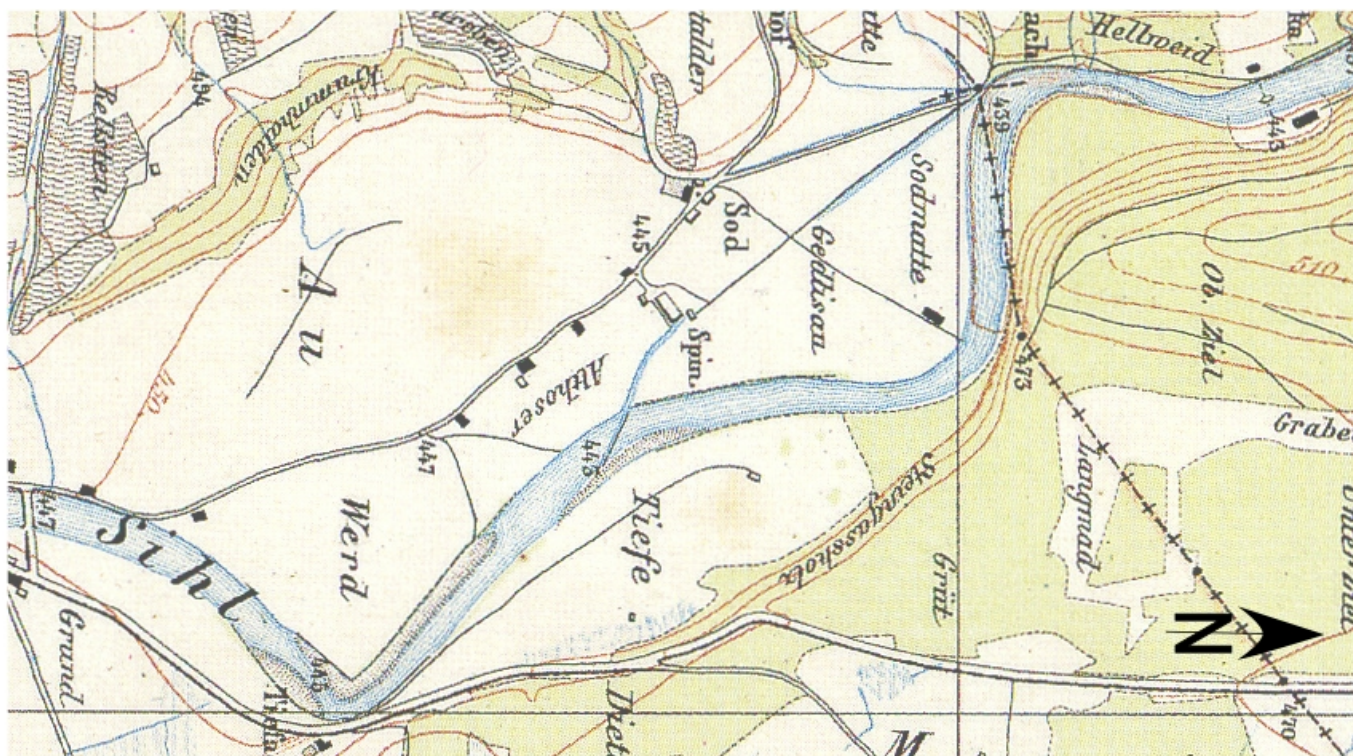


Hochwasserabflüsse Quelle:	HQ ₂ : 160 m ³ /s Auswertung historischer Abflüsse (ohne Sihlsee)	HQ ₅ : 220m ³ /s
Gefälle Quelle:	J: 0.0038 Querprofile	
Sohlenmaterial Quelle:	d ₉₀ : 0.200 m Flussbau AG	d _m : 0.080 m
Geschiebefracht Quelle:	im naturnahen Zustand: 3'300 m ³ /a Flussbau AG	
Gerinneform:	Übergang gewundene Gerinne mit Inseln und Bänken ③ zu gewundene Gerinne mit Bänken ②	

Historische Darstellungen

1. Siegfriedkarte Jahr: 1881 (Blatt 161, Zürich) Massstab: 1:10'000





Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 9 m ³ /s	HQ ₅ : 14 m ³ /s
Quelle:	Flussbau AG	

Gefälle	J: 0.0060
Quelle:	Querprofile

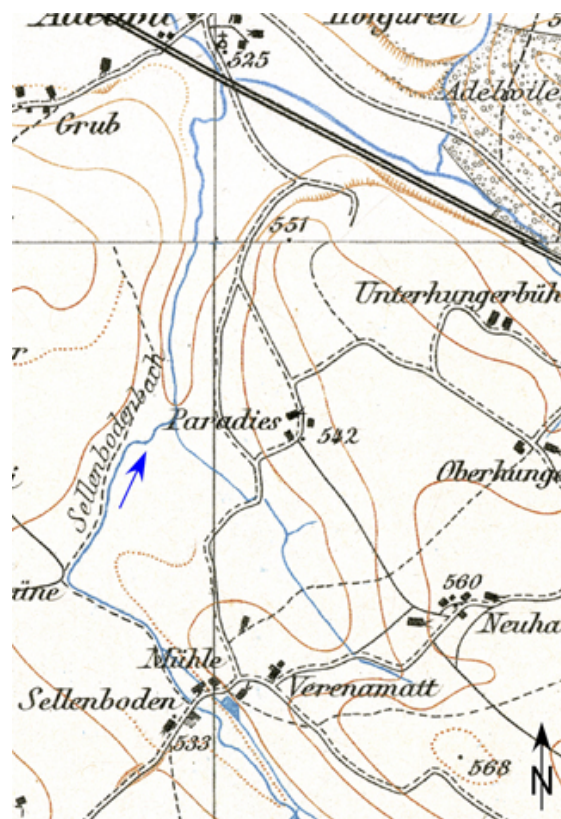
Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.140 m	d _m : 0.060 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 30 m ³ /a
Quelle:	Flussbau AG

Gerinneform:	Übergang gewundene Gerinne mit Bänken ② zu Mäander ohne Geschiebezufuhr ①
--------------	--

Historische Darstellungen

1. Siegfriedkarte Jahr: 1889 (Blatt 202, Rothenburg) Massstab: 1:15'000

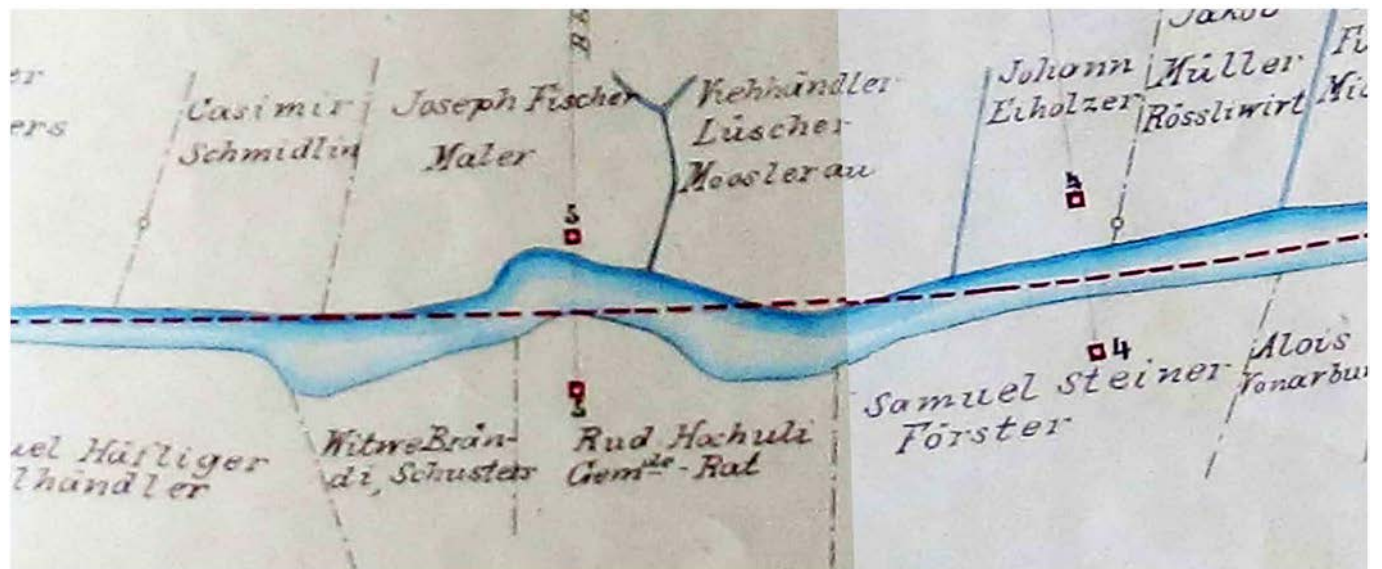


Foto

2. Jahr: 2015 (Flussbau AG)



2. Ausschnitt 2: Suren- Korrektion. Grenzstrecke Triengen- Reitnau. Situationsplan
Jahr: 1898
Massstab: 1:1'000



Hochwasserabflüsse Quelle:	HQ ₂ : 103 m ³ /s BAFU, Abflussmessstation Wiese, Basel	HQ ₅ : 142 m ³ /s
Gefälle Quelle:	J: 0.0031 Querprofile, Talgefälle	
Sohlenmaterial Quelle:	d ₉₀ : 0.087 m Flussbau AG	d _m : 0.031 m
Geschiebefracht Quelle:	im naturnahen Zustand: 3'000 m ³ /a Flussbau AG	
Gerinneform:	Übergang verzweigte Gewässer mit 2 Gerinnen ④ zu gewundene Gerinne mit Inseln und Bänken ③	

Historische Darstellungen

1. Zeichnung nach einer Plandarstellung um 1800 (Werner Balkow, 2011)

Massstab: 1:10'000

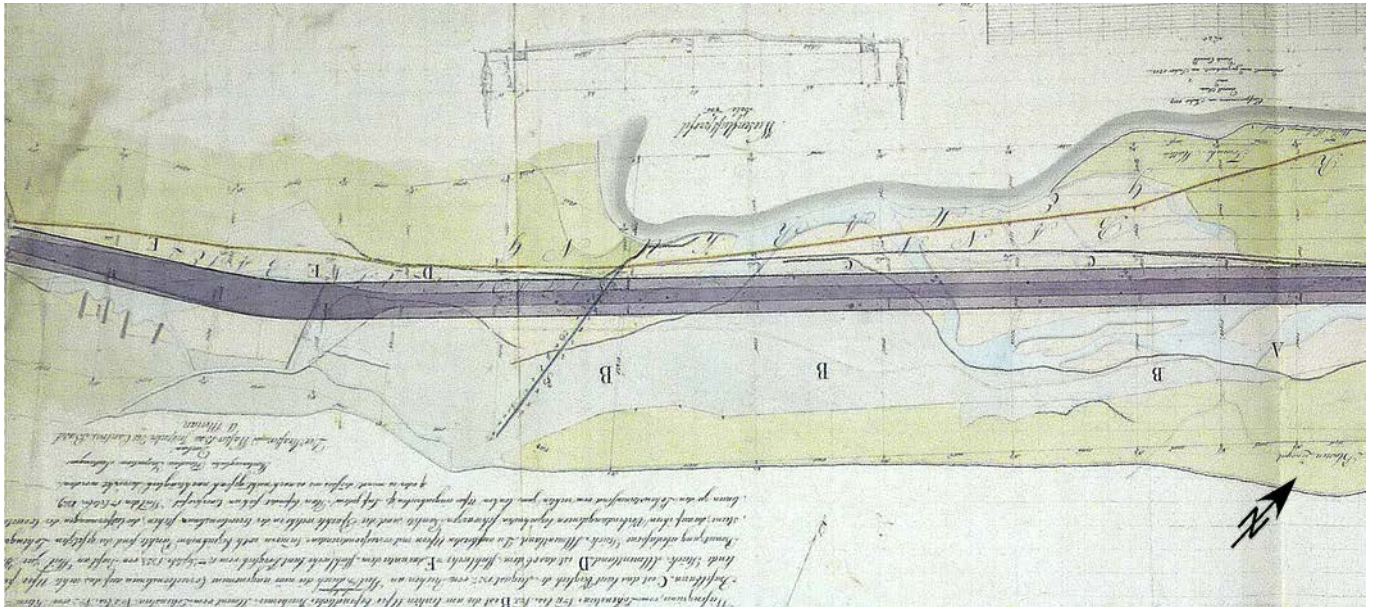


2. Plan: Beschreibung der Correction des Wiesen-Flusses

Oswald

Jahr: 1829

Masstab: 1:10'000

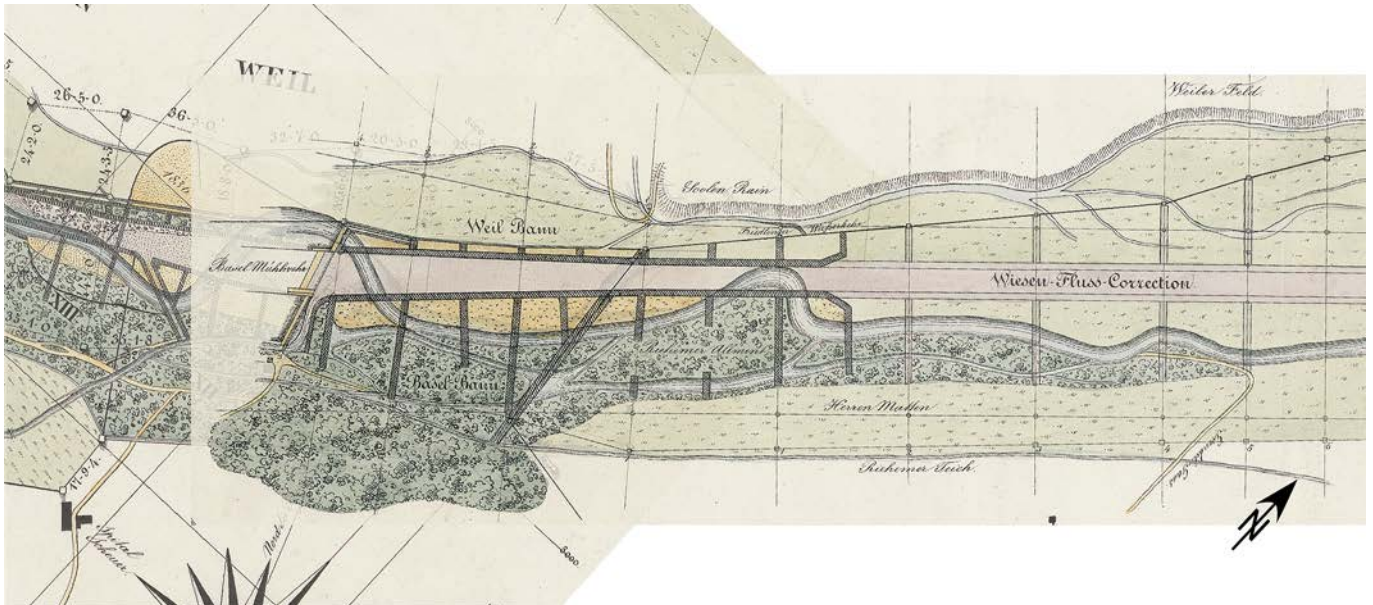


3. Plan des Wiesenzugs

F. Baader

Jahr: 1836

Masstab: 1:10'000



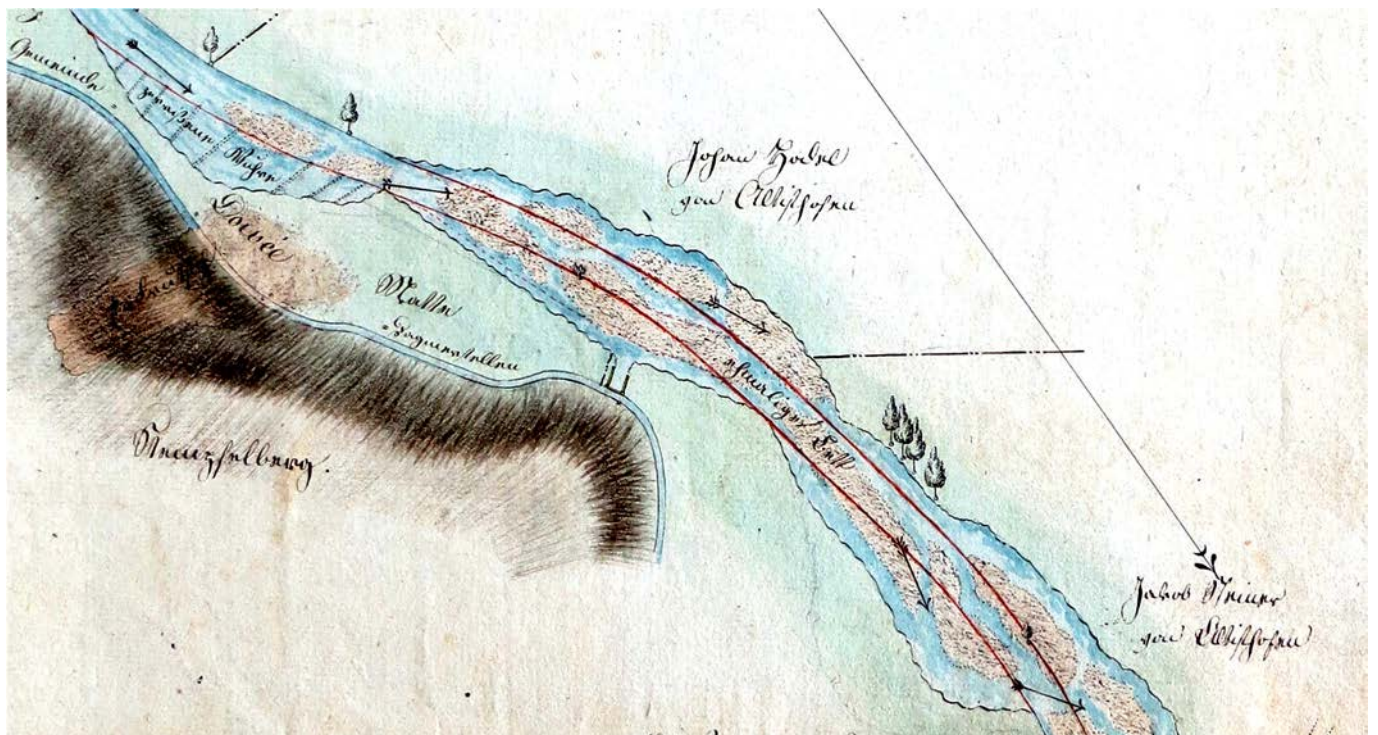
Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 70 m ³ /s	HQ ₅ : 95 m ³ /s
Quelle:	Gewässerraum Wigger, Luthern, Suhre, Ilfis (Bericht Flussbau AG, 2013) Im Auftrag des Kt. Luzern	
Gefälle	J: 0.0050	
Quelle:	Querprofile, Talgefälle	
Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.120 m	d _m : 0.060 m
Quelle:	Flussbau AG	
Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 1500 m ³ /a	
Quelle: Flussbau AG		
Gerinneform:	③ Gewundenes Gerinne mit Inseln und Bänken	

Historische Darstellungen

1. Plan

Jahr: 1817

Massstab: 1:2'500



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 141 m ³ /s	HQ ₅ : 200 m ³ /s
Quelle:	Brenno, Sanierung Geschiebehaushalt (Flussbau AG, 16.11.2017) Im Auftrag des Kt. TI	

Gefälle	J: 0.0270
Quelle:	Querprofile, Talgefälle

Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.580 m	d _m : 0.140m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 12'500 m ³ /a
Quelle:	Flussbau AG

Gerinneform:	④ Verzweigtes Gewässer mit 2 Gerinnen
--------------	---------------------------------------

Luftbilder (nächste Seite)

1. Jahr: 1934
Massstab: 1:10'000



2. Jahr: 1988
Massstab: 1:10'000



3. Jahr: 1998
Massstab: 1:10'000



4. Jahr: 2016
Massstab: 1:10'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 177 m ³ /s	HQ ₅ : 251 m ³ /s
Quelle:	Brenno, Sanierung Geschiebehaushalt (Flussbau AG, 16.11.2017) Im Auftrag des Kt. TI	

Gefälle	J: 0.0180
Quelle:	Querprofile, Talgefälle

Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.420 m	d _m : 0.165m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 14'000 m ³ /a
Quelle:	Flussbau AG

Gerinneform:	④ Verzweigtes Gewässer mit 2 Gerinnen
--------------	---------------------------------------

Luftbilder

1. Jahr: 1934 Massstab: 1:10'000



2. Jahr: 1989 Massstab: 1:10'000



3. Jahr: 2016

Massstab: 1:10'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 259 m ³ /s	HQ ₅ : 368 m ³ /s
Quelle:	Brenno, Sanierung Geschiebehaushalt (Flussbau AG, 16.11.2017) Im Auftrag des Kt. TI	

Gefälle	J: 0.0050
Quelle:	Querprofile, Talgefälle

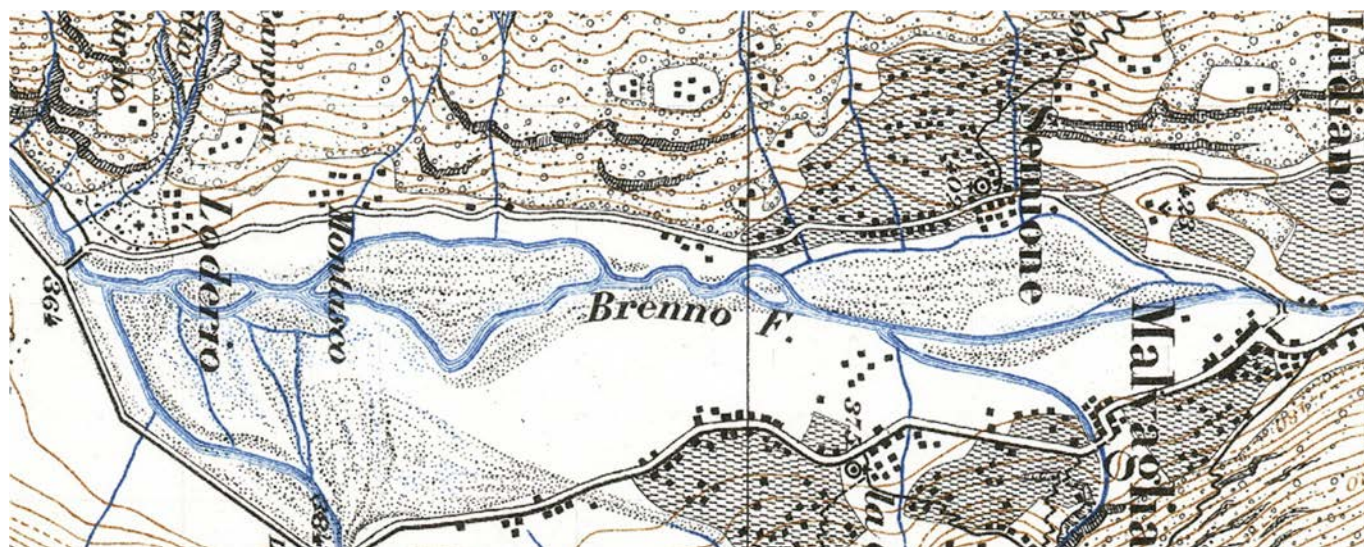
Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.144 m	d _m : 0.065 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 19'000 m ³ /a
Quelle:	Flussbau AG

Gerinneform:	⑤ Verzweigtes Gewässer mit mehr als 2 Gerinnen
--------------	--

Historische Darstellungen

1. Plan Jahr: 1872 (Blatt 508, Biasca) Massstab: 1:25'000



Luftbilder

2. Jahr: 1934

Massstab: 1:10'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 25 m ³ /s	HQ ₅ : 34 m ³ /s
Quelle:	Sanierung Geschiebehaushalt Schwarzwasser (Flussbau AG, 2017) Im Auftrag des Tiefbauamtes des Kt. Bern	

Gefälle	J: 0.0260
Quelle:	Querprofile

Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.310 m	d _m : 0.100m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 3'200 m ³ /a
Quelle:	Flussbau AG

Gerinneform:	④ Verzweigtes Gewässer mit 2 Gerinnen
--------------	---------------------------------------

Luftbilder (nächste Seite)

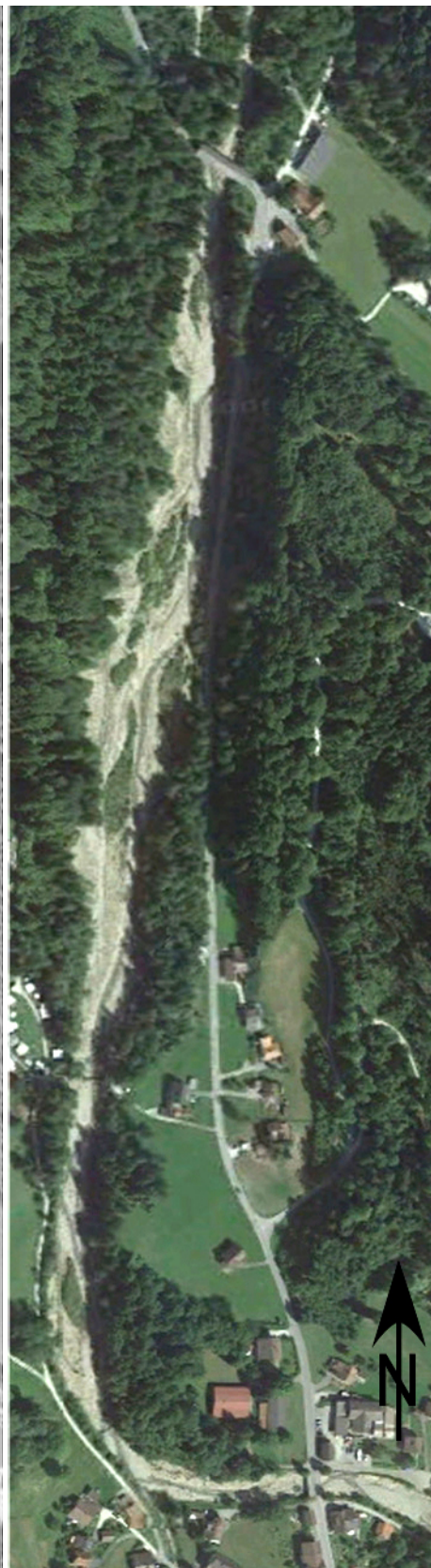
1. Jahr: 1928
Massstab: 1:5'000



2. Jahr: 1954
Massstab: 1:5'000



3. Jahr: 2016
Massstab: 1:5'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 175 m ³ /s	HQ ₅ : 230 m ³ /s
Quelle:	Hydrologie Thur (Flussbau AG, 2008) Im Auftrag des Kt. SG	

Gefälle	J: 0.0260
Quelle:	Querprofile Thur, Talgefälle

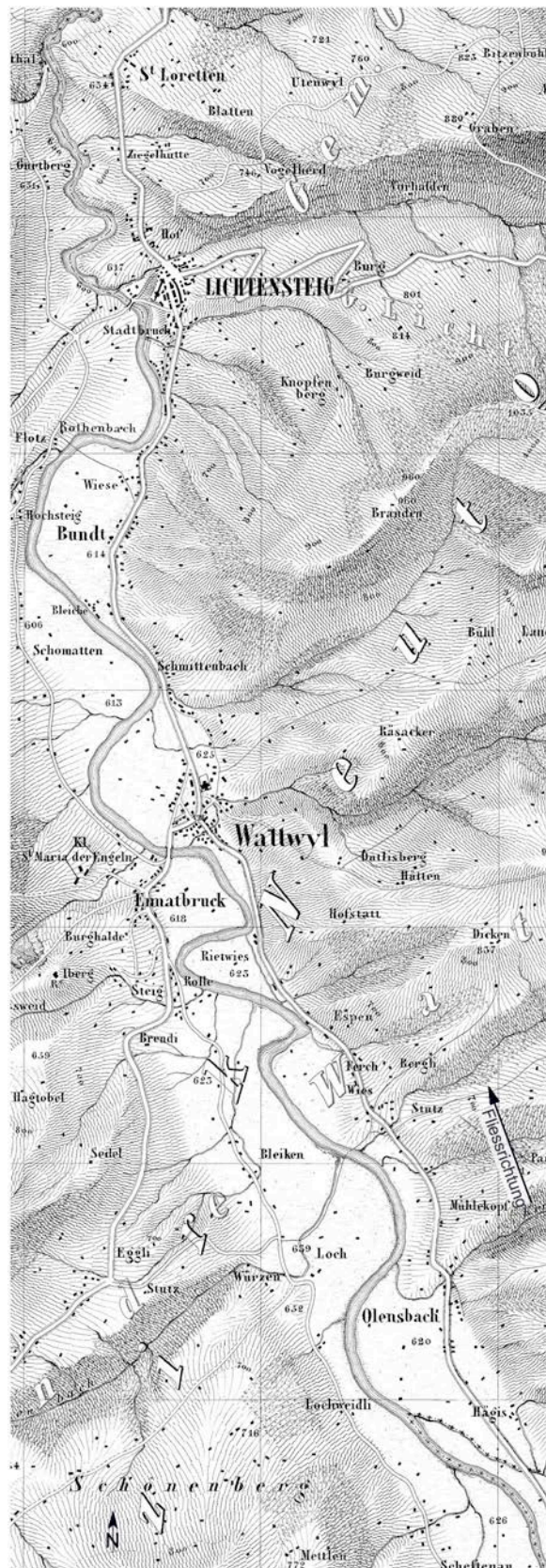
Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.180 m	d _m : 0.080 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 4'000 m ³ /a
Quelle:	Flussbau AG

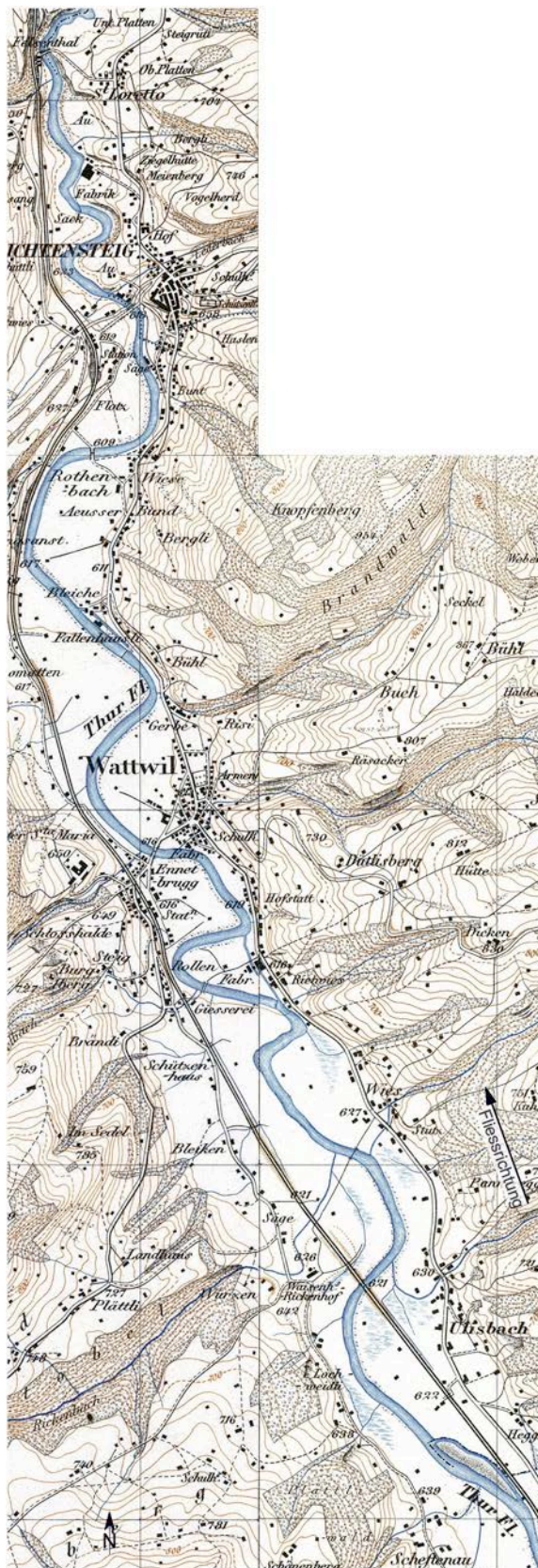
Gerinneform:	② Gewundenes Gerinne mit Bänken
--------------	---------------------------------

Historische Darstellungen (nächste Seite)

1. Eschmannkarte:
Jahr: 1854
Massstab: 1:30'000



2. Siegfriedkarte:
Jahr: 1879
(Blatt 234, Kappel und Blatt 231, Wattwil)
Massstab: 1:30'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 490 m ³ /s	HQ ₅ : 640 m ³ /s
Quelle:	Hydrologie Thur (Flussbau AG, 2008) Im Auftrag des Kt. SG	

Gefälle	J: 0.0024
Quelle:	Querprofile Thur, Talgefälle

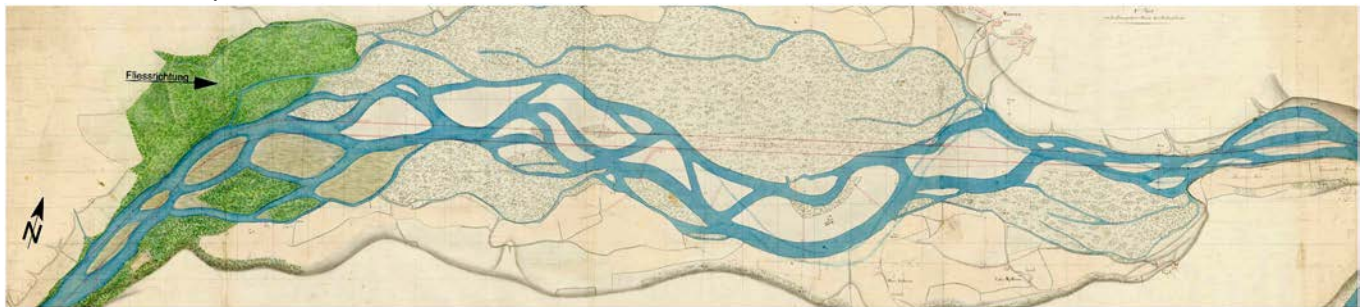
Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.120 m	d _m : 0.055 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 12'000 m ³ /a
Quelle:	Flussbau AG

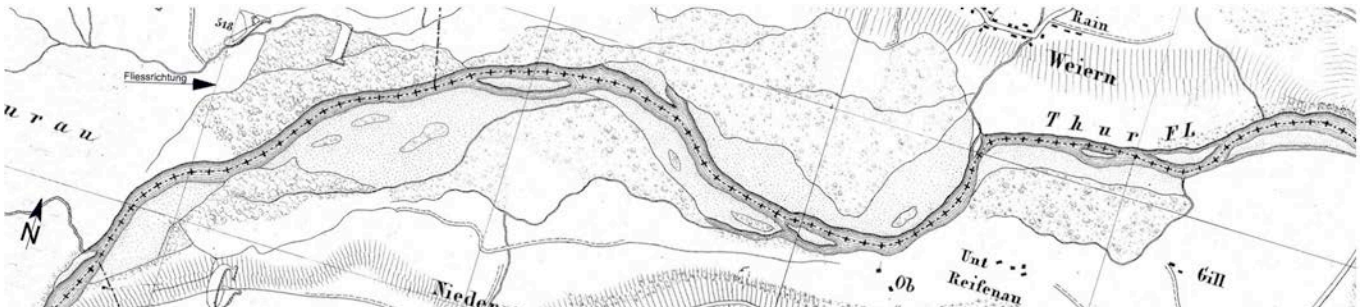
Gerinneform:	④ Verzweigtes Gewässer mit 2 Gerinnen
--------------	---------------------------------------

Historische Darstellungen

1. Korrektionsplan: Jahr: 1825 Massstab: 1:25'000



2. Eschmannkarte: Jahr: 1854 Massstab: 1:25'000



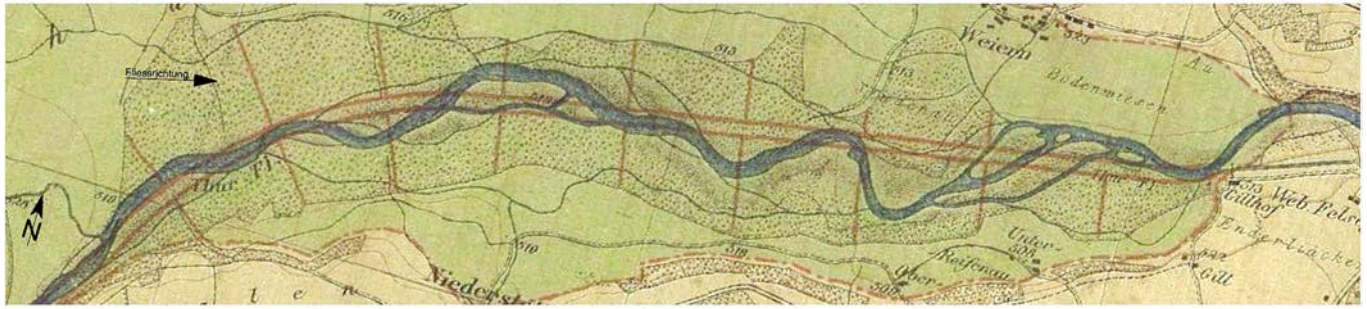
3. Korrektionsplan: Jahr: 1875 Massstab: 1:25'000



4. Korrektionsplan:

Jahr: 1887

Massstab: 1:25'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 590 m ³ /s	HQ ₅ : 750 m ³ /s
Quelle:	BAFU, Abflussmessstation Thur, Halden	

Gefälle	J: 0.0020
Quelle:	Querprofile

Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.145 m	d _m : 0.065 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 18'500 m ³ /a
Quelle:	Flussbau AG

Gerinneform:	Übergang verzweigte Gewässer mit 2 Gerinnen ④ zu gewundene Gerinne mit Inseln und Bänken ③
--------------	--

Historische Darstellungen

1. Sulzbergerkarte:	Jahr: 1835 (Blatt No. VIII)	Massstab: 1:25'000
---------------------	-----------------------------	--------------------



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 580 m ³ /s	HQ ₅ : 750 m ³ /s
Quelle:	BAFU, Abflussmessstation Thur, Andelfingen	

Gefälle	J: 0.0017
Quelle:	Querprofile

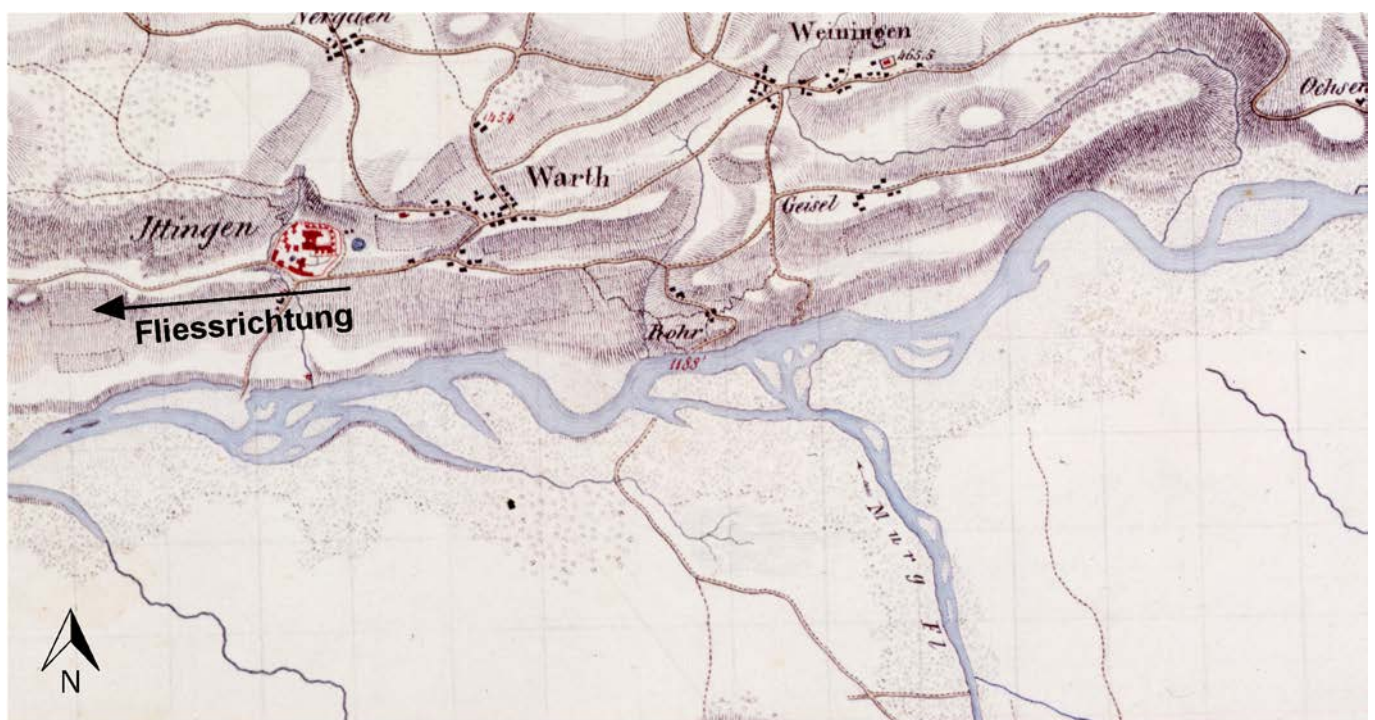
Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.125 m	d _m : 0.055 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 18'500 m ³ /a	
Quelle:	Flussbau AG	

Gerinneform:	④ Verzweigtes Gewässer mit 2 Gerinnen
--------------	---------------------------------------

Historische Darstellungen

1. Sulzbergerkarte: Jahr: 1834-1837 (Blatt No. IV) Massstab: 1:25'000



2. Korrektionskarte: Jahr: 1854

Massstab: 1:25'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 570 m ³ /s	HQ ₅ : 750 m ³ /s
Quelle:	BAFU, Abflussmessstation Thur, Andelfingen	

Gefälle	J: 0.0016
Quelle:	Querprofile, Talgefälle

Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.120 m	d _m : 0.050 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 20'000 m ³ /a
Quelle:	Flussbau AG

Gerinneform:	Übergang verzweigte Gewässer mit 2 Gerinnen ④ zu gewundene Gerinne mit Inseln und Bänken ③
--------------	--

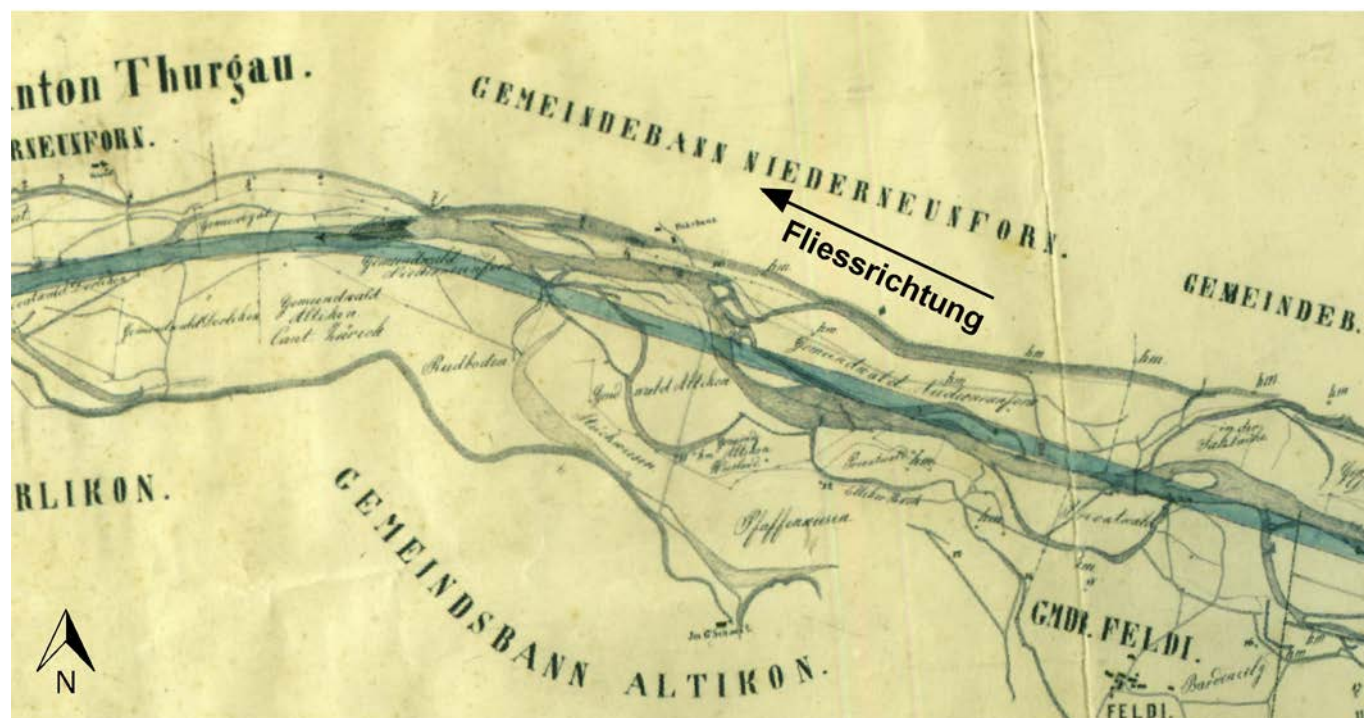
Historische Darstellungen

1. Sulzbergerkarte: Jahr: 1834-1837 (Blatt No. II) Massstab: 1:25'000



Jahr: 1854

Massstab: 1:25'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 77 m ³ /s	HQ ₅ : 96 m ³ /s
Quelle:	Interpolation aus Kantonalen Messstationen	

Gefälle	J: 0.0660
Quelle:	Querprofile

Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.100 m	d _m : 0.050 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 2'600 m ³ /a	
Quelle:	Flussbau AG	

Gerinneform:	⑤ Verzweigtes Gewässer mit mehr als 2 Gerinnen
--------------	--

Historische Darstellungen

1. Tösslauf von Kohlbrunnen bis an das Ende des Löfflers:
Peter Hch. Ing. Jahr: ca.1865 (L2193) Massstab: 1:10'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 89 m ³ /s	HQ ₅ : 118 m ³ /s
Quelle:	Interpolation aus Kantonalen Messstationen	

Gefälle	J: 0.0059
Quelle:	Querprofile

Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.090 m	d _m : 0.045 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 2'800 m ³ /a	
Quelle:	Flussbau AG	

Gerinneform:	④ Verzweigtes Gewässer mit 2 Gerinnen
--------------	---------------------------------------

Historische Darstellungen

1. Kyburg, Winterthur, Töss: Töss von Sennschür bis oberhalb der Einmündung der Kempt
Salomon Hegner Jahr: ca. 1816 (L2182) Massstab: 1:10'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 115 m ³ /s	HQ ₅ : 160 m ³ /s
Quelle:	BAFU, Abflussmessstation Töss, Neftenbach	

Gefälle	J: 0.0033
Quelle:	Querprofile

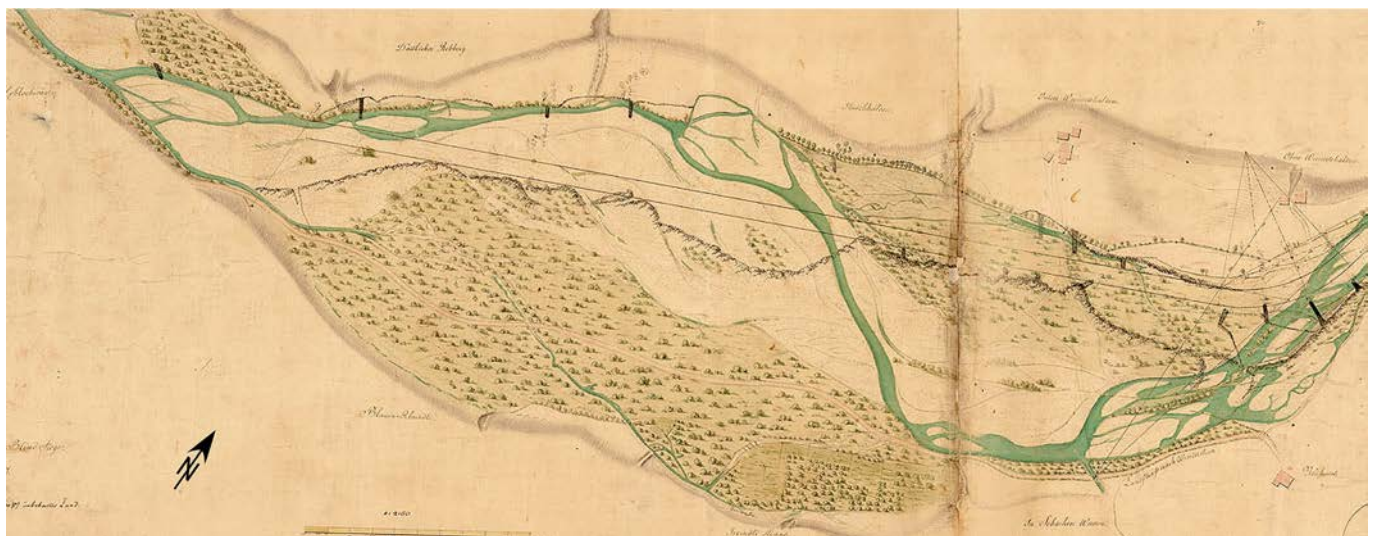
Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.080 m	d _m : 0.040 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 2'800 m ³ /a	
Quelle:	Flussbau AG	

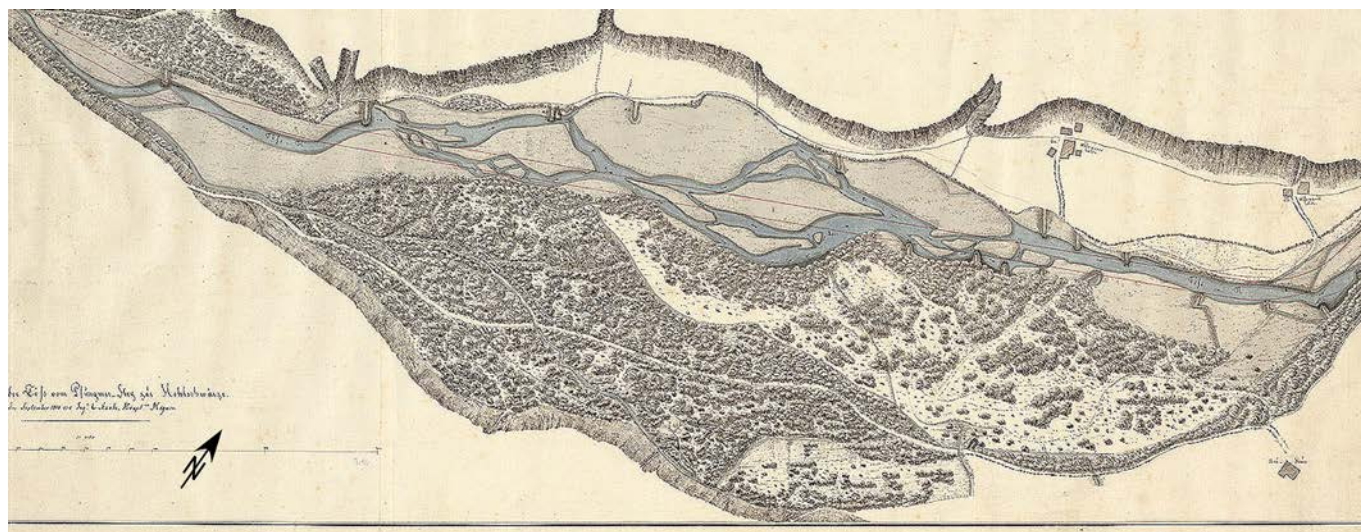
Gerinneform:	④ Verzweigtes Gewässer mit 2 Gerinnen
--------------	---------------------------------------

Historische Darstellungen

1. Grundriss des Tössbettes vom Pfurgersteg bis zum Blind-Steg:
Johann Jakob Sulzer Jahr: 1807 (L1992) Massstab: 1:10'000



2. Stromkarte der Töss vom Pfungmer-Steg zur Hohlschwärze:
Salomon Hegner Jahr:1814 (L1994) Massstab: 1:10'000



Hochwasserabflüsse Quelle:	HQ ₂ : 87 m ³ /s Auendynamik unteres Simmental, Konzeptstudie (Flussbau AG und Kissling und Zbinden) Im Auftrag des Amts für Landwirtschaft und Natur und des Renaturierungsfonds des Kt. Bern	HQ ₅ : 122 m ³ /s
Gefälle Quelle:	J: 0.0083 Querprofile	
Sohlenmaterial Quelle:	d ₉₀ : 0.133 m Flussbau AG	d _m : 0.055 m
Geschiebefracht Quelle:	im naturnahen Zustand: 12'300 m ³ /a Flussbau AG	
Gerinneform:	③ Gewundenes Gerinne mit Inseln und Bänken	

Luftbilder

1. Jahr: 1940

Massstab: 1:5'000



2. Jahr: 1946

Massstab: 1:5'000



3. Jahr: 2004

Massstab: 1:5'000



Hochwasserabflüsse	HQ ₂ : 25 m ³ /s	HQ ₅ : 37 m ³ /s
Quelle:	KW Oberhasli AG	

Gefälle	J: 0.0180
Quelle:	LK 1:25'000

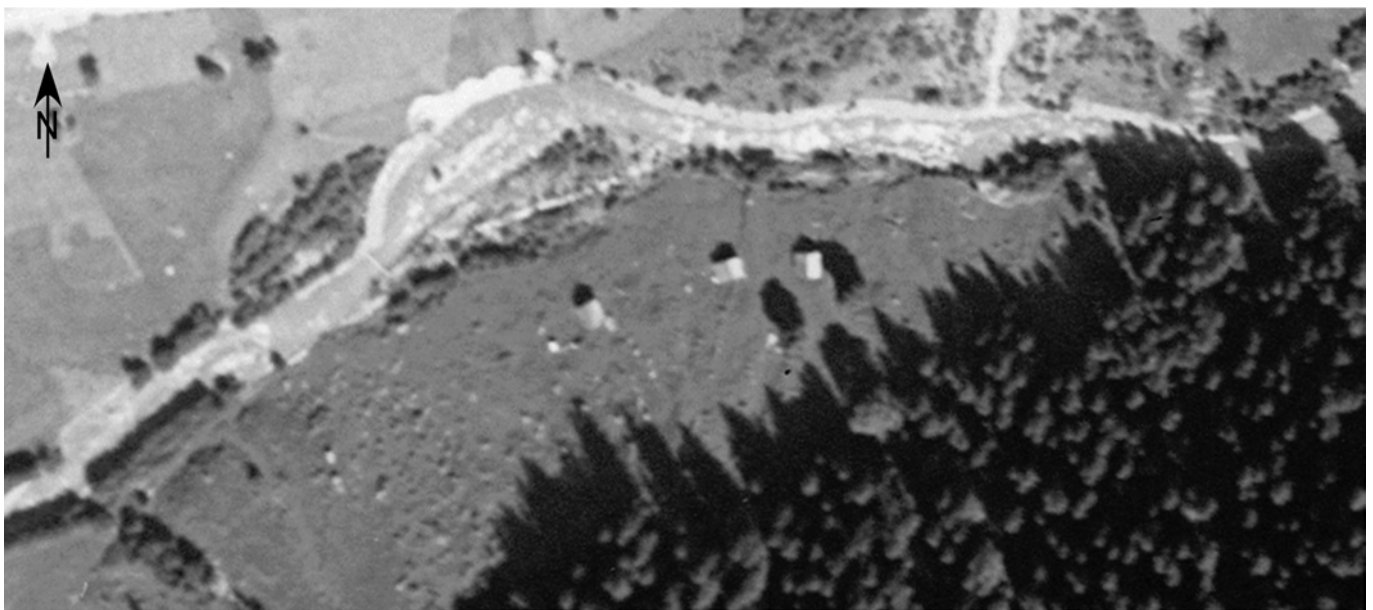
Sohlenmaterial	d ₉₀ : 0.165 m	d _m : 0.076 m
Quelle:	Flussbau AG	

Geschiebefracht	im naturnahen Zustand: 4'300 m ³ /a
Quelle:	KW Oberhasli AG

Gerinneform:	② Gewundenes Gerinne mit Bänken
--------------	---------------------------------

Luftbilder

1. Jahr: 1940 Massstab: 1:2'500



2. Jahr: 1960

Massstab: 1:2'500



3. Jahr: 1986

Massstab: 1:2'500



4. Jahr: 2015

Massstab: 1:2'500

