



Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite von Fließgewässern



Impressum

Herausgeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), CH-3003 Bern

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

Autoren:

Haupttext

Emma Mirjan	Hunziker, Zarn & Partner AG
Roni Hunziker	Hunziker, Zarn & Partner AG
Katharina Edmaier	BAFU, Abt. Gefahrenprävention (Co-Projektleitung)
Ulrich von Blücher	BAFU, Abt. Wasser (Co-Projektleitung)

Fallbeispiele

Ueli Schälchli	Flussbau AG (Fallbeispiele: Aare Wildegg, Aargau und Thur Wattwil, St. Gallen)
Tamara Ghilardi	CSD INGENIEURS SA (Fallbeispiele: Jogne Freiburg und Bern)
Emma Mirjan	Hunziker, Zarn und Partner AG (Fallbeispiel Sitter, Thurgau)

Begleitgruppe:

Susanne Haertel-Borer	BAFU, Abt. Wasser
Antoine Magnollay	BAFU, Abt. Gefahrenprävention
Christian Marti	AWEL Zürich
Manuel Nitsche	BAFU, Abt. Wasser
Michael Pauli	BAFU, Abt. Wasser

Titelbild: *Thur bei Pfyn– Johannes Sulzberger von 1792*

Die Publikation liegt nur in elektronischer Form vor und ist in deutscher und französischer Sprache verfügbar.

Bern, im Juni 2023

Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite von Fliessgewässern

Hinweis:

Der vorliegende technische Bericht basiert auf dem intensiven Austausch mit zahlreichen Fachleuten aus Privatwirtschaft, öffentlicher Hand und Forschung. Neben der Begleitgruppe i.e. Sinne hat der Lenkungsausschuss der Plattform Revitalisierung der Wasser-Agenda 21 die Arbeiten begleitet. Zudem wurde in der Startphase ein Expertenworkshop mit 21 Teilnehmenden aus Kantonen, Fachbüros und der Forschung durchgeführt. Der Bericht zeigt mögliche Methoden für die Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite von Fliessgewässern. In einzelnen Detailfragen gingen die Einschätzungen der Experten auseinander, vor allem in Bezug auf die Rolle der morphologischen Charakteristik (Auflandungs-, Gleichgewichts- oder Erosionszustand) sowie bei der Abflussreduktion. In diesen Fällen hat das BAFU auf Basis der geführten Diskussionen über die vorliegende Textfassung entschieden.

Zusammenfassung

Die natürliche Sohlenbreite eines Gewässers ist eine wichtige Ausgangsgrösse sowohl zur Dimensionierung des Raumbedarfs bei Wasserbauprojekten als auch zur Bestimmung der Breite des Gewässerraums (nach Art. 41 a, Gewässerschutzverordnung (SR 814.201; GSchV)). Da sich heute viele Gewässer in der Schweiz in einem naturfremden Zustand befinden, kann sie zumeist nicht direkt gemessen werden, sondern muss mit gutachterlichen Ansätzen hergeleitet werden.

Der vorliegende Bericht gibt zunächst einen Überblick über die gängigen Methoden zur Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite:

- Analyse historischer Dokumente
- Analyse naturnaher Vergleichsstrecken
- Terrainanalyse
- Empirische Ansätze

Er zeigt ihre jeweiligen Vor- und Nachteile sowie Anwendungsgrenzen in Abhängigkeit vom Gewässertyp und von vorhandenen Grundlagen auf.

Danach zeigt er ein schrittweises Vorgehen auf, das durch Kombination verschiedener Methoden zum eigentlichen Ergebnis für die natürliche Sohlbreite führt, die dann als Dimensionierungsgrösse dienen kann. Das Vorgehen ist wie folgt:

- Im ersten Schritt werden Abschnitte definiert, in welchen die massgebenden Parameter für die natürliche Sohlenbreite möglichst homogen sind.
- Anschliessend werden die Grundlagen für den Einzelfall erhoben, die verschiedenen Methoden zur Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite angewendet und die Ergebnisse bewertet und abgewogen.
- Abschliessend wird die natürliche Sohlenbreite für den betrachteten Abschnitt hergeleitet.

Das aufgezeigte Vorgehen wurde mit Fokus auf grosse Fliessgewässer d.h. Fliessgewässer mit einer natürlichen Sohlbreite grösser als 15 Meter entwickelt. Es ist aber auch auf Fliessgewässer mit einer Breite kleiner 15 Meter anwendbar, wenn die entsprechenden Grundlagen vorhanden sind.

In einem dritten Teil werden das Vorgehen und die einzelnen Methoden anhand von vier Anwendungsbeispielen illustriert.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	6
2	Glossar	7
3	Natürliche Sohlenbreite und morphologische Einordnung	8
4	Vorgehen zur Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite	13
5	Abschnittseinteilung	15
6	Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite	16
6.1	Allgemeine Hinweise zur Auswertung.....	16
6.2	Analyse historischer Dokumente	18
6.2.1	<i>Einleitung</i>	18
6.2.2	<i>Historische Karten und Katasterpläne</i>	18
6.2.3	<i>Historische Luftbildaufnahmen</i>	22
6.2.4	<i>Historische Fotos und Gemälde</i>	24
6.2.5	<i>Berichte und Pläne früherer Wasserbauprojekte</i>	27
6.3	Analyse naturnaher Vergleichsstrecken	29
6.4	Terrainanalyse	32
6.5	Empirische Ansätze	34
6.5.1	<i>Einleitung</i>	34
6.5.2	<i>Anwendung der empirischen Ansätze</i>	37
6.5.3	<i>Grundlagen</i>	40
7	Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite	42
7.1	Vorgehen.....	42
7.2	Die Sohlenbreite bei dauerhaft verändertem Abfluss oder Geschiebeangebot	45
7.2.1	<i>Rahmenbedingungen</i>	45
7.2.2	<i>Anpassung der Sohlenbreite bei verändertem Abfluss</i>	46
7.2.3	<i>Anpassung der Sohlenbreite bei veränderter Geschiebelieferung</i>	46
7.3	Sohlenbreite bei Fließgewässern mit ehemals sehr grossen natürlichen Sohlenbreiten und Nutzungsdruck	47
8	Anwendungsbeispiele	49
8.1	Jogne / Jaunbach (Kantone Fribourg und Bern).....	50
8.1.1	<i>Aktueller Zustand</i>	50
8.1.2	<i>Grundlagen und Methodik zur Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite</i>	51
8.1.3	<i>Gewichtung</i>	52
8.2	Beispiel Aare Wildegg - Brugg (Kanton Aargau)	61
8.2.1	<i>Ist-Zustand</i>	62

Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite von Fließgewässern

8.2.2	<i>Grundlagen und Ansätze zur Breitenermittlung</i>	62
8.2.3	<i>Gewichtung und natürliche Sohlenbreite</i>	65
8.2.4	<i>Veränderte Randbedingungen</i>	69
8.3	Beispiel Thur Wattwil (Kanton St. Gallen).....	71
8.3.1	<i>Ist-Zustand</i>	71
8.3.2	<i>Grundlagen und Ansätze zur Breitenermittlung</i>	72
8.3.3	<i>Gewichtung und natürliche Sohlenbreite</i>	74
8.4	Sitter (Kanton Thurgau).....	80
8.4.1	<i>Ist-Zustand</i>	80
8.4.2	<i>Grundlagen und Ansätze zur Breitenermittlung</i>	81
8.4.3	<i>Gewichtung</i>	82
9	Quellenverzeichnis	89

1 Ausgangslage

Die natürliche Sohlenbreite ist eine wichtige Ausgangsgrösse, sowohl zur Dimensionierung des Raumbedarfs bei Wasserbauprojekten als auch zur Ermittlung des Gewässerraumes (Art. 41 a, Gewässerschutzverordnung (SR 814.201; GSchV)).

Da sich heute viele Fliessgewässer in der Schweiz in einem naturfremden Zustand befinden, kann die natürliche Sohlenbreite meist nicht direkt gemessen und muss alternativ gutachterlich hergeleitet werden.

Der nachfolgende Bericht fasst die fachlichen Grundlagen dafür in kompakter Form zusammen, empfiehlt ein schrittweises Vorgehen für die gutachterliche Herleitung und illustriert die Anwendung anhand von Beispielen.

2 Glossar

Referenzzustand

Der Referenzzustand ist der naturnahe Zustand bezüglich Morphologie, Breite, Abflussregime und Geschiebehalt. Der Referenzzustand unterscheidet sich vom Naturzustand nur durch grossräumige Waldrodungen, Trockenlegung von Feuchtgebieten und Gewässerumleitungen in einen See. Referenz für Abflussmenge und Geschiebelieferung sind die heutigen klimatischen Bedingungen. Siedlungen sind nicht Teil des Referenzzustands.

Bettbildender Abfluss

Die Idee des bettbildenden Abflusses basiert auf dem vereinfachten Konzept, dass es einen Abfluss gibt, welcher im langjährigen Mittel den morphologisch grössten Einfluss auf die natürliche Gerinneform eines Fliessgewässers hat. Die Definition des bettbildenden Abflusses basiert im vorliegenden Bericht auf den folgenden Überlegungen:

- Der bettbildende Abfluss ist gross genug, um morphologisch relevante Veränderungen auszulösen. Dies ist bei kleineren bis mittleren, im Gerinne abfliessenden Hochwassern der Fall.
- Der bettbildende Abfluss weist eine Häufigkeit auf, bei welcher die morphologisch aktiven Flächen nicht zuwachsen (Gehölz) und somit nicht fixiert werden.

Der bettbildende Abfluss wird aufgrund von Erfahrungen häufig zwischen einem HQ₂ und einem HQ₅ gewählt. Bei steilen Gerinnen kann der bettbildende Abfluss auch bis zu einem HQ₁₀ betragen.

Natürliche Sohlenbreite

Breite der Sohle im Referenzzustand

3 Natürliche Sohlenbreite und morphologische Einordnung

Definition natürliche Sohlenbreite

Die natürliche Sohlenbreite entspricht der natürlichen mittleren Breite der Gewässersohle innerhalb eines ausgewählten Gewässerabschnittes. Nicht Bestandteil der Sohle sind die Uferböschungen sowie Flächen mit mehrjähriger terrestrischer Vegetation (Gehölz ab dem Alter von 3 bis 5 Jahren).

Bedeutung der natürlichen Breite

Bei der Morphologie spielt die Sohlenbreite eine Schlüsselrolle. Nur wenn genügend Sohlenbreite vorhanden ist, bilden sich Sohlenstrukturen wie Bänke, Verzweigungen und Kolke. Falls das Gerinne zu schmal ist, können sich, unabhängig von der Geschiebezufuhr, keine Sohlenformen entwickeln. Requena [20] entwickelte ein Gedankenmodell, welches die Prozesse bei der eigendynamischen Verbreiterung eines kiesführenden Fließgewässers bis hin zur natürlichen Sohlenbreite beschreibt (Abb. 1).

Primäre Seitenerosion

Bei der primären Seitenerosion weitet sich das enge Gerinne verhältnismässig rasch auf, wobei der gestreckte Flusslauf mehr oder weniger beibehalten wird. Die Aufweitung erfolgt so lange, bis die hydraulische Kraft auf die Sohle (Schubspannung) beim bettbildenden Abfluss (HQ_2 bis HQ_5) geringer ist als der Erosionswiderstand des Sohlenmaterials am Böschungsfuss (inkl. Berücksichtigung einer Deckschichtbildung). Die bei der primären Seitenerosion erreichte Breite wird als Gleichgewichtsbreite bezeichnet. Die Geschwindigkeit der Seitenerosionsprozesse hängt vom Unterschied zwischen der Gleichgewichtsbreite und der aktuellen Breite, vom Erosionswiderstand des Ufers und von den Abflussmengen ab. Falls im Endzustand der primären Seitenerosion Sohlformen entstehen, wird die sekundäre Seitenerosion initiiert.

Sekundäre Seitenerosion

Sohlenformen bewirken Querströmungen. Sie sind eine Voraussetzung für die nach der primären Seitenerosion stattfindenden sekundären Seitenerosion. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei ausgeprägteren Sohlenstrukturen die Belastung auf die Ufer grösser ist und damit auch die Seitenerosionsprozesse intensiver ablaufen. Die Seitenerosionsprozesse weisen hinsichtlich Lage, Ausdehnung und zeitlichem Auftreten eine hohe Dynamik und Variabilität auf. Die sich nach der sekundären Seitenerosion einstellende Breite wird als Grenzbreite bezeichnet.

Sowohl die Gleichgewichts- als auch die Grenzbreite können mit empirischen Formeln abgeschätzt werden.

Natürliche Sohlenbreite und morphologische Einordnung

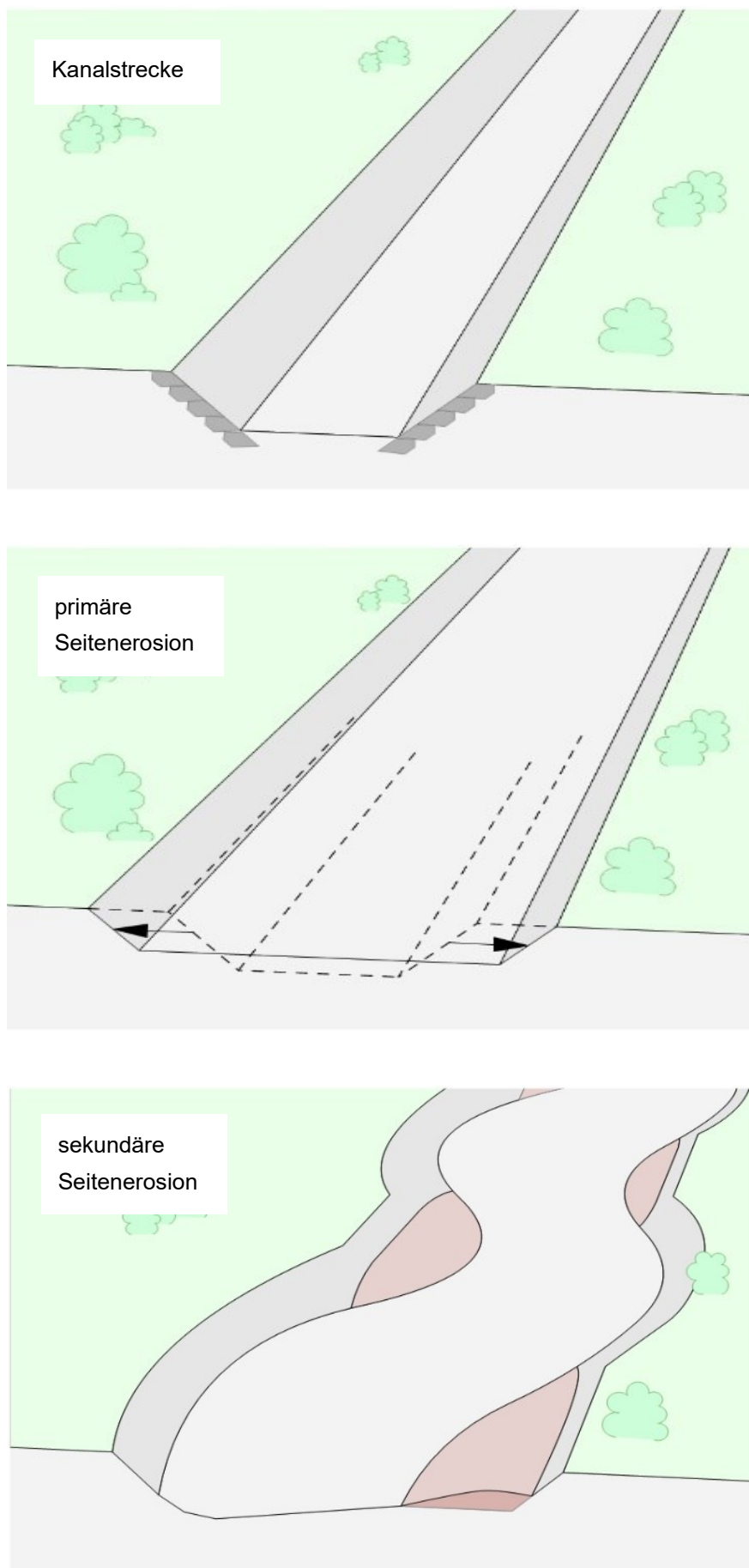


Abb. 1 Konzept der primären und sekundären Seitenerosion

Morphologie

Am Ende eines Aufweitungsprozesses stellt sich theoretisch eine stabile Breite ein. Diese weist räumlich und zeitlich eine grosse Variabilität auf. Über eine längere Strecke und über eine längere Zeitperiode betrachtet, für den Fall, dass sich auch der Geschiebetransport im Gleichgewicht befindet, sind Breite und Gefälle aber konstant.

Die meisten Schweizer Fliessgewässer führen Geschiebe, das bei erhöhtem Abfluss über die Gewässersohle transportiert wird. Eine natürliche Sohlenbreite eines Fliessgewässers ermöglicht, dass sich Geschiebe ab- und umlagern kann und sich so natürliche dynamische Strukturen innerhalb des Gerinnes ausbilden können. Es gibt natürlicherweise Gewässerabschnitte, in die langfristig mehr Geschiebe eingetragen wird, als wieder transportiert werden kann. Das führt zu einem Auflandungszustand, der heute nur erreichbar ist, wenn der Schutz vor Hochwasser gewährleistet werden kann. Beeinträchtigungen des Hochwasserschutzes müssen, wo nötig, durch begleitende Massnahmen verhindert werden. Das Längsgefälle im Gerinne soll das Talgefälle auch in einem auflandendem Zustand nicht überschreiten.

Der Geschiebehaushalt hat einen entscheidenden Einfluss auf die Gerinneform und Sohlbreite. Dessen Einfluss ist in der Fachliteratur aber selten quantitativ angegeben, da Geschiebe in der Praxis sehr schwer zu messen ist. Eine Methode zur Berücksichtigung der Geschiebefracht bei der Abschätzung von Gerinneform und Sohlbreite wurde von Schälchli und Hunzinger [6] entwickelt.

Gewässer können unterschiedliche Gerinneformen ausbilden. Das hängt vor allem vom Abfluss- und Geschieberegime, sowie dem Sohlenmaterial ab. Welche Gerinneformen bei konkreten Sohlbreiten, Abflüssen, Gefällen und Korngrössen zu erwarten sind, kann mit den Diagrammen von Ahmari & da Silva [25] oder Zarn [27] abgeschätzt werden.

Eine scharfe Abgrenzung zwischen den unterschiedlichen natürlichen Gerinneformen ist nicht möglich, da die Übergänge der Formen fließend sind. Es gibt dementsprechend auch unterschiedliche Systeme, die die Gerinneformen von natürlichen Flüssen beschreiben. Das Bundesamt für Umwelt stützt sich auf das Einteilungssystem von Hunzinger und Schälchli welches in der Vollzugshilfe Sanierung Geschiebehaushalt beschrieben ist [6]. Diese Einteilung der Flusssysteme ist wie folgt:

1. Verzweigtes Gerinne mit mehr als zwei Teilgerinnen
2. Verzweigtes Gerinne mit 2 Teilgerinnen
3. Gewundene Gerinne mit Inseln und Bänken
4. Gewundene Gerinne mit Bänken
5. Mäandrierende Gerinne ohne Geschiebeführung

6. Gestreckte und gewundene Gerinne

Ein genauer Beschrieb dieser Einteilung kann der Vollzugshilfe Sanierung Geschiebehaushalt [6] entnommen werden.

Einfluss der Hydrologie

Infolge der hydrologischen Ereignisse kann sich die Gerinneform ändern. Zum Beispiel kann ein normalerweise mehrarmiges Gerinne nach einer längeren Trockenphase die Form eines schwachen Mäanders annehmen oder umgekehrt ein Einzelgerinne sich nach einem Hochwasser zeitweise verzweigen.

Natürliche Sohlenbreite und morphologische Einordnung*Unterschied zwischen Gerinne- und Sohlenbreite*

Je nach Morphologie besitzen die Sohle und der Uferbereich ganz unterschiedliche Ausprägungen. Die Übergänge zwischen Sohle, Uferböschungen, Weich- und Hartholzauen sind meist fließend.

Zur Definition der Sohlenbreite werden folgende Kriterien herangezogen:

- Die Sohle liegt zwischen den Uferböschungsfüssen
- Nicht Bestandteil der Sohle sind Flächen mit mehrjähriger terrestrischer Vegetation (Gehölz ab dem Alter von 3 bis 5 Jahren)
- Die Wasserspiegelbreite beim bettbildenden Abfluss entspricht der Gerinnebreite und ist grösser als die Sohlenbreite (siehe Abb. 2).

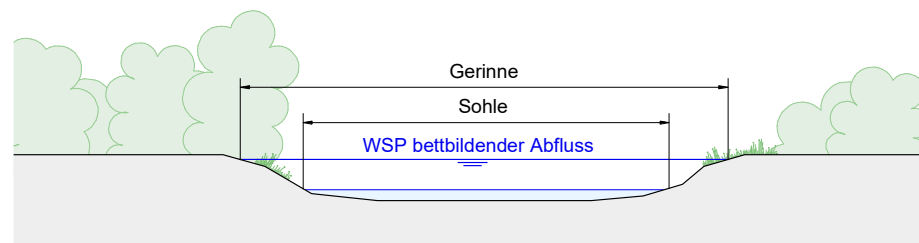
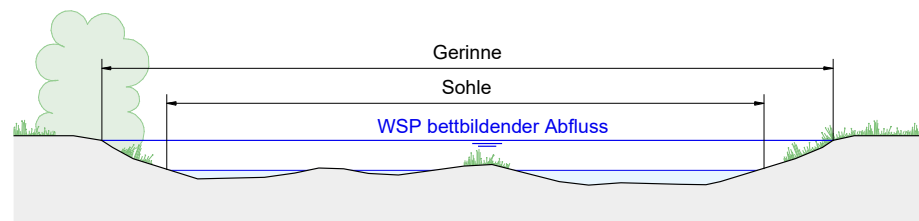
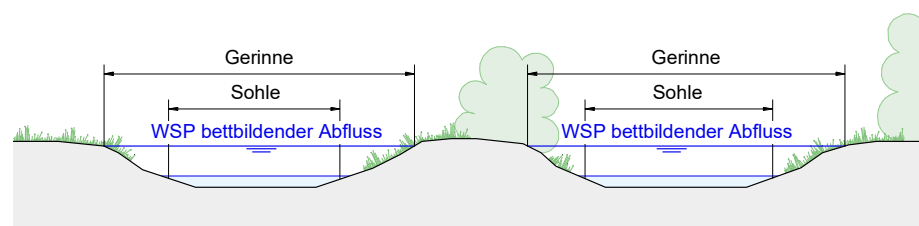
Einzelgerinne:**Einzelgerinne, verzweigte Struktur:****Mehrrarmiges Gerinne:**

Abb. 2 Schematische Darstellung der Sohlen- und Gerinnebreite sowie des bordvollen, bettbildenden Abflusses bei verschiedenen morphologischen Gerinnetypen. Der Übergang zwischen Einzelgerinne und verzweigtem Gerinne ist fließend und muss gutachterlich beurteilt werden. WSP = Wasserspiegelbreite

4 Vorgehen zur Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite

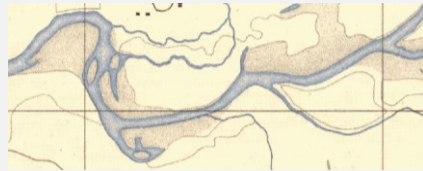
In der vorliegenden Anleitung werden verschiedene Ansätze zur Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite zusammengefasst und hinsichtlich ihrer Bandbreite und Unschärfe beurteilt. Alle vorgestellten Methoden setzen fundierte Grundlagen sowie eine gutachterliche Bewertung durch Experten voraus. Je nach Standort eignet sich eine Methode besser oder weniger gut. Das Dokument zeigt auf, wie auf Basis der vorgestellten Methoden eine plausible natürliche Sohlenbreite hergeleitet werden kann.

Ansätze?

Die unterschiedlichen Ansätze können den folgenden vier Methoden zugeteilt werden:

1. Analyse historischer Dokumente

Analyse historischer Karten, Luftaufnahmen, Gemälde, Fotos und Berichte



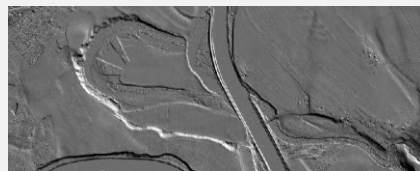
2. Analyse naturnaher Vergleichsstrecken

Analyse von aktuellen Karten und Luftbildern, Begehung im Feld



3. Terrainanalysen

Analyse von historischen Flussläufen mit Hilfe von Terrainmodellen

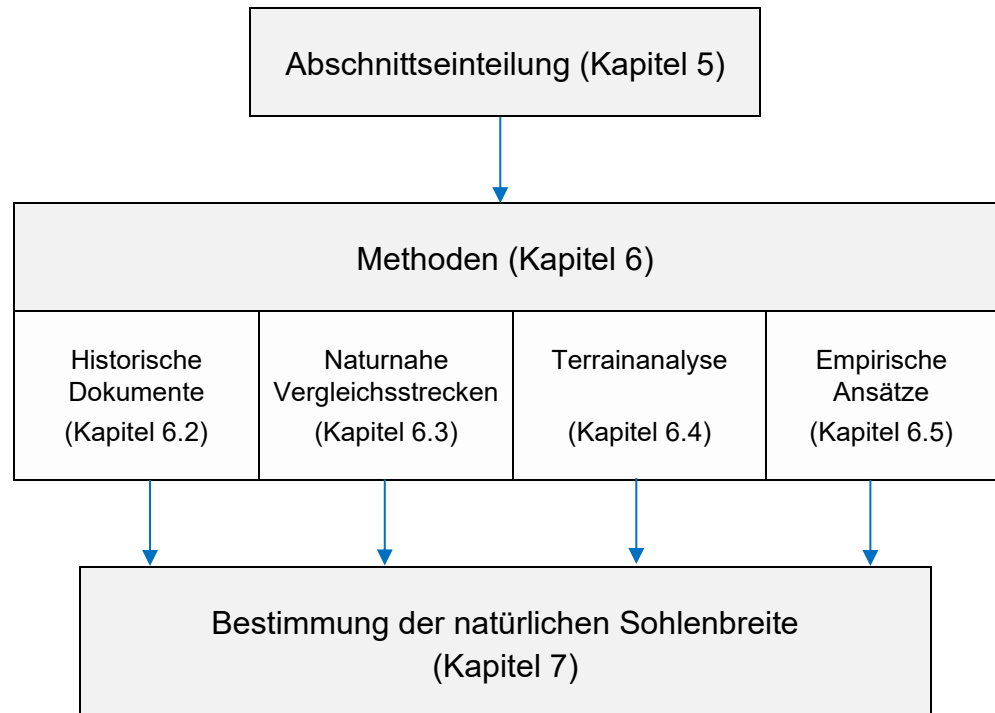


4. Empirische Ansätze

Anwendung der Regime- und der Schleppkrafttheorie

Ablauf

Der Ablauf zur Herleitung der natürlichen Sohlenbreite ist im vorliegenden Dokument wie folgt aufgebaut:

Vorgehen zur Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite*Verfügbarkeit von Grundlagen*

Im Kapitel 6 werden die Methoden und die jeweils nötigen Grundlagen vorgestellt. Häufig sind nicht für alle Ansätze qualitativ gute Grundlagen verfügbar. Wenn möglich sollen nur qualitativ gute Grundlagen auch tatsächlich für die Sohlbreitenbestimmung verwendet werden.

Anforderung an die AnwenderInnen

Die im vorliegenden Dokument beschriebenen Methoden zur Herleitung der natürlichen Sohlenbreite setzen zur Anwendung gewisse Grundkenntnisse im Flussbau voraus, da immer wieder gutachterliche Einschätzungen erforderlich sind. Empfohlen sind Grundkenntnisse über die Morphologie und natürlichen Gerinneformen von Fließgewässern sowie Grundkenntnisse im Hinblick auf die Ermittlung und die Qualität der Grundlagendaten.

5 Abschnittseinteilung

Da die Sohlenbreite von Abfluss, Geschiebefracht, Korngrößen und geologischen Einflüssen abhängt, ist es für die Ermittlung einer charakteristischen, mittleren Sohlbreite sinnvoll, Abschnitte zu bestimmen, in denen sich diese Parameter nicht ändern.

Kriterien

Kriterien zur Abschnittsbildung sind:

- Abfluss (z.B. bei Einmündung Gewässer)
- Geschiebefracht (z.B. bei Einmündung Gewässer, Hanganrissen)
- Korngrößen (z.B. bei Einmündung Gewässer, Hanganrissen, Gefällswechsel)
- Geologie (z.B. anstehender Fels)

Als Indikator, dass sich in der Morphologie etwas ändert, kann auch das Talgefälle als Unterkriterium beigezogen werden.

Eine weitere Hilfe bei der Abschnittseinteilung können historische Dokumente sein, sofern sie in guter Qualität den naturnahen Zustand wiedergeben. Sind darin deutliche Veränderungen bei der natürlichen Sohlenbreite sichtbar, die nicht anthropogen verursacht wurden, so sollte dies bei der Abschnittseinteilung berücksichtigt werden.

Erfolgt die Abschnittseinteilung mit Hilfe historischer Dokumente, so muss beachtet werden, dass die historischen Dokumente nur eine Momentaufnahme zeigen. Die Strukturen und Breiten können sich über mehrere Jahre immer wieder verlagern. Die Abschnittseinteilung sollte sich deshalb nicht nur auf historische Dokumente abstützen, sondern immer auch auf Basis der oben beschriebenen Kriterien bestimmt werden.

6 Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

Im Kapitel 6.1 folgt zunächst ein Beschrieb mit allgemein wichtigen Hinweisen zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite. In den Kapiteln 6.2 bis 6.5 sind anschliessend die unterschiedlichen Methoden bezüglich Grundlagen-aufbereitung, Anwendung und Auswertung beschrieben. Es wird auch auf Anwendungsgrenzen und Ungenauigkeiten eingegangen und empfohlen, wie damit umgegangen werden kann.

6.1 Allgemeine Hinweise zur Auswertung

Anthropogener Einfluss in den Grundlagen

Bei allen Grundlagen muss davon ausgegangen werden, dass anthropogene Einflüsse vorhanden sind, die nicht sofort erkennbar sind (z.B. nicht sichtbarer resp. nicht dargestellter Uferschutz). Auch Einflüsse auf die Hydrologie (Restwasserstrecken, Schwall-Sunk, Rodung, Landwirtschaft) oder auf den Geschiebehaushalt sind stets denkbar.

Einfluss des Geschiebehaushalts

Die natürliche Fracht beeinflusst die Gewässerbreite. Deshalb muss diese, sofern bekannt, bei der Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite berücksichtigt werden.

Einfluss von grösseren Hochwassern oder Niedrigwasserperioden

Falls in den letzten 5-10 Jahren vor dem Aufnahmezeitpunkt ein grösseres Hochwasser oder eine längere Niedrigwasserperiode eintraf, so muss dies bei der Interpretation des Gerinnebildes und der Vegetation berücksichtigt werden. Grössere Hochwasser (deutlich über dem bettbildenden Abfluss) können das Gerinne aufweiten. Umgekehrt kann das Gerinne nach einer mehrjährigen Niedrigwasserperiode zuwachsen, was zu einer geringeren Breite als im langzeitlichen Mittel führt. Um solcher Ereignisse zu erkennen, muss danach recherchiert werden. Mögliche Quellen dafür sind hydrologische Jahrbücher, Ereignischroniken oder Aufzeichnungen des jeweiligen kantonalen Amtes für Landwirtschaft oder jenes für Jagd und Fischerei.

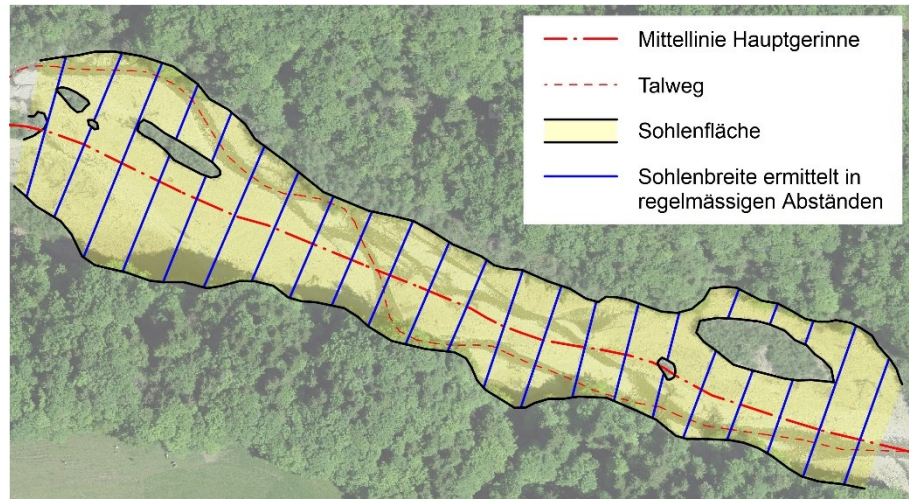
Einfluss der Jahreszeiten

Die Jahreszeit, bzw. die Vegetationsphase, in welcher eine Grundlage erhoben wurde, kann einen Einfluss auf die Flächendarstellung in den Karten, Fotos oder Gemälden haben. So wirken bewachsene Kiesbänke im Winter deutlich weniger dicht als im Sommer. Falls Informationen zum Aufnahmezeitpunkt vorliegen, hilft dies, die Grundlagen genauer zu interpretieren.

Ausmass der mittleren Sohlenbreite

Um die Sohlenbreite für einen Abschnitt zu bestimmen, können entweder in regelmässigen Abständen die Sohlenbreiten herausgemessen und der Mittelwert berechnet werden oder die Fläche der Sohle wird durch die Länge des Gewässerabschnitts geteilt. Die Länge des Gewässerabschnittes entspricht der Länge der Mittellinie des Hauptgerinnes (siehe Abb. 3).

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

**Berechnung der mittleren Sohlenbreite Variante 1:**

mittlere Sohlenbreite = $\frac{\text{Sohlenfläche}}{\text{Mittellinie Hauptgerinne}}$

Berechnung der mittleren Sohlenbreite Variante 2:

mittlere Sohlenbreite = Mittelwert aus der in regelmässigen Abständen ermittelten Sohlenbreite

Abb. 3 Ermittlung der mittleren Sohlenbreite am Beispiel der Ärgera bei Giffers (FR)

6.2 Analyse historischer Dokumente

6.2.1 Einleitung

Bei guter Qualität bilden historische Dokumente häufig die beste Grundlage zur Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite. Gute Qualität heisst, dass ein möglichst anthropogen unbeeinflusster Zustand dargestellt ist, dass die Vegetation und Kiesflächen erkennbar sind und dass, insbesondere bei Karten, eine hohe Genauigkeit vorliegt. Diese Ansprüche stehen meist im Widerspruch zu einander. Je älter die Quellen desto naturnaher ist in der Regel der Zustand, den sie abbildet. Ältere Quellen sind aber gleichzeitig meist ungenauer als neuere.

6.2.2 Historische Karten und Katasterpläne

Seit dem 19. Jahrhundert werden in der Schweiz hochwertige Karten hergestellt, die teils einen erstaunlichen Einblick in die frühere Gewässerlandschaft ermöglichen. Die meisten grossen Gewässerkorrekturen wurden ebenfalls im 19. Jahrhundert oder zu Beginn des 20. Jahrhunderts durchgeführt, wobei leider nicht alle unverbauten Flussläufe detailliert kartiert wurden. Aber auch ältere Karten aus dem 17. und 18. Jahrhundert können wertvolle Informationen liefern. Die folgende Methode beschreibt, wie die natürliche Sohlenbreite aus historischen Karten ermittelt wird und was dabei beachtet werden sollte.

Grundlagen

Als erste Anlaufstelle zur Beschaffung von historischen Karten bieten sich in der Regel die kantonalen GIS-Fachstellen an. Diese stellen meist georeferenzierte Grundlagen zur Verfügung, die auf den kantonalen Web-GIS aufgeschaltet sind. Eine weitere einfach verfügbare Anlaufstelle ist die Swisstopo (z.B. über: map.geo.admin.ch). Weiter lohnt sich die Anfrage bei den kantonalen Wasserbaufachstellen und Gemeinden zu Projektunterlagen, Archiven und Bibliotheken. Auch Suchabfragen im Internet können auf Quellen hinweisen.

Interpretation der Signaturen

Bei allen historischen Karten muss die Breite der Sohle gutachterlich abgegrenzt werden. Wasser- und vegetationsfreie Kiesflächen werden in der Regel zur Sohle gezählt. Schwieriger ist es, die Vegetation zu interpretieren. Dabei geht es vor allem darum, jüngst eingewachsene Flächen (= Sohle) von deutlich verholzten Flächen (Gehölz ab einem Alter von 3 bis 5 Jahren = keine Sohle), zu unterscheiden. Nicht immer ist der Detailierungsgrad der Signaturen ausreichend, um z.B. die Vegetation zuverlässig zuordnen zu können.

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

Uferböschungen

In der Regel kann davon ausgegangen werden, dass mit der oben beschriebenen Interpretation der Karten eher die Gerinne- als die Sohlenbreite ausgemessen wird. Das heisst die Uferböschungen sind in der ausgemessenen Breite enthalten. Für die Definition der natürlichen Sohlenbreite kann deshalb die Uferböschung noch nachträglich abgezogen werden. Der Abzug ist abhängig von der Grösse und der Gerinnemorphologie des Gewässers. Der Abzug der Breite der Uferböschung ist gutachterlich zu definieren. Als möglicher Ansatz kann die Breite der Uferböschung mit der Fliesstiefe beim bettbildenden Abfluss und einer 1:2 bis 1:3 Böschung hergeleitet werden. Bei einem mehrarmigen Gerinne ist die Anzahl der Böschungen entsprechend anzupassen. Im Zweifelsfall sollte die Breite der Uferböschung eher schmal gewählt werden, damit die natürliche Sohlenbreite nicht unterschätzt wird.

Beurteilung der Grundlage

Grundsätzlich ist eine historische Karte dann eine gute Grundlage, wenn sie:

- einen möglichst unbeeinträchtigten Naturzustand wiedergibt
- einen möglichst grossen Massstab aufweist
- möglichst detailreich gezeichnet wurde (Vegetation, Verbauungen)
- genau vermessen wurde (nicht von einer anderen Karte abgezeichnet, nicht verzerrt, georeferenzierbar)
- das Datum der Kartenerstellung bestimmt werden kann
- Informationen zu allfälligen Hochwassern oder Trockenperioden vorliegen

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

Beispiel historische Karte mit sichtbaren Kiesbänken

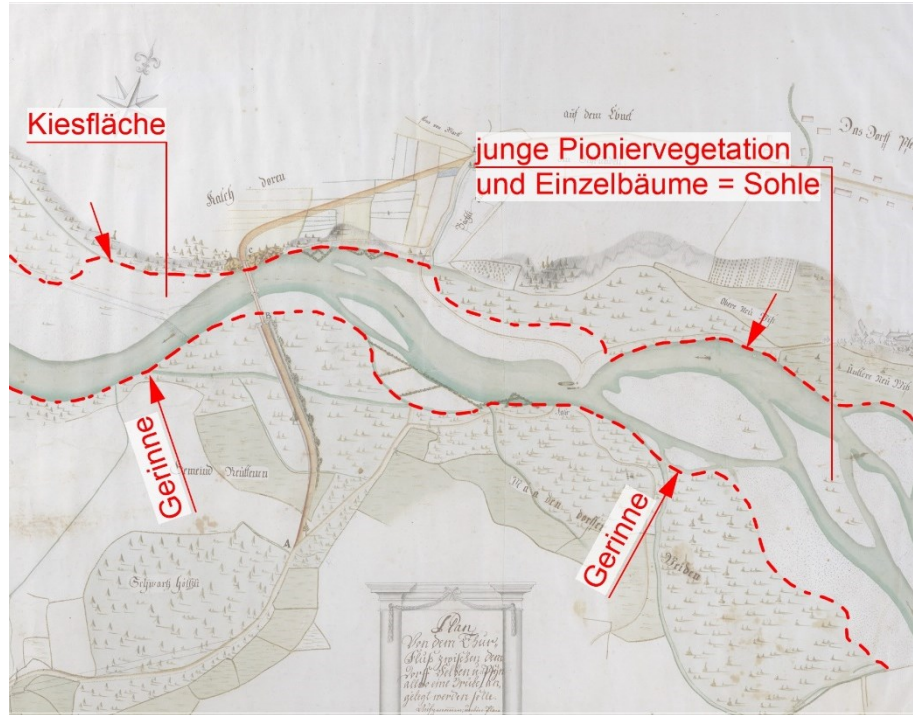


Abb. 4 Ausmass der Breite an der Thur bei Pfin (Johannes Sulzberger von 1792). Kiesflächen, Pionierstandorte und Einzelbäume werden als Sohlbereich interpretiert.

Beispiel historische Karte ohne sichtbaren Kiesbänken

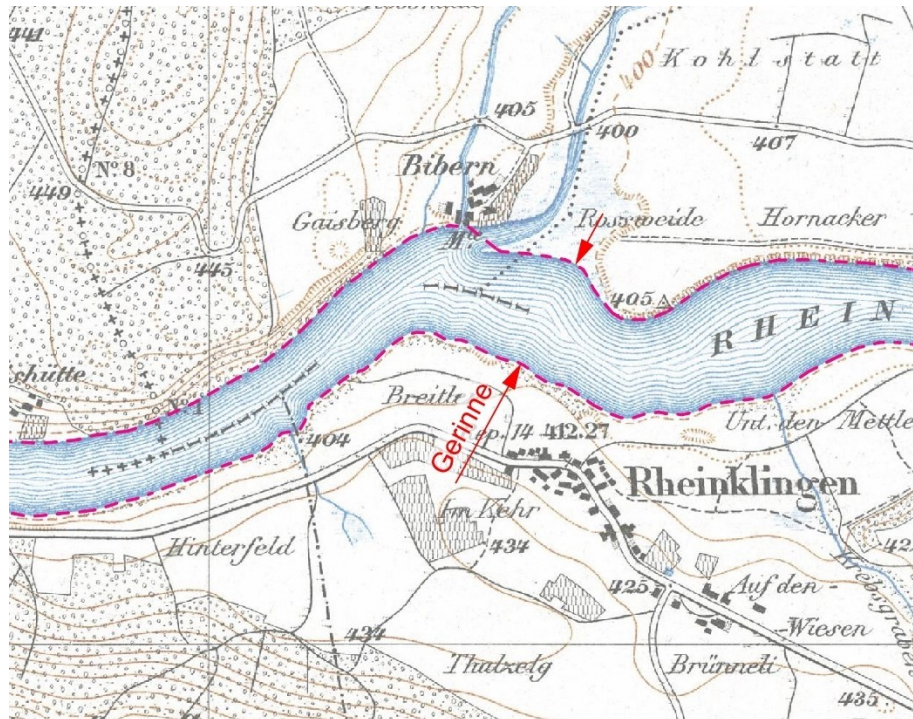


Abb. 5 Ausmass der Breite am Rhein bei Rheinklingen in der Siegfriedkarte von 1880. Da keine Kiesbänke ersichtlich sind, ist davon auszugehen, dass die Aufnahmen bei höherem Wasserstand durchgeführt wurden und dass hier deshalb die Wasserspiegelbreite ca. der Gerinnebreite entspricht.

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

Beispiel historische
Karte mit Teilgerinnen

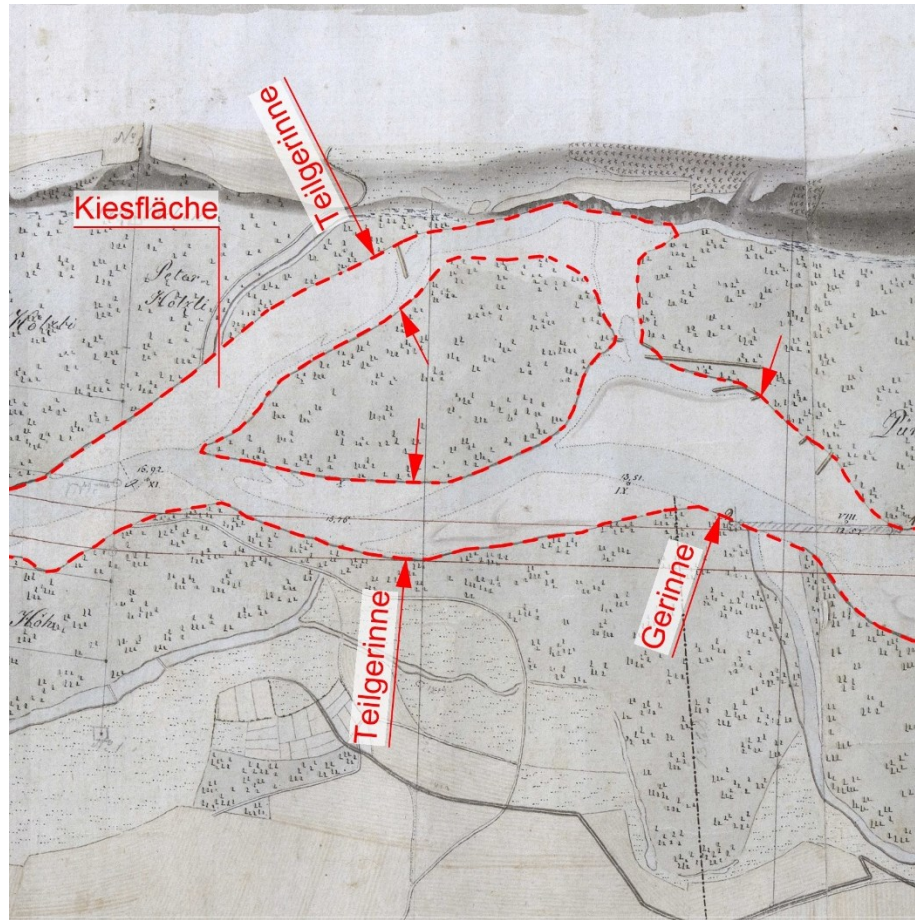


Abb. 6 Ausmass der Breite an der Thur bei Dietingen (Breitingerkarte von 1811).
Bei mehreren Teilgerinnen werden die Breiten addiert.

6.2.3 Historische Luftbildaufnahmen

Historische Luftbildaufnahmen sind, sofern sie einen naturnahen bis natürlichen Zustand zeigen, meist eine bessere Quelle als die historischen Karten. Die folgende Methode beschreibt, wie die Breite aus historischen Luftbildaufnahmen ermittelt werden kann und was dabei beachtet werden muss.

Grundlagen

Eine grosse Sammlung von historischen Luftbildaufnahmen wird von der Swisstopo¹ zur Verfügung gestellt. Weitere Quellen sind in den kantonalen Archiven zu finden.

Vorgehen

Obwohl die historischen Luftbilder meist ein detaillierteres Bild wiedergeben als die historischen Karten, muss auch hier die Breite der Sohle meist gutachterlich abgegrenzt werden. Dabei geht es vor allem darum, die deutlich verholzten Flächen (Gehölz ab einem Alter von 3 bis 5 Jahren = keine Sohle) von den freien Kiesflächen und den jüngeren Pionierstandorten (welche der Sohle angerechnet werden) zu unterscheiden (siehe Beispiele in Abb. 7 und Abb. 8). Bei der Auswertung sollten auch die allgemeinen Hinweise in Kapitel 6.1 beachtet werden.

Beurteilung der Grundlage

Grundsätzlich ist eine historische Luftbildaufnahme dann eine gute Grundlage, wenn:

- sie einen möglichst unbeeinträchtigten Naturzustand wiedergibt
- sie möglichst detailreich ist (gute Aufnahmequalität, tief geflogen)
- das Bild georeferenzierbar ist
- die Aufnahme zeitlich zugeordnet werden kann
- Informationen zu allfälligen Hochwassern oder Trockenperioden vorliegen

Hinweise zur Auswertung

Da sich die das Erscheinungsbild der Vegetation mit den Jahreszeiten verändert, spielt bei der Interpretation der Luftbilder der Aufnahmezeitpunkt eine wichtige Rolle. Um die Vegetation gut zu erkennen, werden Luftbilder, welche im Sommer aufgenommen wurden, bevorzugt. Bei hoher Auflösung können aber auch Luftbilder aus der Zeit der Vegetationsruhe nützlich sein, da das Laub in den Bäumen die Sicht auf das Gewässer nicht verdeckt (siehe auch Kapitel 3: Natürliche Sohlenbreite und morphologische Einordnung). Wichtig ist zu beachten, dass der Schattenwurf von Gelände und Vegetation, sowie das Kronendach grosser Bäume die Sichtbarkeit beeinflussen können. Im Zweifelsfall gilt wie bei den historischen Karten, dass die Pioniervegetation

¹ Luftbilder von Swisstopo können online auf map.geo.admin.ch bezogen werden

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

zum Sohlbereich dazugezählt werden soll, damit die Sohlenbreite nicht unterschätzt wird.

Beispiele
historischer
Luftbildaufnahmen

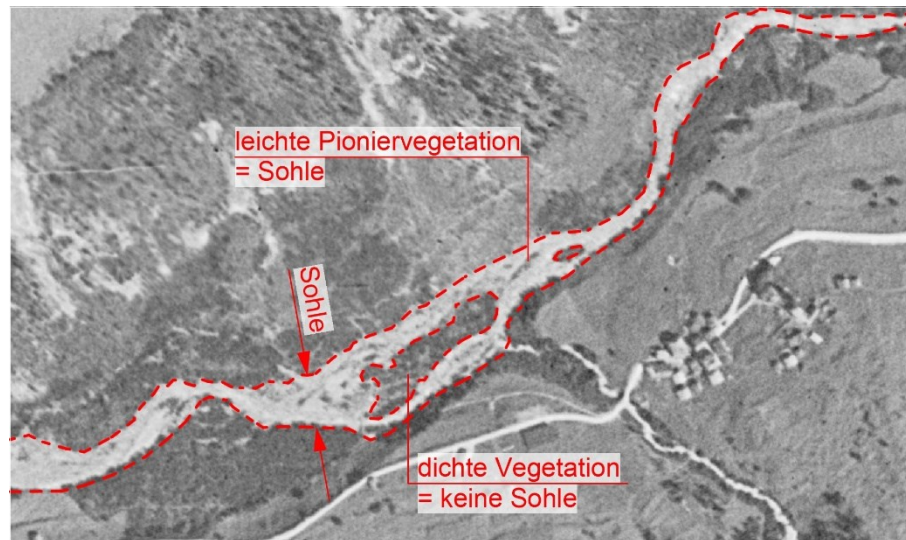


Abb. 7 Ticino bei Ossasco, Luftbild von 1946 (map.geo.admin.ch)

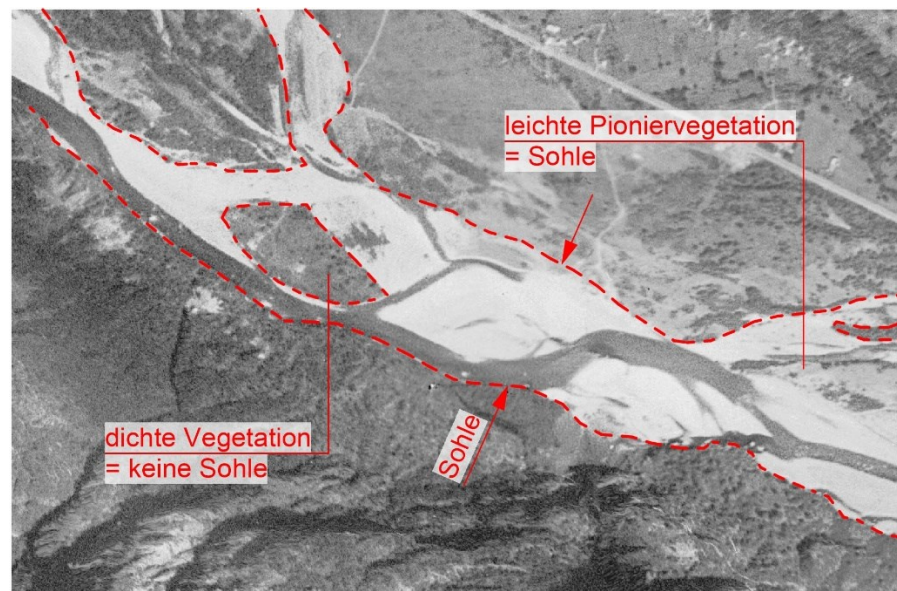


Abb. 8 Maggia bei Riveo, Luftbild von 1946 (map.geo.admin.ch)

6.2.4 Historische Fotos und Gemälde

Historische Fotos und Gemälde können besonders informativ sein, da sie unter den historischen Grundlagen häufig am detailreichsten sind. Zudem bilden Gemälde meist die ältesten brauchbaren Quellen. Das Ausmass der Sohlenbreite ist jedoch häufig nur mithilfe von klaren Landschaftsmarken möglich. Historische Fotos und Gemälde sind aber insbesondere in Kombination mit anderen historischen Grundlagen wertvoll, weil sie helfen, diese zu interpretieren. Die folgende Methode beschreibt, wie die natürliche Sohlenbreite aus historischen Fotos und Gemälden ermittelt werden kann und was dabei beachtet werden muss.

Grundlagen

Historische Fotos und Gemälde sind in der Regel die am schwierigsten zu beschaffenden Grundlagen. Fotos sind teilweise aus Dokumentationen von frühen Bauausführungen verfügbar. Die Technik der Fotografie kam aber erst Mitte des 19. Jh. langsam auf und war deshalb für viele der ersten Flusskorrekturen in der Schweiz noch nicht verfügbar. Gemälde sind hingegen mit teilweise erstaunlichem Detailreichtum vorhanden. Hier bietet sich an, nach regionalen Landschaftsmalern zu suchen. Kantonale Archive, Bibliotheken und Museen sind gute Anlaufstellen.

Vorgehen

Die Sohle ist auf den Ansichten zwar meist gut erkennbar, sie kann aufgrund der Perspektive jedoch nicht direkt ausgemessen werden. Es müssen deshalb über Landschaftsmarken (z.B. Brücken oder Terrainverläufe, siehe Beispiele Abb. 9 und Abb. 10), die auch noch heute sichtbar sind, Referenzpunkte definiert werden. So kann die historische Breite auf aktuelle Karten oder Luftbilder übertragen und dann dort herausgemessen werden. Fotos und Gemälde können auch wertvolle Informationen zur Beschaffenheit der Vegetation, der Uferböschungsbreite und zu Ufersicherungen geben. Dies hilft bei der Interpretation von historischen Karten. Bei der Auswertung müssen die allgemeinen Hinweise in Kapitel 6.1 beachtet werden.

Hinweise zur Auswertung

Bei Gemälden muss beachtet werden, dass bei der Entstehung nicht unbedingt die Massstäblichkeit (bzw. die Proportionalität) im Vordergrund stand und dass Details der künstlerischen Freiheit und nicht der damaligen Realität entsprachen.

Beurteilung der Grundlage

Grundsätzlich ist ein historisches Foto oder ein Gemälde dann eine gute Grundlage, wenn:

- es einen möglichst unbeeinträchtigten Naturzustand wiedergibt
- es möglichst detailreich ist bzw. eine gute Aufnahmequalität hat
- eindeutige Landschaftsmarken zum Ausmass vorhanden sind
- das Bild zeitlich zugeordnet werden kann
- Informationen zu allfälligen Hochwassern oder Trockenperioden vorliegen

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

Beispiele
historischer Fotos
und Gemälde

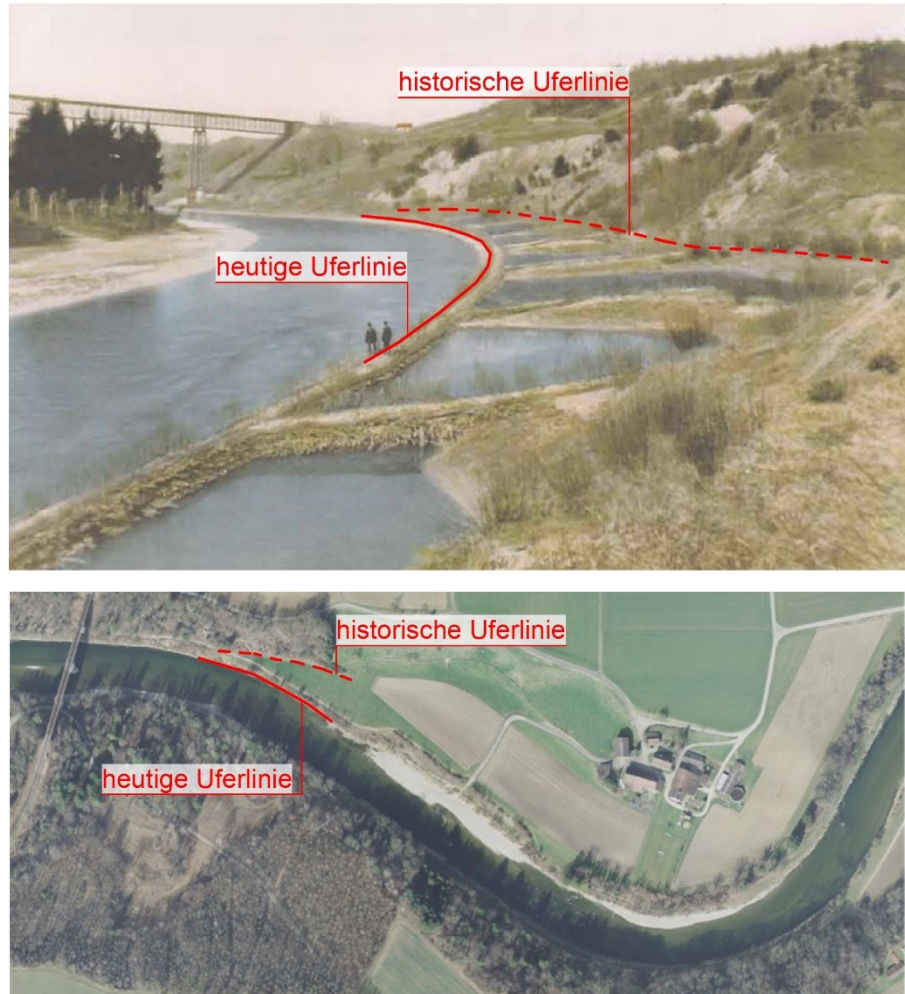


Abb. 9 Ausmass der natürlichen Sohlenbreite an der Thur oberhalb Kleinandelfingen, Foto von 1882 = Bild oben, heutiger Zustand = Bild unten

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

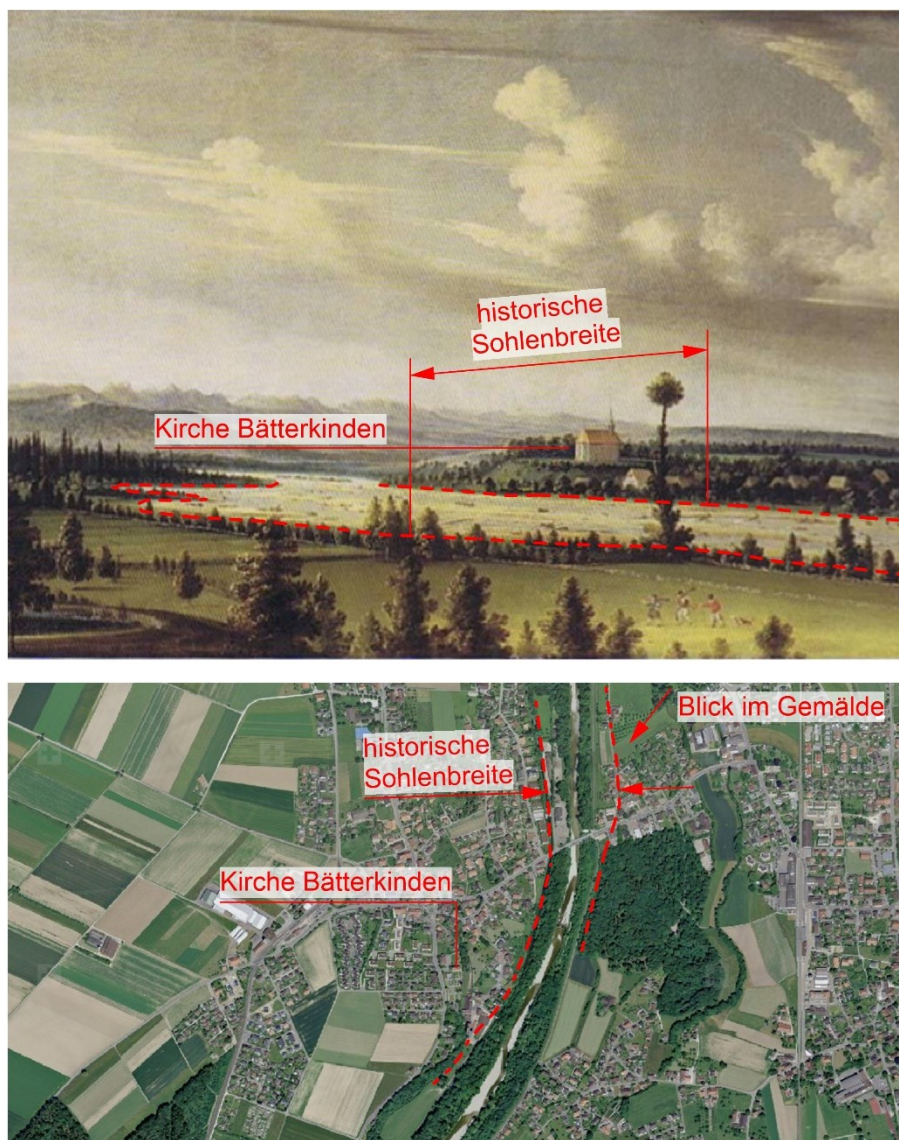


Abb. 10 Ausmass der natürlichen Sohlenbreite der Emme bei Utzenstorf.
Bild oben: Emme vor der Korrektur. Blick vom Schloss Landshut
flussaufwärts (Quelle [22])

6.2.5 Berichte und Pläne früherer Wasserbauprojekte

Berichte und Pläne früherer Wasserbauprojekte bilden meist hervorragende Grundlagen, sofern es sich um eine sogenannte Erstkorrektur handelt. Da der Fokus beim Gewässer lag, weisen diese Quellen meist einen höheren Detaillierungsgrad und einen grösseren Massstab auf als z.B. bei historischen Landkarten. Zudem geben die Berichte häufig Auskunft zu früheren Ereignissen (Hochwassern, Dürreperioden, Geschiebe), was auch bei der Interpretation anderer Quellen hilfreich ist.

Grundlagen

Berichte und Pläne früherer Wasserbauprojekte können meist in den kantonalen Archiven gefunden werden.

Vorgehen

Wie bei den historischen Karten muss die Breite der Sohle auch bei historischen Plänen gutachterlich abgegrenzt werden. Dabei geht es vor allem darum, die eingewachsenen Flächen von den freien Kiesflächen, welche der Sohle angerechnet werden, zu unterscheiden (siehe auch Unterscheidung zwischen Gerinne und Sohle in Abb. 2).

Häufig ist es schwierig, bei historischen Plänen scharf abzugrenzen, welche Flächen Bestandteil der Sohle sind und welche nicht. Wie in Kapitel 3 beschrieben, weist die Sohle, wenn überhaupt, nur eine sehr junge Pioniervegetation auf (maximal 2 bis 5 Jahre alt). Dies ist in den Plänen in der Regel nicht klar zu erkennen. Im Zweifelsfall soll die Fläche zur Sohle gezählt werden, um die natürliche Sohlenbreite nicht zu unterschätzen. Eine grosse Hilfe können auch historische Querprofilaufnahmen sein. Bei der Auswertung müssen die allgemeinen Hinweise in Kapitel 6.1 beachtet werden.

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

Beurteilung der Grundlage

Grundsätzlich sind Unterlagen zu früheren Wasserbauprojekten dann eine gute Grundlage, wenn:

- der Zustand vor Massnahmen detailliert dokumentiert und genau vermessen wurde (nicht von einer anderen Karte abgezeichnet, nicht verzerrt, georeferenzierbar)
- die Pläne einen möglichst grossen Massstab aufweisen
- wenn der Zustand vor Massnahmen einen möglichst unbeeinträchtigten Naturzustand wiedergibt
- die Aufnahmen des Zustandes vor Massnahmen zeitlich zugeordnet werden können
- Informationen zu allfälligen Hochwassern oder Trockenperioden vorliegen

Beispiele früherer Wasserbauprojekte

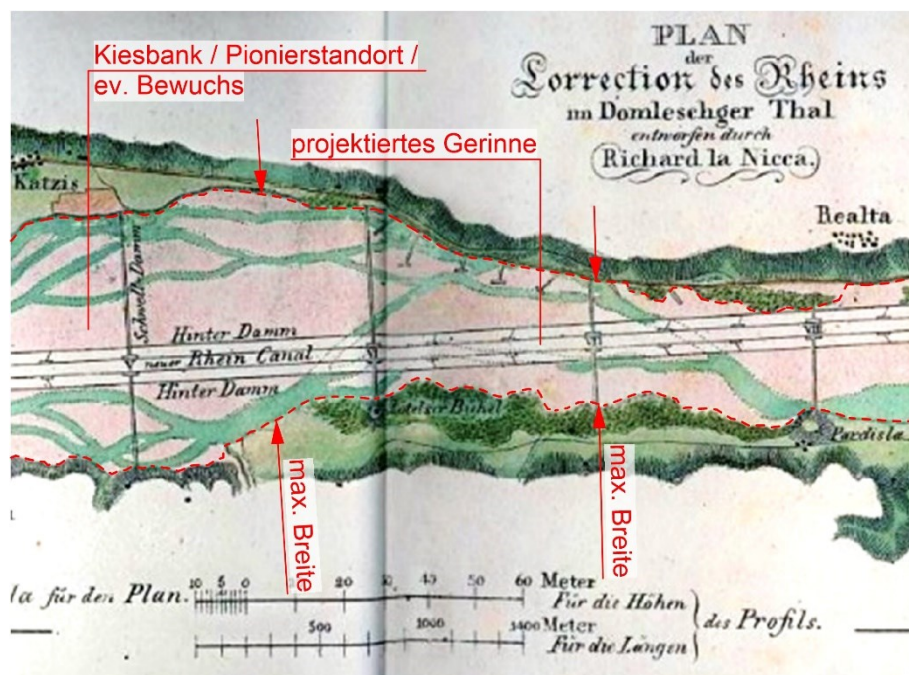


Abb. 11 Hinterrhein Domleschg, Plan von R. la Nicca ca. 1850

Das jetzige Emmenbett ist sehr unregelmässig, nicht nur weil es in seiner Richtung viele Krümmungen zeigt, sondern namentlich weil seine **Breitenangaben Ist-Zustand** im Allgemeinen zu stark ist und weil diese überdies so sehr variiert, daß durch die unregelmässige und **Breitenangaben Ist-Zustand** maler Stellen von oft nur geringer Länge große Störungen im Laufe des Wassers entstehen.

Von Kirchberg bis Aefligabücke, auf einer Länge von circa 7900 Fuß variiert die Breite zwischen den Uferschwellen von **200 bis 300 Fuß**. Von letzterer Brücke bis zur Untergrenze von Fraubrunnen, bei der Alp, auf ungefähr 7600 Fuß Länge, beträgt die Breite meistens **150 bis 200 Fuß**. Von der Alp abwärts bis zur Bätterkindenbrücke, auf einer Strecke von 9200 Fuß, ist die Breite des Flussbettes nirgends **größer als 160 Fuß** ausgenommen bei der Brücke selbst, wo sie zwischen den Schwellen **220 Fuß** beträgt (die Brücke hat zwischen den Widerlagern eine Oeffnung von **245 Fuß**). Auf dieser Flussabtheilung kommen aber einige Verengungen bis auf 100, ja selbst bis auf 80 Fuß vor. Unterhalb dieser Brücke ist, zwar nur auf einer Länge von 1000 Fuß, wieder ein breites Bett von **180 bis 230 Fuß**. Dann folgt bis zur Einmündung des Rimpbaches, auf einer Länge von ungefähr 800 Fuß, eine Abtheilung, auf welcher die Sohle sich von **170' bis auf 50 Fuß** verengt. Unterhalb der Rimpbach Einmündung kommen nur einige Bruchstücke von Streichschwellen vor und zwar nur auf der rechten Seite des Flusses. Auch gleicht die Emme auf dieser letzten Strecke von 5700 Fuß Länge ganz einem sich selbst überlassenen und verwilderten Bergstrom.

Abb. 12 Ausschnitt aus dem technischen Bericht der Emmenkorrektion von Kirchberg bis zur Kantonsgrenze Solothurn (1873)

6.3 Analyse naturnaher Vergleichsstrecken

Naturnahe Vergleichsstrecken sollten möglichst die gleichen Randbedingungen (siehe Parameter Abschnittseinteilung Kap. 5) aufweisen wie der Untersuchungsabschnitt. Gegenüber diesem bestehen jedoch keine oder nur wenige bauliche Restriktionen. Wenn möglich, sollte die Vergleichsstrecke am selben Gewässer und möglichst nah am Untersuchungsabschnitt liegen, damit die Vergleichbarkeit gegeben ist. Liegt der Referenzabschnitt z.B. ober- oder unterhalb eines grösseren Zuflusses, so muss mit einem anderen Abfluss und Geschiebehauhalt gerechnet werden, was die Vergleichbarkeit mit dem Untersuchungsabschnitt erschwert.

Grundlagen

Folgende Grundlagen dienen bei der Auswertung:

- Datensatz Ökomorphologie Stufe F
- Aktuelle Karten mit möglichst grossem Massstab
- Aktuelle Luftbildaufnahmen
- Feldbegehung

Vorgehen

Um naturnahe Vergleichsstrecken zu finden, können der Datensatz "Ökomorphologie Stufe F" sowie aktuelle Luftbildaufnahmen und Karten beigezogen werden. Im Idealfall wird die Vergleichsstrecke nicht durch Verbauungen eingeengt. Aber auch ein leicht verbautes Gerinne kann wichtige Informationen liefern. Bildet sich zum Beispiel innerhalb des leicht verbauten Gerinnes verholzte Vegetation aus, so zeigt dies, dass die heutige Sohle in etwa einer natürlichen Breite entspricht. Ist hingegen noch keine ausgeprägte Vegetation zwischen den Uferverbauungen sichtbar, kann die natürliche Sohle breiter sein als in der Vergleichsstrecke.

Das Ausmessen von Vergleichsstrecken erfolgt in der Regel anhand von Luftbildaufnahmen. Bei schwierig zu interpretierenden Luftbildern (z.B. keine Vegetation oberhalb der Baumgrenze, Schattenwurf oder ins Gerinne ragende Bäume) könnte zusätzlich ein Terrainmodell zur Beurteilung der Gerinne und Sohlenstruktur beigezogen werden (siehe auch Unterscheidung zwischen Gerinne und Sohle in Abb. 2 sowie Methode 6.4 Terrainanalyse).

Zur Erkennung allfälliger versteckter Ufersicherungen und zur Verifikation der Resultate empfiehlt es sich, eine Begehung der Vergleichsstrecke durchzuführen. Bei der Auswertung müssen die allgemeinen Hinweise in Kapitel 6.1 beachtet werden.

Beurteilung der Grundlage

Grundsätzlich ist eine naturnahe Vergleichsstrecke dann eine gute Grundlage, wenn:

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

- Abfluss, Geschiebefracht, Korngrößen, Gefälle und die Geologie mit jenem des eigentlichen Untersuchungsperimeters vergleichbar sind
- sie einen möglichst unbeeinträchtigten Naturzustand wiedergibt
- Informationen zu allfälligen Hochwassern oder Trockenperioden vorliegen

*Hinweise zur
Auswertung*

Folgendes ist bei der Auswertung naturnaher Vergleichsstrecken zu beachten:

- Wegen vorangegangenen grösseren Hochwassern oder Niedrigwasserperioden kann das Gerinne zum Zeitpunkt der Aufnahme breiter oder schmaler als im langjährigen Mittel sein. Um solche Situationen zu erkennen, sollten alle über einen möglichst grossen Zeitraum zur Verfügung stehende Luftbilder ausgewertet werden. Dann muss in den hydrologischen Jahrbüchern nach grösseren Hochwassern und mehrjährigen Trockenphasen gesucht werden (siehe Kapitel 6.2.3 Historische Luftbildaufnahmen).
- Da sich das Erscheinungsbild der Vegetation mit den Jahreszeiten verändert, spielt bei der Interpretation der Luftbilder der Aufnahmezeitpunkt eine wichtige Rolle. Um Verbuschungen und Grasnarben zu erkennen, werden Luftbilder, welche im Sommer aufgenommen wurden, bevorzugt. Bei hoher Auflösung können aber auch Luftbilder aus der Zeit der Vegetationsruhe nützlich sein, da das Laub in den Bäumen die Sicht auf das Gewässer nicht verdeckt (siehe auch Kapitel 3: Natürliche Sohlenbreite und morphologische Einordnung). Wichtig ist zu beachten, dass der Schattenwurf von Gelände und Vegetation, sowie das Kronendach grosser Bäume die Sichtbarkeit beeinflussen können.
- Im Zweifelsfall gilt wie bei den anderen Grundlagen, dass die Pioniervegetation zum Sohlbereich dazugezählt werden soll, damit die Sohlenbreite nicht unterschätzt wird.

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

Beispiel einer
naturnahen
Vergleichsstrecke

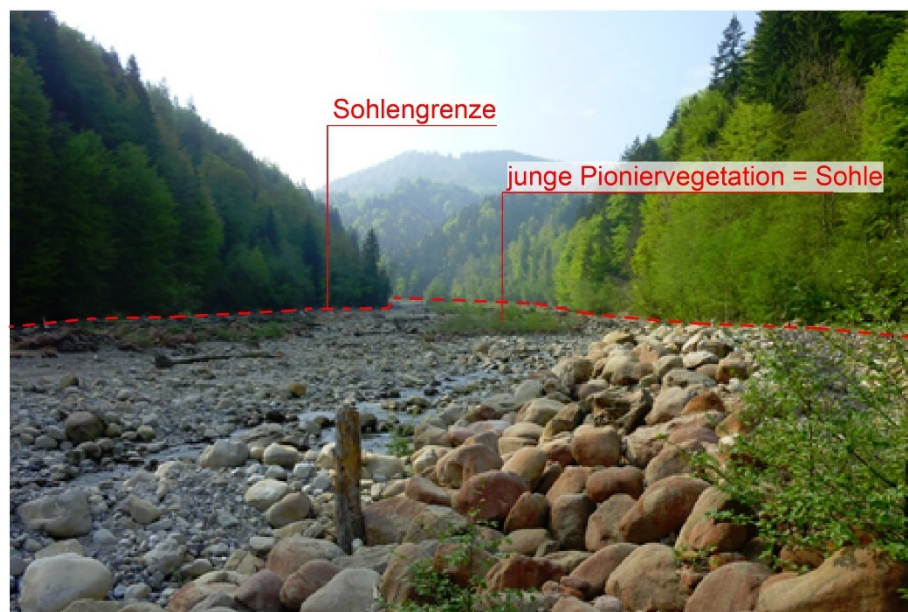


Abb. 13 Die Entle oberhalb Entlebuch

6.4 Terrainanalyse

Bei der Terrainanalyse werden alte Flussläufe oder naturnahe Vergleichsstrecken (siehe Kapitel 6.3, Analyse naturnaher Vergleichsstrecken) mit Hilfe von Terrainmodellen vermessen. Heute noch sichtbare alte Flussläufe finden sich insbesondere bei grösseren Flüssen in breiten Talebenen. Hier ist die Terrainanalyse eine Möglichkeit, um Informationen zur natürlichen Sohlenbreite und Gerinneform zu erhalten.

Grundlagen

Die Terrainanalyse erfolgt mit Hilfe eines digitalen Terrainmodells (DTM). Die Rasterweite beträgt im Idealfall ca. 0.5 m und sollte nicht mehr als 2 m betragen. Des Weiteren helfen aktuelle Luftbilder und Karten zur Orientierung sowie historische Karten zur Verifikation der Strukturen.

Vorgehen

Um die Strukturen sichtbar zu machen, muss aus dem DTM ein Reliefmodell (Hillshade) und ein farblich fein abgestuftes Höhenmodell erstellt werden (siehe Abb. 14). Die Brauchbarkeit der sichtbaren Strukturen ist jeweils gutachterlich abzuwägen. Beim Ausmessen von Altläufen, insbesondere bei mehrarmigen Gerinnen, ist darauf zu achten, dass die jeweils zusammengezählten Altläufe gleichzeitig auch aktiv waren. Der Vergleich mit historischen Dokumenten kann dabei helfen, die zusammengehörenden Strukturen zu erkennen. Bei der Auswertung müssen die allgemeinen Hinweise in Kapitel 6.1 beachtet werden.

Hinweise zur Auswertung

Folgende Aspekte sind bei der Terrainanalyse zu beachten:

- Nicht mehr aktive Gerinnestrukturen tendieren dazu wegen Terrainanpassungen und/oder Zuwachsen schmaler zu wirken, als sie ursprünglich waren.
- Es ist wichtig zu wissen, ob ein Altarm zu einem ehemals mehrarmigen Gerinne gehörte oder ob es sich um ein Einzelgerinne handelte. Bei einem ehemals mehrarmigen Gerinne gibt die Breite eines Altarms nicht die gesamte Sohlenbreite wieder.

Beurteilung der Grundlage

Grundsätzlich ist eine Terrainanalyse dann eine gute Grundlage, wenn:

- die Strukturen möglichst wenig durch den Menschen beeinflusst wurden
- die ursprüngliche Morphologie (ein- oder mehrarmig) bekannt ist
- das Reliefmodell genau genug ist (0.5 - 2m Rasterweite) bzw. sogar Original-Rasterpunkte vorhanden sind

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

Beispiel
Terrainanalyse

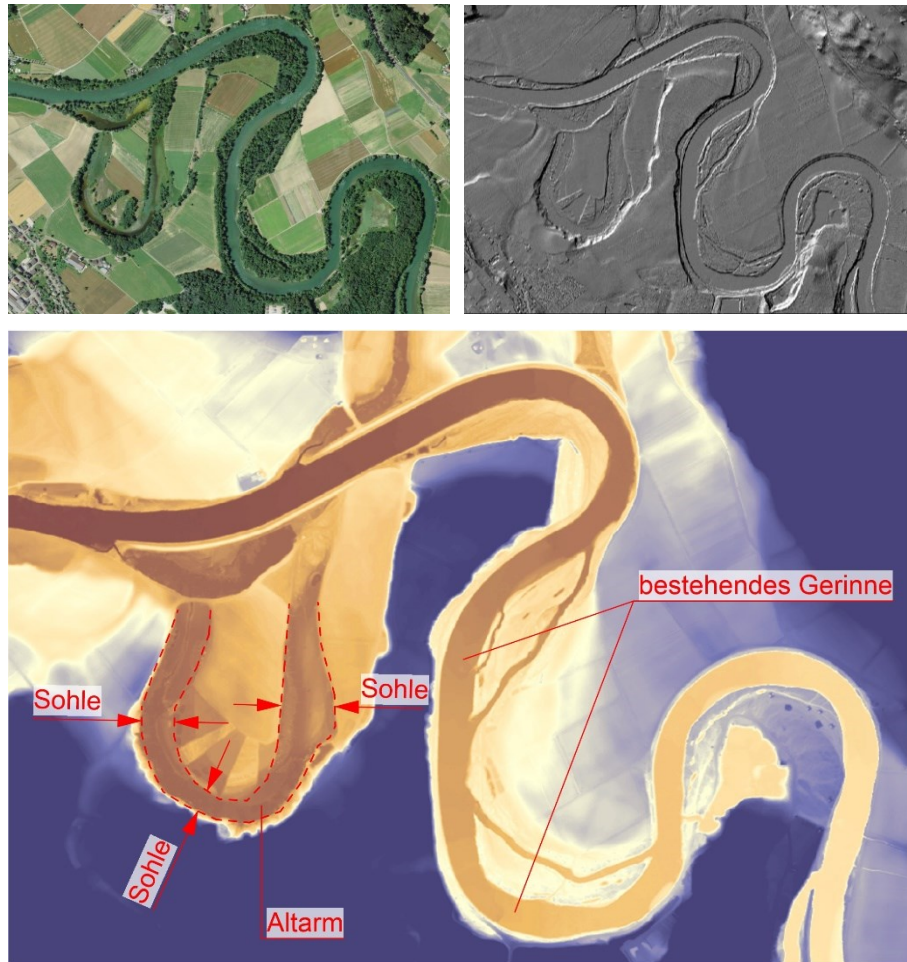


Abb. 14 Die Reuss bei Fischbach-Göslikon (AG)

6.5 Empirische Ansätze

6.5.1 Einleitung

Es gibt verschiedene empirische Ansätze zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite. Bei den Ansätzen kann grundsätzlich zwischen der Regimetheorie und der Schleppkrafttheorie unterschieden werden.

Regimetheorie

In der Regimetheorie wird davon ausgegangen, dass die Ausprägung des Flusses mit einigen wenigen Parametern beschrieben werden kann. Naturbeobachtungen ergaben, dass sich die charakteristischen Parameter wie Breite (B), Gefälle (J) und Abflusstiefe (h) als Potenzfunktion des Abflusses (Q) darstellen lassen. Viele Autoren (vgl. Zeller [27], Yalin [23]) publizierten Regimeformeln von der Form $B=a Q^r$, $J= b Q^s$ $h=c Q^t$, in welchen aufgrund von Naturbeobachtungen die Konstanten a, b, c und die Exponenten r, s, t definiert wurden. Dabei wurden in der Regel die Regressionen aus Messdaten ermittelt, die eine grosse Streuung aufwiesen. Bei der Anwendung von Regimeformeln ist zu berücksichtigen, dass diese das «Regime» des Flusses erfassen, d.h. dass alle Parameter B, J und h aufeinander abgestimmt sein müssen. Eine Veränderung der einen Grösse setzt auch eine Anpassung der anderen voraus.

Schleppkrafttheorie

Eine Alternative zur Regimetheorie stellt die Schleppkrafttheorie dar. Diese basiert auf physikalischen Beziehungen zwischen Abfluss, Abflusstiefe, Gefälle und Breite, wobei die Konstanten und Exponenten in den Formeln häufig in Laborversuchen ermittelt wurden. Die Schleppkrafttheorie basiert auf der Schubspannung, welche die hydraulische Belastung erfasst, und dem Shields-Parameter, welcher die hydraulische Belastung ins Verhältnis zum Widerstand eines Korns in der Sohle setzt. Geschiebetriebformeln wie z.B. diejenige von Meyer-Peter und Müller [14] sind typische Vertreter der Schleppkrafttheorie. Zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite steht ein Ansatz von Ikeda [13] zur Verfügung.

In diesem Kapitel wird hauptsächlich auf Formeln der Regimetheorie eingegangen, da diese Theorie auf die Frage der natürlichen Sohlenbreiten fokussiert ist.

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

*Einfluss der
Geschiebefracht*

Keiner der gängigen empirischen Ansätze berücksichtigt den Parameter Geschiebefracht, obwohl dieser einen grossen Einfluss auf die Breitenbildung von Fliessgewässern hat. Dass die Geschiebefracht nicht berücksichtigt wird, trägt zur Unsicherheit der empirischen Ansätze bei. Die Literatur (z.B. Parker [19]) zeigt aber, dass es sinnvoll und physikalisch richtig wäre, Geschiebe in die empirischen Methoden zu integrieren, was aber aufgrund mangelnder Datengrundlagen bisher nicht gemacht wurde.

*Konzept zur
Einordnung der
empirischen Ansätze*

Die Untersuchungen verschiedener Autoren (Yalin [23], Parker [19], Ashmore [7], Millar [16], weitere Autoren im Anhang A) zeigen, dass die natürliche Breite eines Flusses vom Abfluss, dem Gefälle und dem Korndurchmesser des Sohlenmaterials abhängt. Die Auswertung zahlreicher Naturdaten ergibt aber immer eine grosse Streuung. Millar zeigte, dass die grosse Streuung eine Folge der unterschiedlichen Einzugsgebietscharakteristiken, insbesondere auch der Uferbeschaffenheit, ist. Das von Millar beschriebene Konzept der optimalen Transporteffizienz kann auch ins Konzept von Requena [20] mit der Gleichgewichtsbreite und der Grenzbreite integriert werden.

Gleichgewichtsbreite

Die Gleichgewichtsbreite ist jene Breite, die sich eigendynamisch bei linearen Strömungsverhältnissen bildet. Das heisst, dass bei der Gleichgewichtsbreite keine Querströmungen die Gerinnebreite zusätzlich erweitern. Mit Gleichgewicht ist gemeint, dass ausgehend von einem noch künstlich eingegengten Gerinne, bei Entfernung des Uferbaus eine eigendynamische Aufweitung mindestens so weit stattfindet bis sich ein Gleichgewicht bei der Sohl- und Uferstabilität bildet.

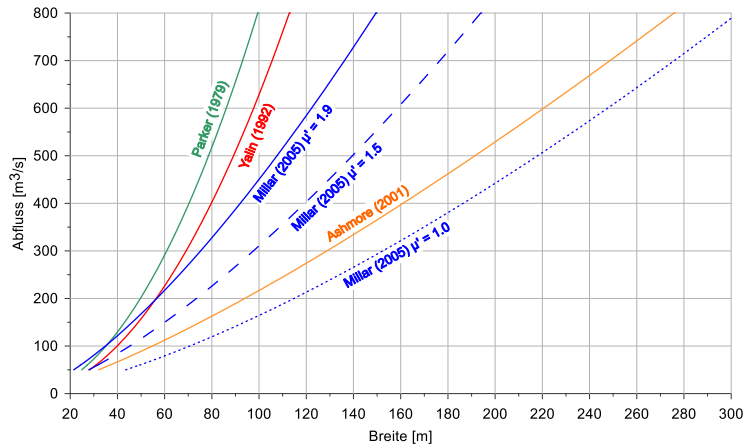
Grenzbreite

Die Grenzbreite ist jene Breite, die sich maximal in einem natürlichen Gewässer bildet. Im Unterschied zur Gleichgewichtsbreite werden in der Grenzbreite Querströmungen berücksichtigt, die zur Breitenbildung beitragen.

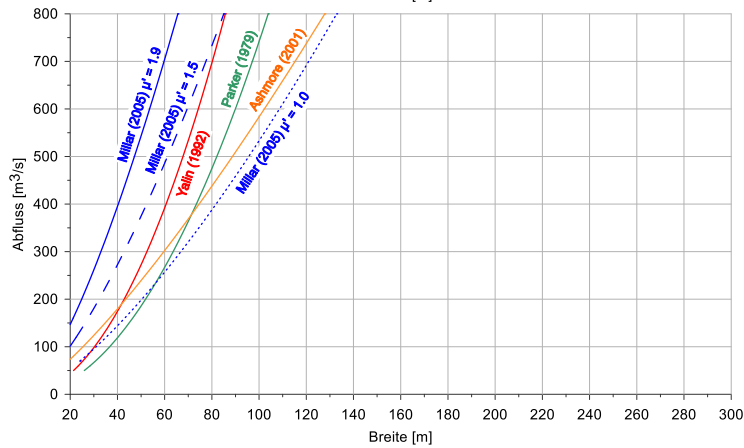
Die Gleichgewichtsbreite stellt im Konzept von Requena [20] die untere Grenze der Bandbreite möglicher natürlicher Sohlenbreiten dar, die Grenzbreite die obere. Für beide Grenzen bestehen Ansätze (Abb. 15): Yalin [23] und Parker [19] geben eher einen Wert für die untere Bandbreite, Ashmore [7] eher einen oberen Wert an. Millar [16] erfasst zudem den Effekt der Böschungstabilität. Seine Beziehung liefert Werte zwischen der Gleichgewichts- und der Grenzbreite.

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

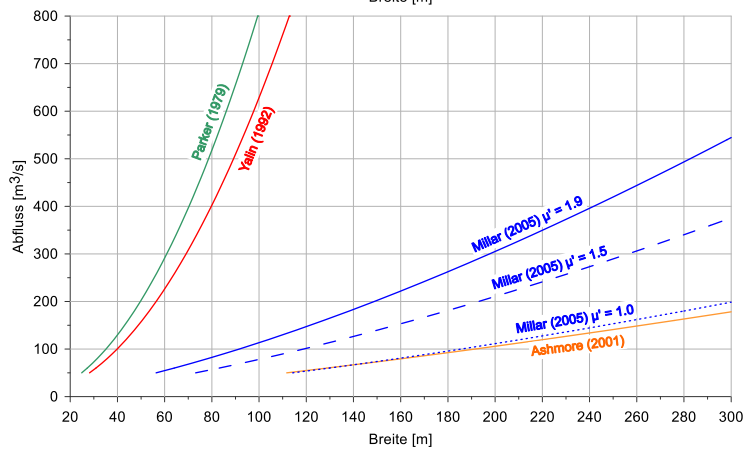
Gefälle = 0.2 %
 dm = 2 cm



Gefälle = 0.2 %
 dm = 6 cm



Gefälle = 1.0 %
 dm = 2 cm



Gefälle = 1.0 %
 dm = 6 cm

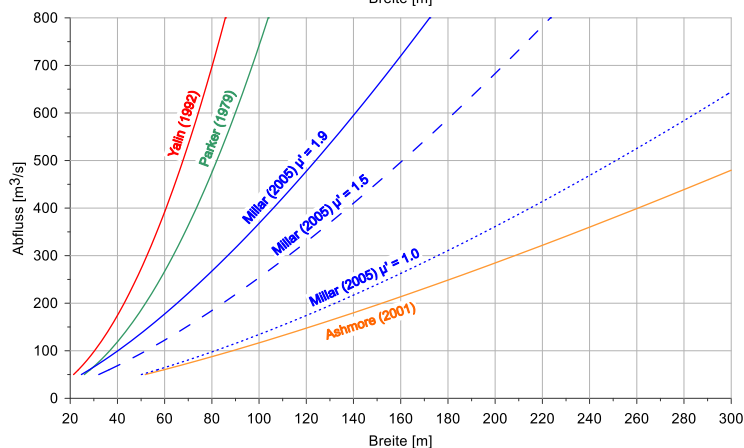


Abb. 15 Sohlenbreite aus verschiedenen Formeln bei Variation des Gefälles und des Korndurchmessers

6.5.2 Anwendung der empirischen Ansätze

Alle empirischen Ansätze gehen von einem Gewässer aus, welches sich in einem stabilen Zustand befindet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden einzelne Formeln ausgewählt², der Hintergrund der Formel analysiert und diese bezüglich ihrer Position³ zwischen Gleichgewichts- und Grenzbreite (siehe Kapitel 3) eingeordnet. Dabei wurde angenommen, dass die Morphologie eines Flusses bestimmt, ob eher die Gleichgewichts- oder die Grenzbreite stärker zu gewichten sei (Abb. 16).

Anwendungsbereich der empirischen Formeln

Bei der im vorliegenden Dokument beschriebenen Anwendung der empirischen Formeln handelt es sich um einen Vorschlag, der sich auf die Einteilung der empirischen Ansätze von Requena [20] abstützt. Diese Einteilung ist stark vereinfacht und deckt nicht jeden Fall präzise ab. Detaillierte Informationen zum Anwendungsbereich der empirischen Formeln sind den Originalpublikationen zu entnehmen.

Zusätzliche Hinweise zur Anwendung der empirischen Formeln können dem Fachbericht «Die erforderliche Geischiebefracht» von Schälchli und Hunzinger (2021) [5] entnommen werden.

Yalin

Die Formel von Yalin [23] basiert auf der Annahme, dass sich bei der berechneten Breite das Gerinne in einem stabilen Zustand (keine Erosion der Böschungsfusspunkte) befindet. Diese Situation entspricht der Gleichgewichtsbreite (Breite nach primärer Seitenerosion) im Gedankenmodell von Requena [20].

Gleichgewichtsbreite nach Yalin⁴: $SB = 1.5 \cdot Q^{0.5} / dm^{0.25}$

² Eine Formel, welche universell einsetzbar ist und welche die effektiven Verhältnisse am besten erfasst, gibt es nicht. Die Auswahl erfolgte einerseits aufgrund der beim Autor vorhandenen Erfahrungen mit den vorgeschlagenen Formeln und andererseits aufgrund der Empfehlungen von P. Requena [20].

³ Die Einordnung ist vergleichbar mit derjenigen von Requena [20]

⁴ Nomenklatur: Werte ausgelegt für den Referenzzustand (siehe Definition im Glossar), eine mögliche Übernahme der Daten aus dem Ist-Zustand muss geprüft werden.

SB	= natürliche Sohlenbreite
ρ_g	= Dichte Wasser = 2650 kg/m ³
ρ_w	= Dichte Wasser = 1000 kg/m ³
g	= Erdschwerebeschleunigung = 9.81 m/s ²
Q	= bettbildender Abfluss [m ³ /s]
J	= Bruttogefälle [-]

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

Parker Parker [19] untersuchte auf Basis analytischer Überlegungen, welche Bedingungen die Parameter B, h und J erfüllen müssen, damit ein Gerinne stabil bleibt. Für die natürliche Sohlenbreite verwendete er Naturbeobachtungen und entwickelte eine klassische Regimeformel. Die Anwendung der Formel zeigt, dass diese eher die Gleichgewichtsbreite (Breite nach primärer Seitenerosion) wiedergibt.

Gleichgewichtsbreite nach Parker: $SB = 4.4 \cdot Q^{0.5} / ((s-1) \cdot g \cdot dm)^{0.25}$

Ashmore Die Formel von Ashmore [7] wurde anhand von Naturbeobachtungen und von Laborversuchen für verzweigte Flüsse entwickelt. Die Erfahrungen zeigen, dass die Formel bei schweizerischen Verhältnissen sehr grosse Breiten prognostiziert. Gemäss Requena [20] wird durch Ashmore dementsprechend die Grenzbreite (Breite nach sekundärer Seitenerosion) berechnet.

Grenzbreite nach Ashmore: $SB = 0.0098 (\rho_{wg} Q J)^{0.777} / dm^{0.7}$

Millar Millar [16] bestimmte aufgrund eines umfangreichen Data-Sets die Konstanten in den B-Q resp. h/Q-Beziehungen und publizierte folgende Formel, welche gemäss Requena [20] die Grenzbreite (Breite nach sekundärer Seitenerosion) bestimmt:

Grenzbreite nach Millar: $SB = 16.5 Q^{*0.7} J^{0.6} \mu^{-1.1} dm$

mit $Q^* = Q / ((s-1) g dm)^{0.5} dm^2$

Die Variabel μ ist abhängig von der Vegetationsdichte. Keine Vegetation: $\mu = 1$, sehr dichte Vegetation: $\mu = 1.9$. Im Schweizer Mittelland sollte μ nicht kleiner als 1.5 gewählt werden. In höheren Lagen, insbesondere oberhalb der Waldgrenze, liegen die Werte in der Regel unter 1.5.

Ikeda Die Schleppkraftformel von Ikeda [13] ergibt sehr grosse Breiten, welche aufgrund der Resultate der anderen Formeln nicht nachvollzogen werden können. Sie wird darum zur Anwendung nicht empfohlen.

Beurteilung Die Analyse der empfohlenen Formeln zeigte, dass alle auf Naturbeobachtungen oder Labordaten basieren. Eine rein analytische Formel konnte nicht gefunden werden. Die Formeln können zwar die Gesetzmässigkeiten gut nachvollziehen, die Korrelation zwischen den berechneten und den

dm = mittlerer Korndurchmesser [m] des Sohlenmaterials

s = $\rho_{\text{Gesteine}} / \rho_{\text{Wasser}}$

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

gemessenen Sohlenbreiten ist aber begrenzt. Trotzdem stellen die Formeln ein wichtiges Instrument dar, um die Verhältnisse vor Ort in einen grösseren Kontext einzuordnen. Des Weiteren bieten sie dann die Möglichkeit, eine natürliche Sohlenbreite abzuschätzen, wenn sonst keine weiteren brauchbaren Grundlagen zur Verfügung stehen.

Wahl der geeigneten Formeln

Die natürliche Sohlenbreite liegt zwischen der Gleichgewichts- und der Grenzbreite. Die natürliche Gerinneform bzw. die Morphologie eines Fließgewässers gibt vor, ob die effektive Breite eher durch die Gleichgewichts- oder die Grenzbreite erfasst wird (vgl. Abb. 16). Rückschlüsse zur natürlichen Gerinneform können aus historischen Dokumenten (Kapitel 6.2), naturnahen Vergleichsstrecken (Kapitel 6.3), Terrainanalysen (Kapitel 6.4) oder dem Ansatz von Rosgen [21] abgeleitet werden. Ist die Wahl der geeigneten Formeln unsicher, so wird die Formel von Millar [16] (mit $\mu = 1.5$) empfohlen.

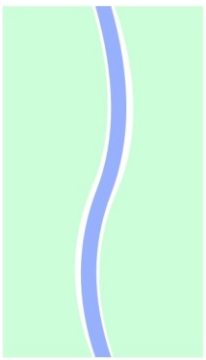
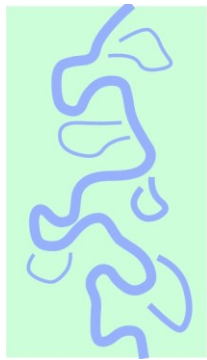
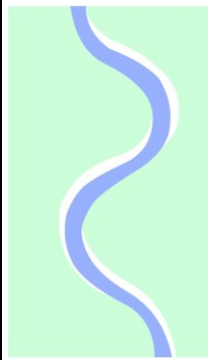
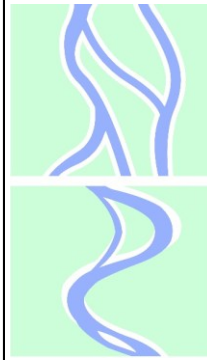
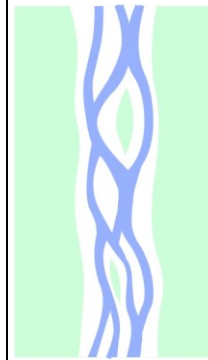
Einteilung der natürlichen Gerinneform	gestreckte und gewundene Gerinne	mäandrierende Gerinne	gewundene Gerinne mit Bänken	gewundene Gerinne mit Inseln und Bänken	verzweigte Gerinne		
							
Merkmale der natürlichen Gerinneform	steiles Gefälle, wenig Seitenbewegung, meist grobes Sohlenmaterial	flaches Gefälle, sich überholende Mäanderschlaufen, bildet Altarme	Sinuskurvenförmig, Mäanderschlaufen wandern talabwärts, bildet keine Altarme	Sinuskurvenförmig, Mäanderschlaufen wandern talabwärts, kürzere Abschnitte mit zwei Teilgerinnen	breite Sohle mit Bänken und verzweigten Strukturen, Teilgerinnen trennen sich nicht über weite Strecken		
Parameter für empirische Formeln	massgebendes Material	betbildender Abfluss	HQ ₂ - HQ ₅	ca. HQ ₂	HQ ₂ - HQ ₅	HQ ₂ - HQ ₅	ca. HQ ₅
		Sohlmaterial	Sohlmaterial	Sohlmaterial	laufendes Material	laufendes Material	
tendenziell angestrebte Breite	tendenz zu Gleichgewichts-breite	tendenz zu Gleichgewichts-breite	Gleichgewichts-breite mit leichter Tendenz zu Grenzbreite	Gleichgewichts-breite mit leichter Tendenz zu Grenzbreite	meist deutl. breiter als Gleichgewichts-breite, Tendenz zu Grenzbreite, bei starker Auflandung ca. Grenzbreite		

Abb. 16 Verschiedene Morphologietypen, welche sich je nach Abfluss, Gefälle und Korndurchmesser einstellen können.

6.5.3 Grundlagen

Zur Anwendung der Formeln müssen folgende Grundlagen vorhanden sein:

Bettbildende Abflüsse

In der Regimetheorie bilden die bettbildenden Abflüsse eine zentrale Grösse (siehe Glossar). Sie entsprechen ungefähr dem bordvollen Abfluss im natürlichen Gerinne (Wasserspiegelbreite = ca. Gerinnebreite). Der bettbildende Abfluss variiert je nach Gerinneform. Paccaud et al. [18] empfehlen für ausgeprägt mäandrierende Gerinne ca. HQ_2 , für verzweigte Gerinne ca. HQ_5 .

Gefälle

Für die Herleitung der natürlichen Sohlenbreite ist das natürliche Gefälle massgebend. Dieses Gefälle wird nicht durch Wehranlagen, künstliche Schwellen oder Rampen beeinflusst. In natürlich geradlinig fließenden Gewässern entspricht das natürliche Gefälle ca. dem Talgefälle. Bei Gewässern mit einem gewundenen Lauf ist das Gefälle des Gewässers flacher als jenes des Tales.

Korndurchmesser

Für die im vorliegenden Verfahren angewendeten regimetheoretischen Ansätze wird der mittlere Korndurchmesser (d_m) im Naturzustand benötigt. Es ist zu beachten, dass im eingeeigten Zustand die Korngrößen grober sind als im Naturzustand, was zu kleinen Sohlenbreiten führt. Im naturnahen Zustand ist das Substrat generell feiner. In den Formeln muss dieses feinere Substrat berücksichtigt werden. Falls keine naturnahen Strecken mehr bestehen oder der Geschiebehalt beeinträchtigt ist (oft ist beides der Fall), sind die massgebenden Korndurchmesser gutachterlich zu bestimmen.

Bei der Wahl des massgebenden Korndurchmessers ist zwischen demjenigen des Sohlenmaterials (Unterschicht) und des laufenden Materials zu unterscheiden. Das laufende Material ist mehrheitlich feiner als das Unterschichtmaterial.

Es wird folgende Einteilung empfohlen:

Bei gestreckten, gewundenen oder mäandrierenden Gerinnen:

Massgebender Korndurchmesser = d_m des Unterschichtmaterials

Bei verzweigter Sohle oder mehrarmigen Gerinnen:

Bei verzweigten Strukturen spielt das laufende Material eine wichtige Rolle für die morphologischen Prozesse. Es wird empfohlen, den massgebenden mittleren Korndurchmesser d_m etwas feiner als das Unterschichtmaterial zu wählen. Der gewählte mittlere Korndurchmesser darf aber nicht feiner als jener des laufenden Materials sein.

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

*Geschiebearme
Abschnitte*

Bei deutlich geschiebearmen Abschnitten (z.B. nach Seeausflüssen) kann die Anwendung der regimetheoretischen Ansätze nicht empfohlen werden, da diese nicht auf geschiebelose Verhältnisse ausgelegt sind.

Sensitivitätsanalyse

Die Parameter "bettbildender Abfluss" und "mittlerer Korndurchmesser" sind in der Regel nicht eindeutig definierbar und müssen bis zu einem gewissen Mass gutachterlich definiert werden. Es wird deshalb empfohlen, für diese Parameter eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen, um die mögliche Bandbreite der Resultate aufzuzeigen.

*Einfluss der
Topographie*

Die natürliche Sohlenbreite kann nicht breiter sein als die zur Verfügung stehende Talebene. Falls das Gewässer topographisch eingeengt ist, muss dies bei der Definition der natürlichen Sohlenbreite berücksichtigt werden.

7 Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite

7.1 Vorgehen

Da der Ist-Zustand die Ausgangslage bildet, muss in einem ersten Schritt das bestehende Gerinne bezüglich Breite und Morphologie beschrieben werden.

Die Festlegung der natürlichen Sohlenbreite erfolgt gemäss den Methoden in Kapitel 6. Nach der Anwendung der unterschiedlichen Methoden stehen meist mehrere unterschiedliche Ergebnisse für die natürliche Sohlenbreite zur Verfügung. Die Qualität der Grundlagen ist aber häufig nicht für alle Ansätze optimal und teilweise ergeben sich auch widersprüchliche Werte. Zur Festlegung der natürlichen Sohlenbreite gilt es deshalb, die Grundlagen bezüglich ihrer Qualität zu beurteilen und sie auf Basis derselben zu gewichten.

Kriterien

Eine qualitativ gute Grundlage weist folgende Kriterien auf:

- Die Grundlage zeigt einen möglichst unbeeinträchtigten Naturzustand (es sind möglichst wenige Uferverbauungen sichtbar oder bekannt, die Hydrologie und der Geschiebetransport entsprechen möglichst dem Referenzzustand)
- Die Grundlage hat eine möglichst hohe Auflösung
- Die Grundlage ist möglichst detailreich (Vegetation, Verbauungen).
- Die Grundlage ist räumlich gut zuzuordnen (georeferenzierbar).
- Die Aufnahme kann zeitlich (Jahr und Jahreszeit) zugeordnet werden
- Es liegen Informationen zu allfälligen Hochwassern oder Trockenperioden vor dem Aufnahmezeitpunkt vor

Es wird empfohlen, die obigen Kriterien bei allen Grundlagen zu prüfen und für die spätere Nachvollziehbarkeit zu dokumentieren.

Gruppierung nach Methoden

Aufgrund der Kriterien wird die Aussagekraft der einzelnen Grundlagen beurteilt. Je mehr Aussagekraft eine Grundlage hat, desto stärker wird sie bei der Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite gewichtet. Entsprechend Kapitel 6 werden die Grundlagen weiterhin nach Methoden zusammengefasst:

1. Historische Dokumente
2. Naturnahe Vergleichsstrecken
3. Terrainanalysen
4. Empirische Ansätze

Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite

Gewichtung der Grundlagen

Innerhalb der Methoden werden die Grundlagen (z.B. verschiedene historische Karten) aufgrund ihrer Aussagekraft gutachterlich gewichtet, was zu einer gewichteten natürlichen Sohlenbreite pro Methode führt.

Gewichtung der Methoden

Die Methoden werden anschliessend ihrerseits untereinander gewichtet. Die Gewichtung der Methoden hängt von der Aussagekraft der vorhandenen Grundlagen ab und muss ebenfalls gutachterlich aufgrund der obigen Kriterien erfolgen. Sofern die Aussagekraft der Grundlagen nicht deutlich dagegenspricht, wird empfohlen, die Methoden wie folgt zu gewichten:

- | | |
|---------------------------------|---------------------------|
| 1. Historische Dokumente | hohe Gewichtung |
| 2. Naturnahe Vergleichsstrecken | hohe Gewichtung |
| 3. Terrainanalysen | mittlere Gewichtung |
| 4. Empirische Ansätze | nur zur Plausibilisierung |

Bei qualitativ schlechten Grundlagen und/oder abweichenden Ergebnissen, kann das Ergebnis einer Methode mit null gewichtet werden.

Die natürliche Sohlenbreite ergibt sich schliesslich aus dem gewichteten Mittel aller Methoden.

Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite

Gewichtungsmatrix

Anhand einer Matrix werden die einzelnen Grundlagen und Methoden gewichtet. Die Matrix könnte beispielsweise wie folgt aussehen:

		gewichtete Breite	Gewichtung Methode
1. Historische Dokumente		A m	xx %
	Breite	Gewichtung	
Historische Grundlage 1	a1 m	xx %	
Historische Grundlage 2	a2 m	xx %	
Historische Grundlage 3	a3 m	xx %	
...		100%	
2. Naturnahe Vergleichsstrecken		B m	xx %
	Breite	Gewichtung	
km XX.X - XX.X	b1 m	xx %	
km XX.X - XX.X	b2 m	xx %	
...		100%	
3. Terrainanalysen		C m	xx %
	Breite	Gewichtung	
Struktur 1	c1 m	xx %	
Struktur 2	c1 m	xx %	
...		100%	
4. Empirische Ansätze		keine oder D m	xx %
	Breite	Gewichtung	
Gleichgewichtsbreite nach Yalin	d1 m	Werte nur zur	
Grenzbreite nach Millar	d2 m	Plausibilisierung	
Grenzbreite nach Ashmore	d3 m	genutzt oder xx%	
Resultierende Sohlenbreite (gerundet)	 m	100 %

Die Wahl der Gewichtung soll pro Grundlage resp. Methode kurz textlich begründet werden.

7.2 Die Sohlenbreite bei dauerhaft verändertem Abfluss oder Geschiebeangebot

7.2.1 Rahmenbedingungen

Die Sohlenbreite eines Gewässers hängt neben geologischen Gegebenheiten und der Vegetation vor allem vom Abfluss und dem Geschiebetransport ab. In einem natürlichen, unverbauten Gewässer stellen sich Gerinnebreite und Morphologie auf das gegebene Abflussregime und die Geschiebelieferung ein. Der Einfluss des Geschiebetransports auf die Breite des Gerinnes und die morphologischen Strukturen wurde in zahlreichen Labor- und Feldstudien beschrieben (z.B. Parker 1979, Church 2006, Marti 2006, Schälchli & Hunzinger 2021). Je nach Abflussregime und Geschiebehaushalt entstehen unterschiedliche Gerinneformen von mäandrierend bis hin zu verzweigten Gerinnen. Verzweigte Gerinne sind im Verhältnis zu ihrer Abflusstiefe deutlich breiter als mäandrierende oder gewundene Gerinne.

Es gibt jedoch Gewässerabschnitte, wo das Abflussregime und die Geschiebelieferung gegenüber dem natürlichen Zustand trotz Umsetzung aller Renaturierungsmassnahmen gemäss strategischer Planung der Kantone und Restwassersanierungen nach Artikel 31-33 und Artikel 80 GSchG stark reduziert bleiben. Dies kann beispielsweise in Restwasserstrecken der Fall sein, in denen Renaturierungsmassnahmen unverhältnismässig sind und deshalb kein naturnahes Abfluss- und Geschieberegime wiederhergestellt wird. Unter diesen Bedingungen stellt sich eine Sohlenbreite ein, die kleiner ist als im natürlichen Zustand. Daher ist die natürliche Sohlenbreite als Planungsgrösse in derartigen Situationen ungeeignet und sie sollte an die veränderten Verhältnisse angepasst werden.

Das hier beschriebene Vorgehen gibt eine Hilfestellung, wie man eine realistische Sohlenbreite bestimmt für den Fall, dass auch nach der Umsetzung aller Renaturierungsmassnahmen (gemäss strategischer Planung der Kantone und Restwassersanierungen nach Artikel 31-33 und Artikel 80 GSchG) ein verändertes Abflussregime oder eine veränderte Geschiebelieferung bestehen bleiben. Da aber jeder Gewässerabschnitt von zahlreichen weiteren Faktoren abhängen kann, muss der Einfluss immer im Einzelfall plausibilisiert werden.

Die Vorschläge zur Anpassung der Breite basieren auf Überlegungen und Auswertungen, die bereits bei der Sanierung Geschiebehaushalt gemacht wurden (Referenz Entwurf Vollzugshilfe SanG). Insofern wäre die Planung des Gewässerraums und Sanierung Geschiebehaushalt methodisch konsistent. Die Grundlagen für die Anpassungen sind in Schälchli und Hunzinger [5] (2021) dokumentiert.

Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite

7.2.2 Anpassung der Sohlenbreite bei verändertem Abfluss

Situation

- Im Gewässerabschnitt ist das Abflussregime gegenüber dem Referenzzustand massgeblich verändert (auch nach Umsetzung aller Renaturierungsmassnahmen gemäss strategischer Planung der Kantone und Restwassersanierungen nach Artikel 31-33 und Artikel 80 GSchG).

- Als verändertes Abflussregime wird ein Regime bezeichnet, bei dem der bettbildende Abfluss (ungefähr HQ_2 - HQ_5) gegenüber dem Referenzzustand um mehr als 10 % vermindert ist.

Anpassung der Sohlenbreite

Für die Bestimmung der Sohlenbreite ist vor allem das Hochwasserregime relevant. Mit einem veränderten Hochwasserregime wird die hydraulische Geometrie und die Geschiebetransportkapazität eines Gewässerabschnitts verändert. Die Gerinnebreite, welche mit dem reduzierten Abflussregime erreicht werden kann lässt sich in erster Näherung zu

$$B_{red} = B_{RZ} \sqrt{\frac{HQ_{red}}{HQ_2}}$$

bestimmen. Darin bezeichnen B_{red} die Gerinnebreite bei reduziertem Abfluss, B_{RZ} die Gerinnebreite mit unverändertem Abflussregime, HQ_2 wird als bettbildender Abfluss im Referenzzustand zum Beispiel anhand historischer Karten bestimmt, HQ_{red} ist der massgebende Hochwasserabfluss im veränderten Abflussregime.

7.2.3 Anpassung der Sohlenbreite bei veränderter Geschiebelieferung

Situation

- Im Gewässerabschnitt ist die Geschiebelieferung gegenüber dem Referenzzustand massgeblich verändert (auch nach Umsetzung aller Renaturierungsmassnahmen gemäss strategischer Planung der Kantone und Restwassersanierungen nach Artikel 31-33 und Artikel 80 GSchG).

- Als massgeblich veränderte Geschiebelieferung wird hier bezeichnet, wenn die Geschiebelieferung kleiner als die erforderliche Geschiebefracht gemäss BAFU Vollzugshilfsmodul Geschiebe (in Anhörung) ist. Je nach Gerinnetyp wäre das der Fall, wenn im Gewässer weniger als 65-80 % der Geschiebefracht im Referenzzustand transportiert werden.

Anpassung der Sohlenbreite

Die Sohlenbreite eines Gewässers hängt auch von der Geschiebefracht ab. Anhand von Geschiebeabschätzungen und Breitenmessungen in Schweizer Gewässern, die eine Breitenänderung infolge reduzierter Geschiebelieferung erfuhren, entwickelten Schälchli und Hunziker (2021) einen quantitativen Zusammenhang zwischen der mittleren jährlichen Geschiebefracht und der Gerinnebreite. Demnach kann die Breite bestimmt werden mit:

$$B_{red} = b B_P + \frac{GF_{red}}{GF_{RZ}} (B_{RZ} - b B_P)$$

Darin bedeuten B_{red} = Gerinnebreite bei Geschiebefracht GF_{red} ; B_P = Gerinnebreite nach Parker (1979, Gl. 4); B_{RZ} = Gerinnebreite in einem bekannten Referenzzustand; GF_{RZ} = Geschiebefracht in einem bekannten Referenzzustand; GF_{red} = Geschiebefracht in einem veränderten Zustand.

Die Variable b wurde empirisch ermittelt und nimmt folgende Werte an: $b = 0.40$ (Abfluss HQ_5), $b = 0.45$ (Abfluss HQ_2).

7.3 Sohlenbreite bei Fliessgewässern mit ehemals sehr grossen natürlichen Sohlenbreiten und Nutzungsdruck

Die natürliche Sohlenbreite ist eine zentrale Ausgangsgrösse für die Bestimmung des Gewässerraums und die Dimensionierung von Wasserbauprojekten. Ehemals sehr grosse Fliessgewässer waren teilweise im Naturzustand stark verzweigte, in gewissen Fällen auch gewundene oder mäandrierende Gewässer.

Die einstmals grosse natürliche Sohlenbreite stellt bei diesen Fliessgewässern eine grosse Herausforderung für die Umsetzung von Wasserbauprojekten dar, vor allem wenn nicht mehr genügend Raum ohne Restriktionen zur Verfügung steht.

Im Dezember 2019 hat das BAFU einen Workshop durchgeführt, mit dem Ziel, die bisherigen Arbeiten zum Thema Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite an grossen Fliessgewässern vorzustellen und mit Experten aus Kantonen, Wasserbau-Büros EPFL und ETHZ zu diskutieren. Aus dem Workshop resultierte die Aufgabe, einen Lösungsansatz für die oben genannten Fälle zu definieren.

Innerhalb dieses Projektes konnte diesbezüglich keine einheitliche Methode festgelegt werden. In diesen Fällen wird eine Einzelfallbetrachtung nötig. Das BAFU ist gerne bereit, bei der Lösungsfindung in den einzelnen Fällen unterstützend mitzuwirken. Wir bitten die Kantone, in solchen Fällen, das BAFU frühzeitig zu kontaktieren. Sollte sich im Laufe der Jahre bei der

Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite eine sinnvolle und gängige Praxis entwickeln, wird dieses Dokument entsprechend erweitert.

Zum jetzigen Zeitpunkt sehen wir folgende Grundsätze für die Festlegung der Sohlenbreite für Fliessgewässer mit ehemals sehr grossen Breiten, die unter starkem Nutzungsdruck stehen (dabei handelt es sich um Ausnahmen, die **als Einzelfälle** behandelt werden):

- Die Bestimmung/Ermittlung der theoretischen natürlichen Sohlenbreite des Fliessgewässers anhand der Gerinneform soll auch in diesen Fällen erfolgen und dem Projekt als grundsätzliches Ziel dienen.
- Der Regimetyp soll beibehalten werden.
- Das Hauptziel aus Sicht Gewässerökologie ist die Wiederherstellung von dynamischen Prozessen.
- Die Entstehung von vielfältigen Strukturen wie Kiesinseln, Pionervegetation, Gleit- und Prallufer, Strömungsvielfalt im Gerinne, Mikrohabitate und Ufervegetationshabitat ist die Grundlage für natürlichen Funktionen eines Gewässers und soll ermöglicht werden.
- Der nachhaltige Hochwasserschutz soll gewährleistet sein. Dieser beinhaltet neben Dämmen, die die natürlichen Funktionen nicht wesentlich beeinträchtigen, auch solche Abschnitte wo aus Platzgründen Ufermauern notwendig sind, um den Schutz zu gewährleisten; beispielsweise innerhalb von Siedlungen, namentlich bei dichter Besiedlung, .
- Der Projektperimeter soll mindestens solche Abschnitte beinhalten, wo die natürlichen Funktionen des Gewässers so weit wiederhergestellt werden, dass auf lange Sicht die Funktionalität des Fliessgewässerökosystems gesichert werden kann.

Die Liste ist nicht abschliessend und wird bei konkretem Bedarf erweitert.

8 Anwendungsbeispiele

Nachfolgend werden die im Bericht beschriebenen Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite anhand von Anwendungsbeispielen aufgezeigt.

Anwendungsbeispiele

8.1 Jogne / Jaunbach (Kantone Fribourg und Bern)

Dieses Beispiel zeigt die Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite (Lnat) der Jogne (Jaunbach) zwischen Kappelboden und Charmey in den Kantonen Freiburg und Bern auf einem 10.7 km langen Abschnitt zwischen km 5.9 und km 17.1 (Abb. 17). Der Sektor wurde nach folgenden Kriterien in 12 homogene Abschnitte unterteilt: Sohlenneigung, Abfluss, Topographie des Talbodens und Zustand vor der Korrektur gemäss Archivplänen (Abb. 21 - Abb. 25). Im Rahmen dieses Beispiels wurden nur die Abschnitte 1 (0.5 km), 4 (1.6 km), 5 (0.6 km), 9 (0.7 km) und 12 (0.4 km) einbezogen, um Wiederholungen zu vermeiden. Die Methodik zur Beurteilung der anderen Abschnitte ist identisch.



Abb. 17 Lage des Untersuchungsperimeters am Jaunbach (km 5.9 - 17.1)

8.1.1 Aktueller Zustand

Einzugsgebiet

Im Untersuchungsgebiet hat der Jaunbach ein Einzugsgebiet mit einer Fläche von etwa 102 km².

Fliessgewässertyp

Er fliesst überwiegend entlang landwirtschaftlich genutzter Flächen und durchquert die Weiler La Tzintre, Im Fang und Jaun. Waldgebiete werden nur stellenweise durchflossen. Der Jaunbach weist im Betrachtungsperimeter mehrheitlich den Charakter eines mäandrierenden Gerinnes auf. Die derzeitige durchschnittliche Breite des Flussbetts beträgt etwa 10-15 m.

Zustand des Fliessgewässers

Hinsichtlich der Morphologie weist der Fluss aufgrund der bestehenden Uferverbauungen (Längsdämme) eine geringe Breitenvariabilität auf. Die Struktur des Flussbetts ist relativ homogen. Der Jaunbach ist jedoch ein sehr aktiver Fluss mit einem durchschnittlichen Längsgefälle von ca. 2 %, wodurch grosse Mengen an Sedimenten mitgeführt werden. Stellenweise ähnelt der Jaunbach sogar einem Wildbach mit einem sehr starken Gefälle von etwa 9%.

Anwendungsbeispiele

8.1.2 Grundlagen und Methodik zur Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite

8.1.3 Die folgende Tabelle zeigt einen Auszug aus der Analyse für einige ausgewählte Abschnitte

1 historische Dokumente						
Grundlage	Bewertung	Bordvolle Sohlenbreite (gemessene Werte)	geschätzte Uferbreite	Sohlenbreite	Gerinneform	anthropogene Einflüsse
T1	kein Plan vorhanden	-	-	-	T1: gestrecktes Gerinne Andere Abschnitte:	T9: Uferverbau, entsprechend ist Lnat nicht relevant.
T4	Wasserbaupläne (aus XX Jahrhundert)	Abb. 21, 22 60 m (47 - 72 m)	2 x 9 m = 18 m	142 m		
T5	Wasserbauplan von 1890	Abb. 23 36 m (30 - 43 m)	2 x 5.5 m = 11 m	25 m	mäandrierendes Gerinne	Andere Abschnitte: punktuelle Verbauungen, nur lokaler, limitierter Einfluss auf Lnat.
T9	Wasserbauplan von 1890	Abb. 24 13 m (11 - 14 m)	2 x 2 m = 4 m	9 m		
T12	Wasserbauplan von 1893	Abb. 25 29 m (23 - 40)	2 x 4.5 m = 9 m	20 m		
2 naturnahe Vergleichsstrecken						
Abschnitt	Bewertung	Bordvolle Sohlenbreite (gemessene Werte)	geschätzte Uferbreite	Sohlenbreite	Gerinneform	anthropogene Einflüsse
Es ist kein naturnaher Vergleichsabschnitt vorhanden.						
3 Terrainanalyse						
Grundlage	Bewertung	Bordvolle Sohlenbreite (gemessene Werte)	geschätzte Uferbreite	Sohlenbreite	Gerinneform	
T1	Swissalti 3D von 2019, 50cm Querprofile	Messung 12 m (7 - 15 m)	2 x 0.5 m = 1 m	11 m	Gestrecktes Gerinne mit sehr starkem Gefälle. Die Breite des Talbodens entspricht der Bordvollen Sohlenbreite.	
T4	nicht bestimmt	-	-	-	-	
T5	nicht bestimmt	-	-	-	-	
T9	Swissalti 3D de 2019, 50cm Querprofile	Messung 40 m	2 x 2.5 m = 5 m	35 m	Mäandrierendes Gerinne mit generell nur einem aktiven Arm, die Mäander können sich auch seitlich verlagern. Die Talform ist vergleichbar mit Abschnitt 8 und 11 (nicht dargestellt), die eine kompatible Lnat mit der Formel von Millar aufweisen.	
T12	nicht bestimmt	-	-	-	-	
4 empirische Ansätze						
Ansätze	Schätzung der mittleren Bordvollen Sohlenbreite			mittlere Sohlenbreite	Parameter	
T1	Y: Bordvolle Sohlenbreite (nach primärer Erosion) nach Yalin	Y: 21 m; P: 31 m; A: 307 m; M: 131 m		Y: 19 m; P: 27 m; A: 270 m; M: 115 m	Q=33-56m ³ /s, dm=0.04-0.06m, J=0.093	
T4	P: Bordvolle Sohlenbreite (nach primärer Erosion) nach Parker	Y: 16 m; P: 24 m; A: 35 m; M: 22 m		Y: 11 m; P: 17 m; A: 24 m; M: 15 m	Q=24-40m ³ /s, dm=0.06-0.08m, J=0.011	
T5	A: Bordvolle Sohlenbreite (nach sekundärer Erosion) nach Ashmore	Y: 14 m; P: 21 m; A: 33 m; M: 20 m		Y: 10 m; P: 14 m; A: 23 m; M: 14 m	Q=17-30m ³ /s, dm=0.06-0.08m, J=0.014	
T9	M: L'ageur pleins bords (après érosion secondaire) nach Millar ($\mu=1.5$; $s=2.65$)	Y: 13 m; P: 19 m; A: 38 m; M: 22 m		Y: 9 m; P: 13 m; A: 27 m; M: 15 m	Q=16-27m ³ /s, dm=0.08-0.10m, J=0.023	
T12		Y: 11 m; P: 17 m; A: 28 m; M: 16 m		Y: 8 m; P: 12 m; A: 20 m; M: 11 m	Q=14-24m ³ /s, dm=0.09-0.11m, J=0.019	

Anwendungsbeispiele

8.1.4 Gewichtung

Gewichtungs-
tabelle

Die folgende Tabelle zeigt die ermittelten Sohlenbreite anhand der Basisdaten und der gewählten Gewichtung. Daraus ergeben sich die folgenden natürlichen Sohlenbreiten: T1: 11 m; T4: 42 m; T5: 25 m; T9: 15 m; T12: 20

				Sohlenbreite
1 Historische Dokumente				
		Sohlenbreite	Gewichtung	
T1	Keine Pläne vorhanden	-	0%	
T4	Wasserbaupläne (aus XIX Jahrhundert)	42 m	100%	42 m
T5	Wasserbaupläne von 1890	25 m	100%	25 m
T9	Wasserbaupläne von 1890	9 m	0%	
T12	Wasserbaupläne von 1893	20 m	100%	20 m
2 naturnahe Vergleichsstrecken				
		Sohlenbreite	Gewichtung	
			keine	
3 Terrainanalysen (TA)				
		Sohlenbreite	Gewichtung	
T1	Querprofil TA	11 m	100%	11 m
T4	nicht bewertet	-	0%	
T5	nicht bewertet	-	0%	
T9	Querprofil TA	35 m	0%	
T12	nicht bewertet	-	0%	
4 Empirische Ansätze				
	Ansatz	Sohlenbreite	Gewichtung	
T1	Y: Bordvolle Sohlenbreite (nach primärer Erosion) Yalin	Y: 19 m; P: 27 m; A: 270 m; M: 115 m	0%	
T4	P: Bordvolle Sohlenbreite (nach primärer Erosion) Parker	Y: 11 m; P: 17 m; A: 24 m; M: 15 m	0%	
T5	A: Bordvolle Sohlenbreite (nach sekundärer Erosion) Ashmore	Y: 10 m; P: 14 m; A: 23 m; M: 14 m	0%	
T9	M: Bordvolle Sohlenbreite (nach sekundärer Erosion) Millar ($\mu=1.5$; $s=2.65$)	Y: 9 m; P: 13 m; A: 27 m; M: 15 m	100%	15 m
T12		Y: 8 m; P: 12 m; A: 20 m; M: 11 m	0%	

Zur Information enthält die folgende Tabelle die natürlichen Sohlenbreiten in Metern, die für die in diesem Anwendungsbeispiel nicht dargestellten Abschnitte ermittelt wurden.

Anwendungsbeispiele

Abschnitt	T2	T3	T6	T7	T8	T10	T11
Natürliche Sohlbreite (m)	38	27	19	19	19	9	12
Länge des Abschnitts (km)	3.1	1.3	1.0	0.5	0.7	0.4	0.7
Bestimmungsmethodik*	1	4 (A)	1	2 (T6 et T8)	1	1	1

* 1 : historische Dokumente. 2 : naturnahe Vergleichstrecken. 3 : Terrainanalyse. 4 : empirische Formeln (nach Autor).

Begründung der gewählten Sohlenbreitenwerte

Im Rahmen dieser Studie wurden vorrangig die Messwerte aus historischen Plänen zur Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite herangezogen, denn wir erachteten diese Methode als die Zuverlässigste: die Pläne sind recht genau und Uferbefestigungen fehlten zum Zeitpunkt der Aufnahme fast vollständig. Insgesamt wurde die Sohlenbreite in 8 der 12 Abschnitte anhand der Wasserbau-Pläne zur Eindämmung der Jogne festgelegt. Für dieses Beispiel wurde die natürliche Sohlenbreite der Abschnitte T4, T5 und T12 anhand der Pläne bestimmt.

An zweiter Stelle wurden empirische Formeln verwendet, um die natürliche Sohlenbreite zu bestimmen. Die empirischen Ansätze werden hier als zuverlässiger angesehen als die Terrainanalysen. Denn Veränderungen der Flussmorphologie aufgrund von Flusskorrekturen und der Unschärfen des DTMs können die Ausmessung der Querprofile erheblich beeinflussen. Da für den Abschnitt T9 auch die Archivpläne nicht verlässlich sind, wurden hier empirische Formeln zur Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite herangezogen. Es wurden mehrere empirische Formeln auf zwei Abschnitte angewandt, die T9 ähnlich sind (T8 und T11; nicht Bestandteil dieses Beispiels) und so der zu verwendende empirische Ansatz gewählt. Die besten Ergebnisse im Vergleich mit den historischen Dokumenten lieferte der Ansatz nach Millar, weshalb dieser zur Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite für T9 verwendet wurde.

Schließlich wurde die Terrainanalysen als dritte und letzte Möglichkeit zur Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite herangezogen. Da sowohl Archivpläne als auch empirischen Formeln für den Abschnitt T1 nicht plausibel waren, wurde die natürliche Breite anhand von Messungen an Querprofilen aus dem Höhenmodell definiert. Da dieser tief eingeschnittene Abschnitt nie verbaut wurde, erwiesen sich die Querprofilmessungen als verlässlicher Ansatz.

Im Folgenden werden für jeden Abschnitt dieses Fall-Beispiels die verschiedenen möglichen Methoden bewertet.

Anwendungsbeispiele

*Historische
Dokumente*

Die historischen Karten des Jaunbachs erlauben keine Messung der natürlichen Breite des Flussbetts. Dagegen liefern die im Kantonsarchiv gefundenen Wasserbaupläne zur Eindeichung vom Ende des 19. Jahrhunderts sehr nützliche Informationen über die Breite des Jaunbachs vor den Verbauungen. Allerdings müssen die gemessenen Werte an Orten, an denen bereits vor den grossen Eindeichungen bereits Stauanlagen und punktuelle Gerinneverbauungen existierten, zu plausibilisieren.

T1: Die mittlere Lnat konnte in den Plänen nicht gemessen werden, da dieser Abschnitt nicht abgebildet ist. Da das Gerinne bereits natürlich eingeeignet ist, wurde dieser Abschnitt wahrscheinlich nie eingedeicht.

T4: Die mittlere gemessene Lnat beträgt 42 m. Die Abschnitte oberhalb und unterhalb dieses Abschnitts sind ebenfalls sehr breit. Mehrere Messungen im mittleren Bereich wurden ausgeschlossen, da bereits vorhandene Verbauungen die Messwerte beeinträchtigen.

T5: Die gemessene mittlere Lnat entspricht 25 m. Es gibt nur wenige bereits bestehende Verbauungen, diese scheinen keinen Einfluss auf die Messwerte zu haben.

T9: Die gemessene mittlere Lnat beträgt 9 m, sie scheint aber nicht relevant zu sein. Denn es sind viele Verbauungen an den Aussenseiten der Mäander vorhanden, die den Messwert beeinflussen.

T12: Die gemessene mittlere Lnat entspricht 20 m. Vorhandene Stabilisierungen sind offensichtlich nicht zahlreich und scheinen die gemessenen Werte nicht signifikant zu beeinflussen

Referenzzustand

Es wurde nach natürlichen Referenzstrecken gesucht, aber keine gefunden.

Terrainanalysen

T1: Die an den Querprofilen gemessene mittlere Lnat entspricht 11 m (Talboden). Verbauungen sind nicht vorhanden und das Gefälle ist sehr hoch.

T9: Wechselseitige Terrassen mit einer Breite von ca. 40-50 m sind auf den Querprofilen zu erkennen. Dies lässt vermuten, dass dieser Abschnitt mit den Abschnitten T8 und T11 vergleichbar ist, da diese auf den Querprofilen ähnliche Terrassen aufweisen.

Die Querprofile der Abschnitte T4, T5 und T12 wurden nicht ausgewertet.

*Empirische
Ansätze*

T1: Kein Ansatz liefert vernünftige Werte im Vergleich zu den Messungen nach den Lnat-Plänen, was nicht überrascht, da die empirischen Ansätze die Besonderheit der eingetieften Gerinne nicht berücksichtigen.

Anwendungsbeispiele

T4: Keiner der Ansätze liefert ähnlich grosse Lnat-Werte wie diejenigen, die auf den Plänen gemessen wurden. Mehrere Pläne zeigen jedoch natürliche Sohlenbreiten von fast 60 m. Den Plänen zufolge handelt es sich dabei um einen Durchschnittswert, der konsistent ist. Dieser höhere Wert lässt sich wahrscheinlich durch das Vorhandensein eines natürlichen Engpasses (enge Passage aufgrund eines Felsvorsprungs) unterhalb dieses Abschnitts erklären, der eine Akkumulation von Sediment und damit eine Verbreiterung der Sohle in dem betreffenden Abschnitt induziert.

T5: Yalin und Parker geben im Vergleich zu den Sohlenbreiten aus den Wasserbauplänen geringere Breiten an. Ashmore und Millar scheinen besser geeignet, da auf den Plänen grosse Kiesbänke zu sehen sind. Ashmore stimmt am besten mit den Beobachtungen in den Plänen überein. Der ermittelte Mittelwert für Lnat entspricht bei Ashmore 23 m.

T9: Ashmore und Millar sind für diesen Abschnitt anwendbar, da er vor der Korrektur wahrscheinlich grosse Kiesbänke aufwies. Nur Millar liefert vernünftige Werte im Vergleich zu den in den Plänen für T8 und T11 gemessenen Lnat. Der mit Millar ermittelte Mittelwert der Lnat-Werte entspricht 15 m für T9.

T12: Yalin und Parker geben im Vergleich zu den Lnat-Messungen auf den Plänen niedrigere Breiten an. Ashmore und Millar scheinen besser anwendbar und plausibler, da auf den Plänen grosse Kiesbänke zu sehen sind. Ashmore stimmt am besten mit den Beobachtungen auf den Plänen überein. Der mit Ashmore ermittelte Mittelwert beträgt 20 m.

Anwendungsbeispiele

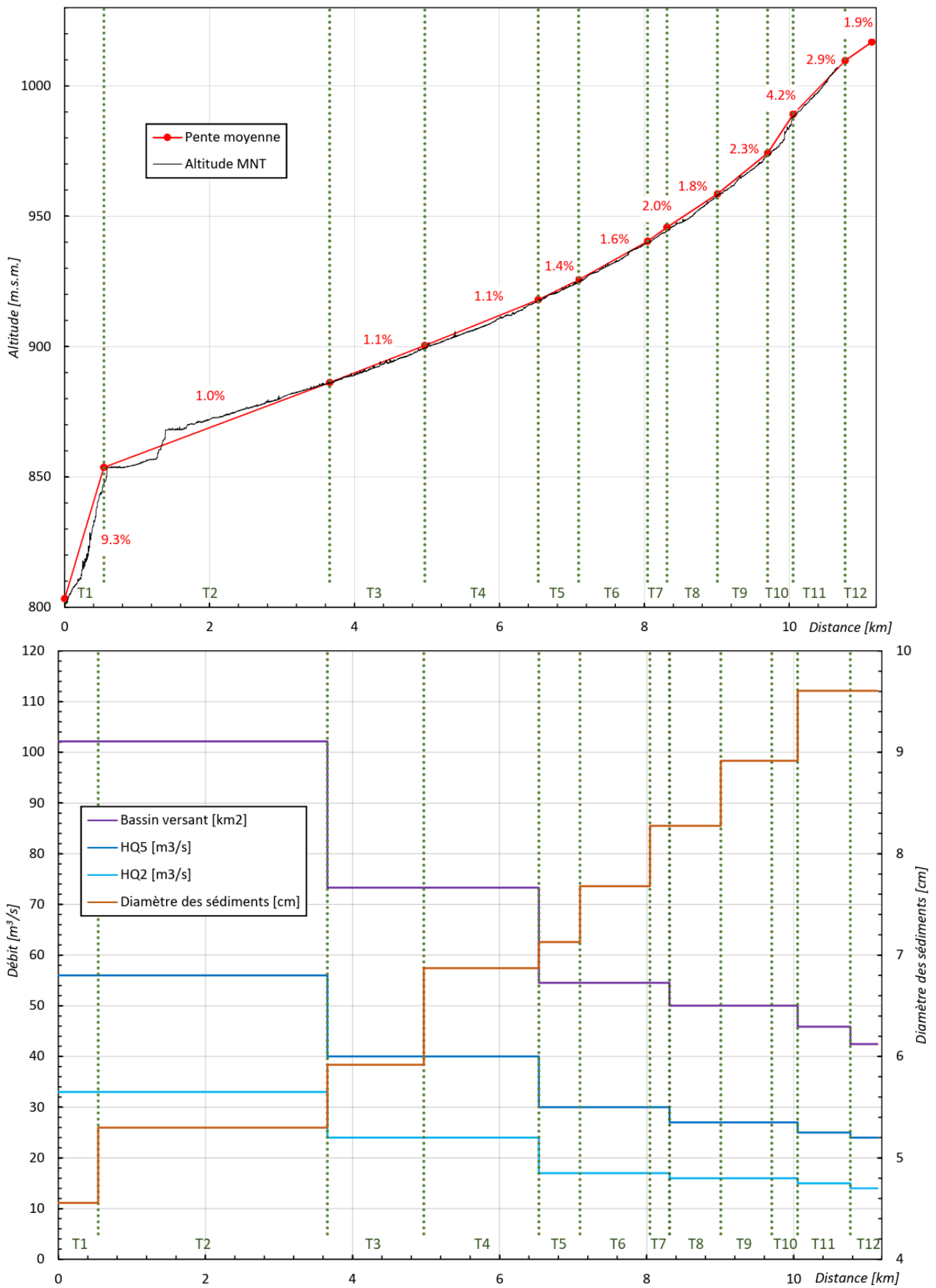


Abb. 17 Darstellung der verschiedenen Basis – Parameter der Abschnitte entlang des Jaunbachs

Anwendungsbeispiele



Abb. 18 Der Jaunbach auf Höhe der Brücke Pont du Roc Abschnitt T2, km 8.84, am 2.12.2021



Abb. 19 Der Jaunbach auf Höhe Bonnefontaine, Abschnitt T2, km 8.10, am 2.12.2021

Abschnitt 4 (T4)

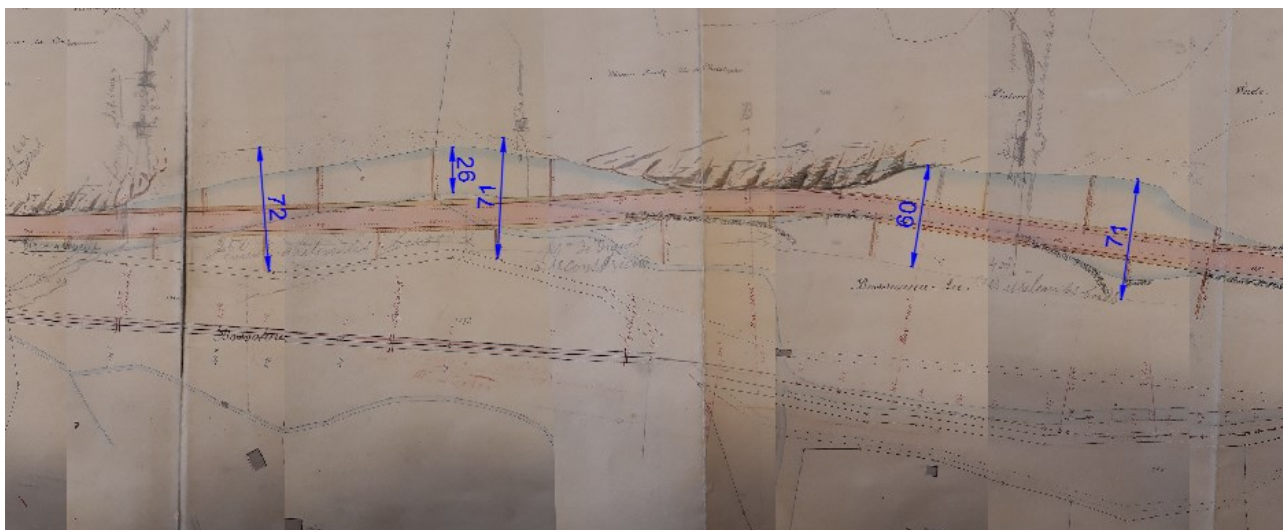


Abb. 20 Ausschnitt aus dem Wasserbauplan zur Eindämmung des Jaunbachs vom Ende des 19. Jahrhunderts zwischen Krämersweidli und Hinterweld mit gemessener bordvollen Sohlenbreite (L_{pb}) von bis zu 70 m. Da die Sedimente auf dem Plan nicht eindeutig dargestellt sind, kann die L_{pb} an der seitlichen Ausdehnung der Bühnen (Stabilisierungen senkrecht zu den Dämmen) gemessen werden).

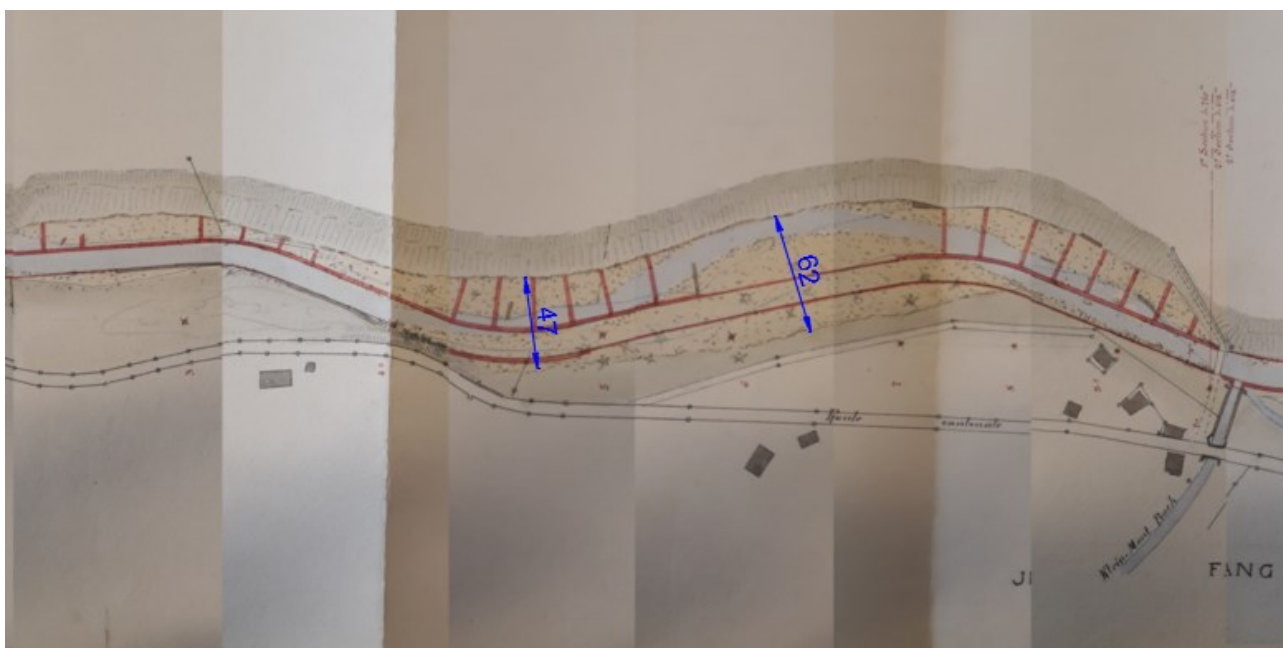


Abb. 21 Ausschnitt aus dem Verbauungsplan (Eindämmung) von 1890 zwischen Bifang und Im Fang mit bordvollen Sohlenbreiten (L_{pb}) von bis zu 60 m.

Abschnitt 5 (T5)

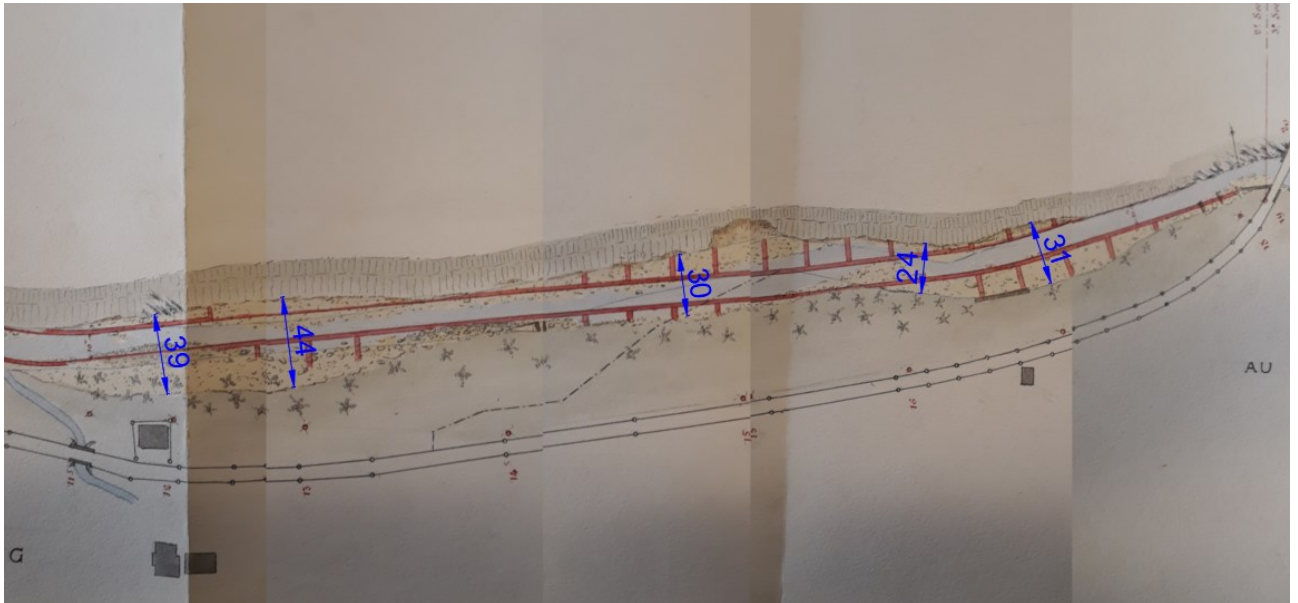


Abb. 22 Ausschnitt aus dem Verbauungsplan (Eindämmung) von 1890 zwischen Im Fang und Fangeren Auen mit bordvollen Sohlenbreiten (L_{pb}) bis zu 45 m

Abschnitt 9 (T9)

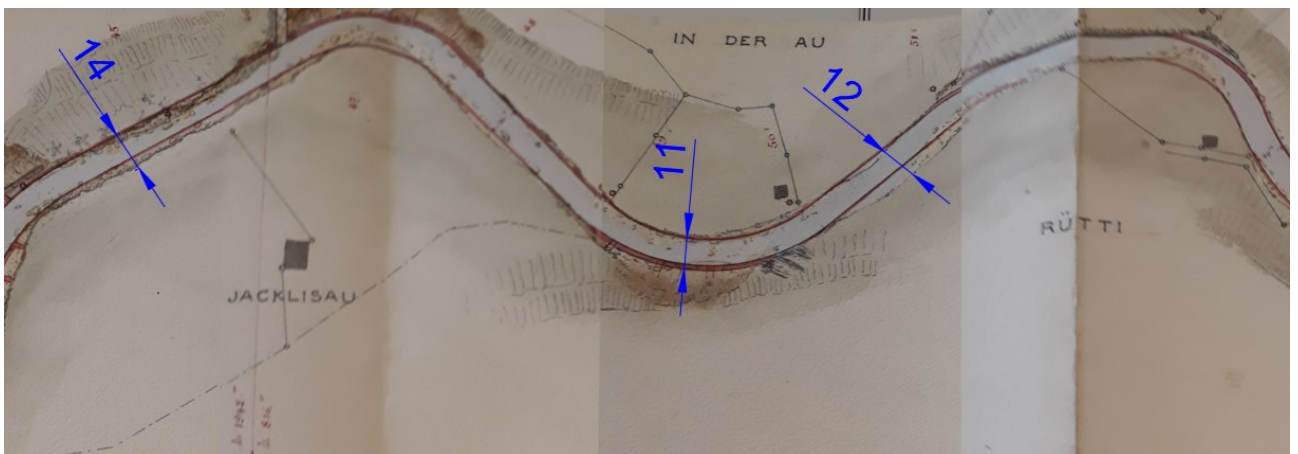


Abb. 23 Ausschnitt aus dem Verbauungsplan (Eindämmung) von 1890 zwischen Chuerzi und Grüemersweidli mit bordvollen Sohlenbreiten (L_{pb}) bis circa 15 m.

Abschnitt 12 (T12)



Abb. 24 Ausschnitt aus dem Verbauungsplan (Eindämmung) von 1890 auf Höhe Kappelboden bis zum Zusammenfluss von Oberbach und Jogne mit bordvollen Sohlenbreiten (L_{pb}) bis zu 40 m.

Anwendungsbeispiele

8.2 Beispiel Aare Wildegg - Brugg (Kanton Aargau)

Im Beispiel wird die Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite der Aare zwischen Wildegg und Brugg im Kanton Aarau von GEWISS km 29.1 – 19.3 (siehe Abb. 25) vorgestellt.

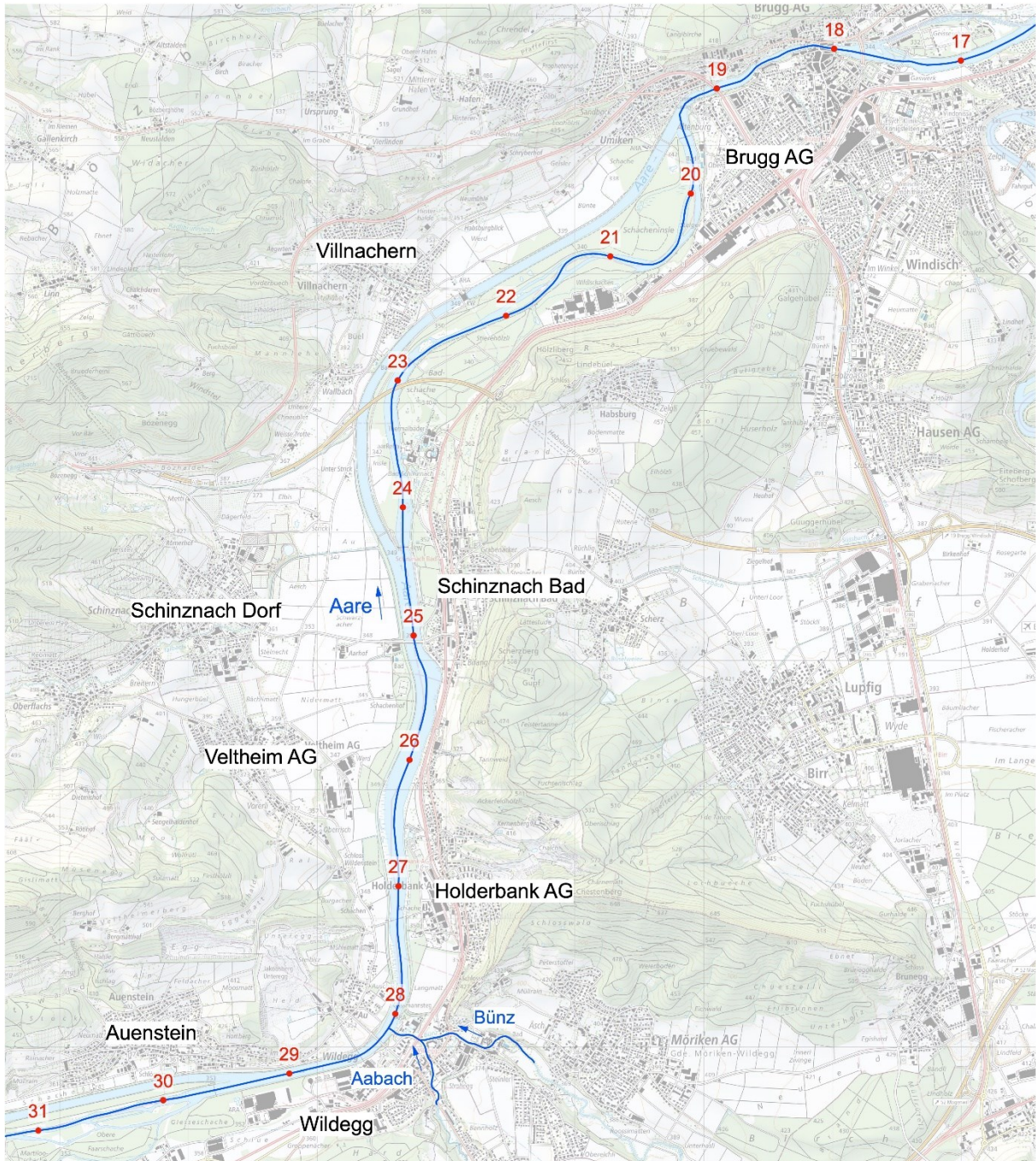


Abb. 25 Lage des Untersuchungsperimeters an der Aare zwischen Wildegg und Brugg (GEWISS km 29.1 – 19.3), Masstab 1:50'000.

Anwendungsbeispiele

8.2.1 Ist-Zustand

<i>Einzugsgebiet</i>	Im Untersuchungsperimeter nimmt das Einzugsgebiet der Aare von rund 11'330 km ² auf 11'680 km ² zu.
<i>Gerinneform</i>	Im Perimeter fliesst die Aare durch rezente Alluvion, die seitlich durch Niederterrassenschotter begrenzt ist. Im Referenzzustand zeigte die Aare einen gewundenen Lauf mit Inseln und Bänken, der bei Hochwasserereignissen migrierte (Abb. 31). Ufer und Inseln waren mit Auenwald bewachsen. Im Anschluss an das untere Perimeterende besteht bei Brugg eine Engstelle, bei der sich die Aare in den anstehenden Fels eingetieft hat. Heute wird die Projektstrecke durch das Ausleit-Kraftwerk Wildegg-Brugg geprägt, das die Projektstrecke in die Staustrecke bis Schinznach und die nachfolgende Restwasserstrecke bis Umiken gliedert.
<i>Geschiebehaushalt</i>	Im Referenzzustand verfügte die Aare über eine mittlere Geschiebefracht von rund 11'000 m ³ /a (Strecke Wildegg-Brugg). Gemäss der Strategischen Planung Sanierung Geschiebehaushalt betrug die mittlere Geschiebefracht 2010 ca. 2'000 m ³ /a. Das Sanierungsziel liegt in der Grössenordnung von 5'000 m ³ /a.
<i>Zustand Gerinne</i>	In der Staustrecke ist die Aare zwischen den uferbegleitenden Dämmen eingengt. Infolge der reduzierten Fliessgeschwindigkeit haben sich lokal Verlandungszonen gebildet (Abb.27). Die wenig strukturierte Sohle besteht aus Flusskiesen und Feinsedimenten. Die Restwasserstrecke wird durch das Hilfswehr und das Dachwehr unterteilt. Zwischen Hilfs- und Dachwehr ist der ursprünglich gewundene Verlauf mit Tendenz zur Verzweigung noch erkennbar (Abb. 28). Die dynamische Breite hat aber wegen des reduzierten Abflusses (HQ ₂ von 920 m ³ /s auf 520 m ³ /s) und der reduzierten Geschiebefracht (siehe oben) stark abgenommen.

8.2.2 Grundlagen und Ansätze zur Breitenermittlung

In der nachstehenden Tabelle ist die Auswertung der historischen Karten und die Anwendung der empirischen Formeln mit den berücksichtigten Parametern aufgeführt.

Bei den historischen Karten wurde die dynamische Breite mithilfe einer Planimetrie⁵ sowie durch Mittelbildung der Querprofilbreiten (Profilabstand 100m) berechnet. Die Auswertung mittels Profilen ist um ca. 4% kleiner als mit Planimetrie. Ferner ist die mittlere Breite inklusive den mit Auenwald bewachsenen Inseln angegeben.

⁵ Mittlere Breite = (dargestellte Wasserfläche zuzüglich Kiesbänke) / Lauflänge.

Anwendungsbeispiele

Bei den empirischen Ansätzen wurden 5 Methoden berücksichtigt. Bei der Formel nach Parker wurde zusätzlich die Breite mit einem Faktor zur Berücksichtigung der Gerinneform multipliziert. Dieser beträgt bei gewundenen Gewässern mit Inseln und Bänken 0.9 - 1.5 (gewählt: 1.2).

Anwendungsbeispiele

1 Historische Dokumente										
	Grundlage	Auswertung siehe	Dynamische Breite			Breite inkl. bewachsene Inseln	Gerinneform	Anthropogene Einflüsse		
			Planimetrie	aus Profilen	Ausgabegrösse					
1a.	Michaeliskarte (1843)	Abb. 2, Abb. 5	209 m	201 m	259 m	Gewundenes Gewässer mit Inseln und Bänken	Lokale Ufersicherungen wie Bühnen führten bereits zu einer geringen Einengung des Gerinnes			
1b.	Dufourkarte (1849-1861)	Abb. 2, Abb. 6	250 m	241 m	271 m					
1c.	Siegfriedkarte (1878-1882)	Abb. 2, Abb. 7	178 m	173 m	225 m					
2 Empirische Ansätze										
	Ansatz	Auswertung siehe	Ausgabegrösse	Breite HQ2	Breite HQ5					
2a.	Parker	Abb. 2	Gerinnebreite	160 m	172 m					
2b.	Parker mit Morphologie	Abb. 2	Gerinnebreite	192 m	206 m					
2c.	Yalin	Abb. 2	Gerinnebreite	109 m	118 m					
2d.	Ikeda	Abb. 2	Gerinnebreite	277 m	322 m					
2e.	Ashmore	Abb. 2	Wasserspiegelbreite	195 m	219 m					
2f.	Millar 2005	Abb. 2	Wasserspiegelbreite	216 m	240 m					
3 Parameter										
	Grösse	Wert								
3a.	Abfluss HQ2	920 m ³ /s								
3b.	Abfluss HQ5	1070 m ³ /s								
3c.	Gefälle	1.6 ‰								
3d.	Korndurchmesser d50	3 cm								
3e.	Korndurchmesser d90	7 cm								
3f.	μ (verwendet in der Formel nach Millar)	1.0								

Anwendungsbeispiele

8.2.3 Gewichtung und natürliche Sohlenbreite

Die nachfolgende Matrix zeigt die aus den Grundlagen ermittelten Breiten und die gewählte Gewichtung. Daraus ergibt sich an der Aare im Untersuchungsperimeter eine natürliche Sohlenbreite von 200 m.

				Gewichtete Breite (gerundet)	Gewichtung Methode
1	Historische Dokumente			202 m	100%
		Breite	Gewichtung		
1a.	Michaeliskarte (1843)	205 m	40%		
1b.	Dufourkarte (1849-1861)	246 m	20%		
1c.	Siegfriedkarte (1878-1882)	176 m	40%		
2	Empirische Ansätze			keine	0%
		Breite (HQ ₂)	Gewichtung		
2a.	Parker	160 m	keine Werte, nur zur Plausibilisierung genutzt		
2b.	Parker mit Morphologie	192 m			
2c.	Yalin	109 m			
2d.	Ikeda	277 m			
2e.	Ashmore	195 m			
2f.	Millar 2005	216 m			
Resultierende Sohlenbreite (gerundet)				200 m	

Historische Karten

Die Michaelis-Karte (1:25'000) wird als erste massstäbliche historische Karte mit 40% gewichtet. Die Dufour-Karte wird wegen des vergleichsweise kleinen Massstabs (1:100'000) mit 20% und die Siegfried-Karte (1:25'000) mit 40% gewichtet. Auf der Siegfried-Karte sind einzelne Uferverbauungen (z.B. Bühnen) eingezeichnet, welche die Sohlenbreite leicht reduzierten. Maximal werden in den historischen Karten Sohlenbreiten bis ca. 480 m erreicht.

Die Gerinneform des vorliegenden Fallbeispiels war gewunden mit Inseln und Bänken. Soll bei diesem Gewässertyp bei einer Revitalisierung wieder ein naturnaher Zustand erreicht werden, so ist zusätzlich zur Sohlenbreite die Inselbreite zu berücksichtigen. An der Aare bei Wildeggen - Brugg betrug die mittlere Breite mit bewachsenen Inseln ca. 250 m.

Empirische Ansätze

Mit den empirischen Ansätzen werden Gerinnebreiten zwischen 109 m und 322 m erreicht. Die grosse Schwankungsbreite zeigt die grosse Unsicherheit bei Anwendung dieser Methoden. Mit der Methode "Parker mit Morphologie" wird eine Breite von 192 m (HQ₂) bis 206 m (HQ₅) erreicht. Dies entspricht der Grössenordnung aus den historischen Karten.

Natürliche Sohlenbreite

Mit der empfohlenen Gewichtung resultiert eine **mittlere natürliche Sohlenbreite von 200m**.

Anwendungsbeispiele

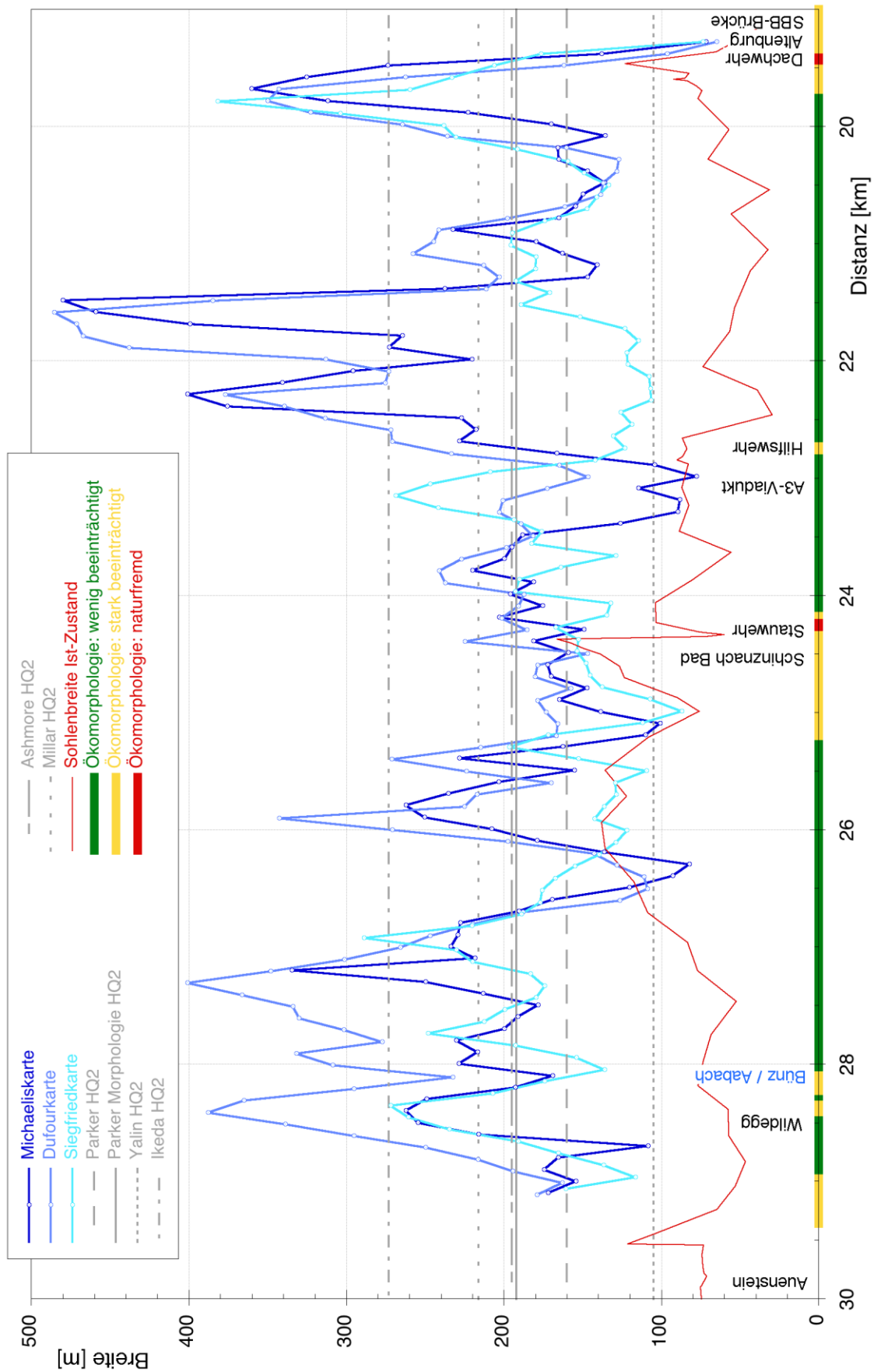


Abb. 26 Aare GEWISS km 30 – 19. Längenprofil der Breite gemäss historischen Karten, für verschiedene empirische Ansätze sowie im Istzustand.

Anwendungsbeispiele



Abb. 27 Aare, Blick in Fließrichtung zur Brücke Schinznach Dorf - Schinznach Bad (GEWISS km 25.1). Strukturarmer Staubereich mit kleiner Fließgeschwindigkeit (2015).



Abb. 28 Aare, Restwasserstrecke flussabwärts des Hilfswehrs (GEWISS km 22.0) mit vielfältigen Strukturen und befestigtem Ufer (2015).

Anwendungsbeispiele

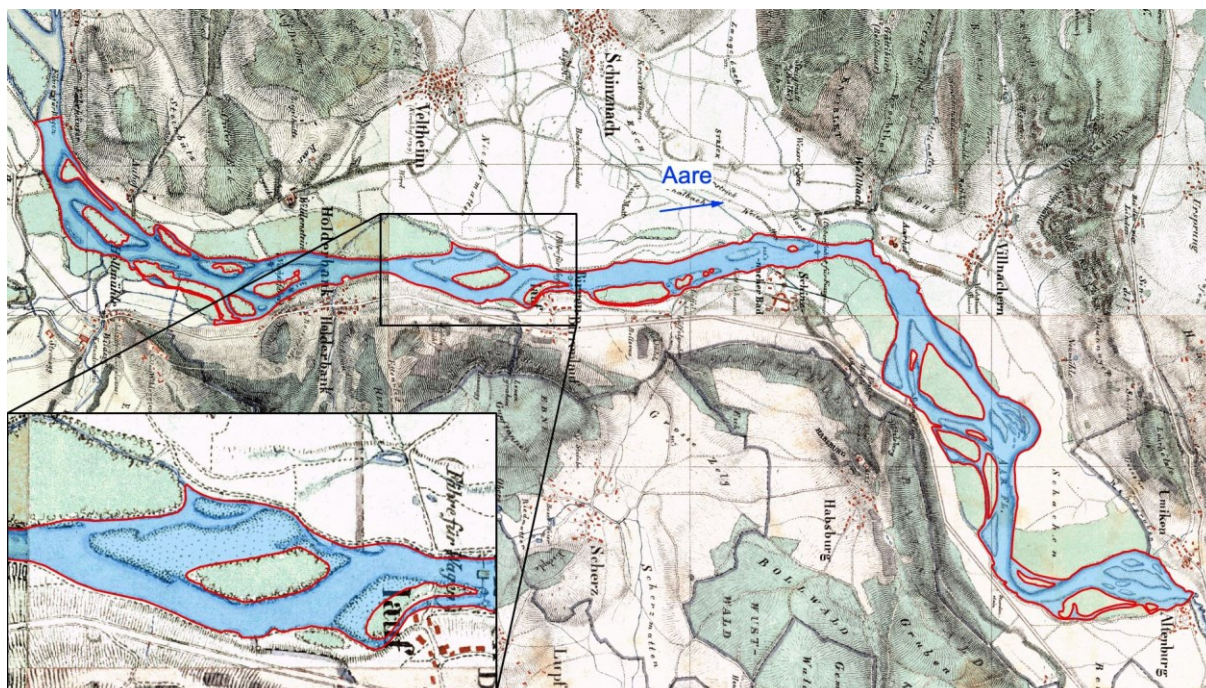


Abb. 29 Aare, Michaeliskarte (1843). Auenstein bis Brugg mit dem planimetrierten Bereich (rote Linie). Dargestellter Massstab 1:50'000, Detail 1:20'000.

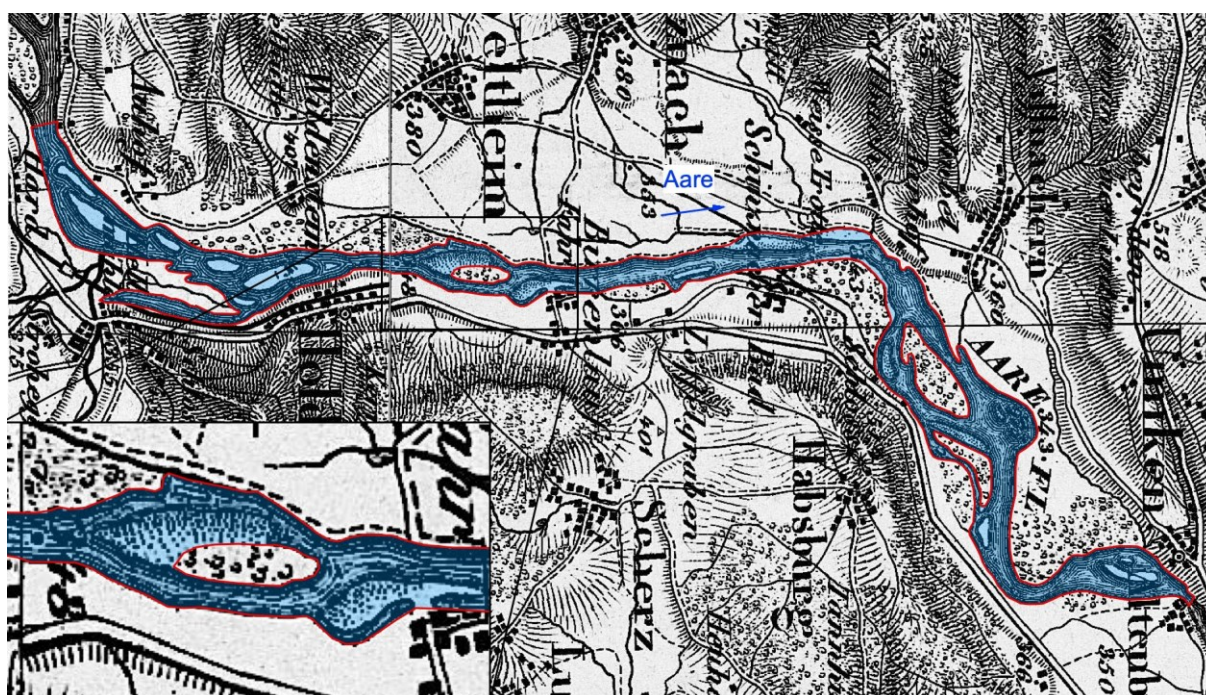


Abb. 30 Aare, Dufourkarte, Erstausgabe (1849-1861). Auenstein bis Brugg mit dem planimetrierten Bereich (rote Linie). Dargestellter Massstab 1:50'000, Detail 1:20'000.

Anwendungsbeispiele

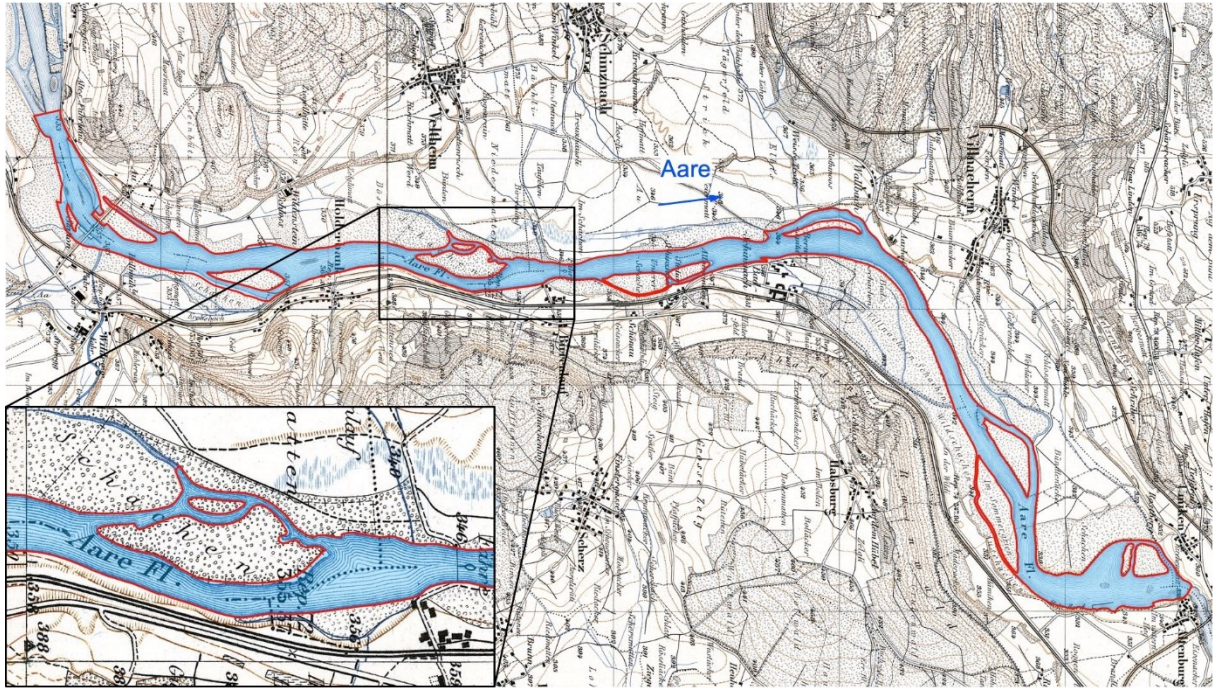


Abb. 31 Aare, Siegfriedkarte, Erstausgabe (1872-1882). Auenstein bis Brugg mit dem planimetrierten Bereich (rote Linie). Dargestellter Massstab 1:50'000, Detail 1:20'000.

8.2.4 Veränderte Randbedingungen

8.2.4.1 Abflussregime

Reduzierter bett-
bildender Abfluss HQ_2

Durch das Ausleitkraftwerk Wildegg-Brugg wird in der Restwasserstrecke der bettbildende Abfluss HQ_2 reduziert. Der Ausbauabfluss des Kraftwerks beträgt $420 \text{ m}^3/\text{s}$. Bei Hochwasserabfluss kann wegen dem steigenden Unterwasserspiegel weniger Wasser turbinieren werden. Für die vorliegende Betrachtung wird davon ausgegangen, dass bei einem HQ_2 noch $400 \text{ m}^3/\text{s}$ turbinieren werden.

Bei reduziertem bettbildendem Abfluss wird das Gewässer und damit die Sohlenbreite skaliert. Ebenso kann mit dem reduzierten Abfluss weniger Geschiebe transportiert werden. Die Berechnung der reduzierten Breite und Geschiebefracht erfolgt nach Kapitel 7.2. Es ergeben sich folgende Werte:

Reduzierte Sohlenbreite und Geschiebefracht

	Referenzzustand	Verändertes Abflussregime
HQ_2	$920 \text{ m}^3/\text{s}$	$520 \text{ m}^3/\text{s}$
Sohlenbreite	200 m	150 m
Geschiebefracht	$11'000 \text{ m}^3/\text{a}$	$6'200 \text{ m}^3/\text{a}$

Anwendungsbeispiele

In der Restwasserstrecke nimmt die massgebende Sohlenbreite von 200 m (Referenzzustand) auf 150 m (verändertes Abflussregime) ab.

Im kleineren Gewässer nimmt die Geschiebetransportkapazität ab. Damit sich eine ähnliche Morphologie einstellt, sind dem Gewässerabschnitt 6'200 m³/a Geschiebe zuzuführen.

8.2.4.2 Geschiebefracht

Reduzierte Geschiebefracht

Im Referenzzustand transportierte die Aare in der Strecke Wildegg-Brugg im Mittel rund 11'000 m³/a Geschiebe. Durch Kiesentnahmen und Wasserkraftwerke wurde der Geschiebehaushalt der Aare stark beeinträchtigt. In der Strategischen Planung sind Massnahmen vorgeschlagen, mit denen die Geschiebefracht auf durchschnittlich 5'000 m³/a erhöht werden soll.

In der Restwasserstrecke führt die gegenüber dem Sollwert von 6'200 m³/a (verändertes Abflussregime) reduzierte Geschiebefracht von 5'000 m³/a zu einer weiteren Reduktion der massgebenden Breite. Die Berechnung erfolgt nach Kapitel 7.2.

Reduzierte Sohlen- breite infolge ver- ändertem Abfluss- regime und verän- derter Geschiebe- fracht

	Verändertes Abflussregime	Verändertes Abflussregime und veränderte Geschiebefracht
Sohlenbreite	150 m	130 m
Geschiebefracht	6'200 m ³ /a	5'000 m ³ /a

In der Restwasserstrecke wird sich unter den veränderten Randbedingungen eine [mittlere Sohlenbreite von rund 130 m](#) einstellen.

Anwendungsbeispiele

8.3 Beispiel Thur Wattwil (Kanton St. Gallen)

Im Beispiel wird die Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite der Thur bei Wattwil im Kanton St. Gallen von GEWISS km 41.7 – 34.8 (siehe Abb. 392) vorgestellt.

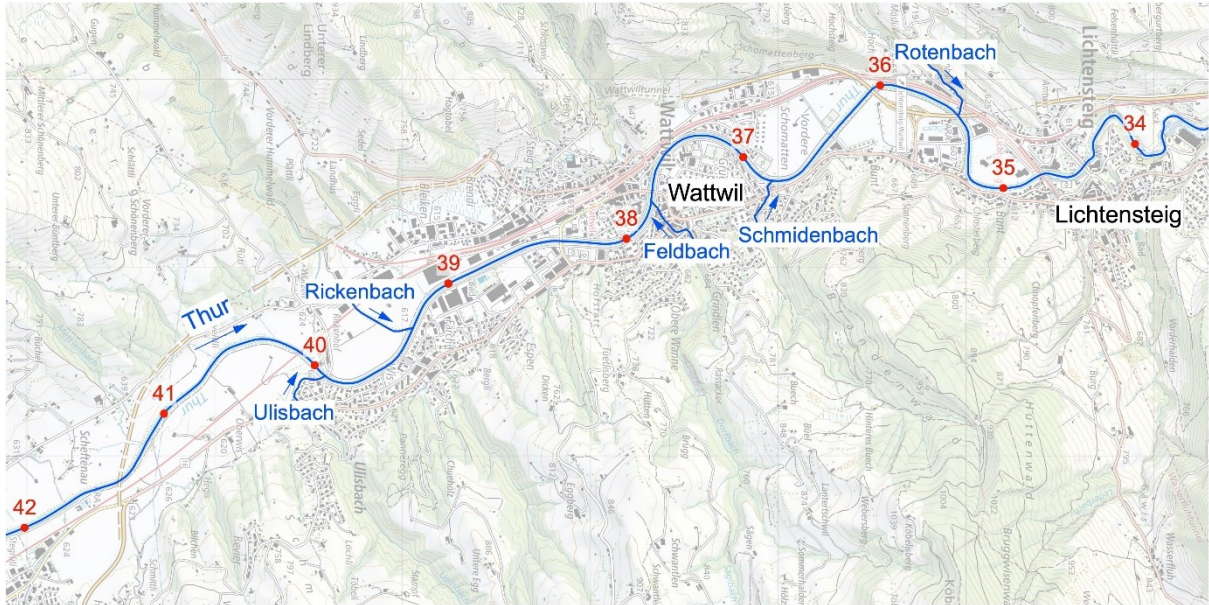


Abb. 32 Lage des Untersuchungsperimeters an der Thur bei Wattwil (GEWISS km 41.7 – 34.8), Massstab 1:40'000.

8.3.1 Ist-Zustand

Einzugsgebiet

Im Untersuchungsperimeter nimmt das Einzugsgebiet der Thur von rund 215 km² auf 260 km² zu.

Gerinneform

Im Perimeter fließt die Thur durch rezente Alluvion, die seitlich durch Schwemmkegel und die Talflanken begrenzt ist. Im **Referenzzustand** zeigte die Thur einen stark gewundenen Lauf (Mäander) mit Bänken, der bei Hochwasserereignissen langsam migrierte. Heute ist der Lauf gestreckt und das Gerinne eingengt.

Geschiebehauhalt

Die Thur weist bei Wattwil eine mittlere Geschiebeführung auf. Die Geschiebefracht ist naturnah und der Geschiebehauhalt nicht wesentlich beeinträchtigt.

Zustand Gerinne

Seit der Einengung und Kanalisierung hat sich die Thur um bis zu 2 m in die Alluvion eingetieft. Lokal wurden die darunter anstehenden Seebodenlehme freigelegt. Die Sohle weist eine geringe Breitenvariabilität auf und ist mehrheitlich eben und strukturlos. (Abb. 4234). Lokal bestehen an den Gleitufeln kleine Geschiebebänke (Abb. 35). Die Ufer sind schmal und infolge der Eintiefung steil.

8.3.2 Grundlagen und Ansätze zur Breitenermittlung

In der nachstehenden Tabelle ist die Auswertung der historischen Karten, einer Referenzstrecke und die Anwendung der empirischen Formeln mit den berücksichtigten Parametern angegeben.

Bei den historischen Karten wurde die dynamische Breite mithilfe einer Planimetrie⁶ sowie durch Mittelbildung der Querprofilbreiten (Profilabstand 100m) berechnet. Die zwei Auswertungen ergeben nahezu gleiche Breiten.

Als naturnahe Referenzstrecke wurde ein nicht verbauter Abschnitt flussabwärts von Lichtensteig (Talmäander) ausgewertet. Dieser zeigt eine grosse Breitenvariabilität und Kiesbänke. Lokal ist am Ufer Fels anstehend, was die freie Entwicklung einschränkt.

Bei den empirischen Ansätzen wurden 5 Methoden berücksichtigt. Bei der Formel nach Parker wurde zusätzlich die Breite mit einem Faktor zur Berücksichtigung der Gerinneform multipliziert. Dieser beträgt bei gewundenen Gewässern mit Bänken 0.45 - 0.9 (gewählt: 0.7).

⁶ Mittlere Breite = (dargestellte Wasserfläche zuzüglich Kiesbänke) / Lauflänge.

Anwendungsbeispiele

1 Historische Dokumente						
	Grundlage	Auswertung siehe	Dynamische Breite		Gerinneform	Anthropogene Einflüsse
			Planimetrie	Aus Profilen		
1a.	Eschmannkarte (1854)	Abb. 5	43 m	44 m	Gewundenes Gerinne mit Bänken und einer Insel	Lokale Einengung bei Brücken und einer Wasserfassung
1b.	Siegfriedkarte (1879)	Abb. 2, Abb. 6	46 m	46 m		
2 Naturnahe Vergleichsstrecken						
	Abschnitt	Auswertung siehe	Sohlenbreite		Gerinneform	Anthropogene Einflüsse
2a.	Flussabwärts von Liechtensteig	Abb. 7	30 - 60 m, Mittelwert 40 m		Gewundenes Gerinne mit Bänken	Weitgehend naturnah; lokal durch anstehenden Fels in freier Entwicklung eingeschränkt.
3 Empirische Ansätze						
	Ansatz	Auswertung siehe	Ausgabegrösse	Breite HQ2	Breite HQ5	
3a.	Parker	Abb. 2	Gerinnebreite	60 - 62 m	70 - 72 m	
3b.	Parker mit Morphologie	Abb. 2	Gerinnebreite	42 - 43 m	49 - 50 m	
3b.	Yalin	Abb. 2	Gerinnebreite	41 - 43 m	48 - 49 m	
3c.	Ikeda	Abb. 2	Gerinnebreite	34 - 53 m	44 - 69 m	
3d.	Ashmore	Abb. 2	Wasserspiegelbreite	46 - 70 m	58 - 88 m	
3e.	Millar 2005	Abb. 2	Wasserspiegelbreite	56 - 75 m	69 - 92 m	
4 Parameter						
	Grösse	Wert				
4a.	Abfluss HQ2	151 - 180 m ³ /s				
4b.	Abfluss HQ5	202 - 240 m ³ /s				
4c.	Gefälle	2 - 3.5 ‰				
4d.	Korndurchmesser d50	4 - 5 cm				
4e.	Korndurchmesser d90	15 - 18 cm				
4f.	μ (verwendet in der Formel nach Millar)	1.0				

Anwendungsbeispiele

8.3.3 Gewichtung und natürliche Sohlenbreite

Die nachfolgende Matrix zeigt die aus den Grundlagen ermittelten Breiten und die gewählte Gewichtung.

				Gewichtete Breite (gerundet)	Gewichtung Methode
1	Historische Dokumente			45 m	100%
		Breite	Gewichtung		
1a.	Eschmannkarte (1854)	44 m	50%		
1b.	Siegfriedkarte (1879)	46 m	50%		
2	Naturnahe Vergleichsstrecken			40 m	0%
		Breite	Gewichtung		
2a.	Flussabwärts von Liechtensteig	40 m	100%		
3	Empirische Ansätze			keine	0%
		Breite (HQ2 / HQ5)	Gewichtung		
3a.	Parker	61 m / 71 m	keine Werte, nur zur Plausibilisierung genutzt		
3b.	Parker mit Morphologie	43 m / 49 m			
3b.	Yalin	42 m / 48 m			
3c.	Ikeda	44 m / 56 m			
3d.	Ashmore	58 m / 73 m			
3e.	Millar 2005	66 m / 80 m			
Resultierende Sohlenbreite (gerundet)				45 m	

Historische Karten

Die Eschmann- und die Siegfried-Karte wurden im Massstab 1 : 25'000 erstellt. Beide zeigen einen ähnlichen Verlauf der Thur. Auf der Siegfried-Karte ist bei Stegrüti eine Ufererosion mit starker Aufweitung des Gerinnes zu erkennen. Die dynamische Breite variiert zwischen 30 und 70m, resp. 125m (Stegrüti, Siegfried-Karte). Die mittlere Breite beträgt 45m. In den 25 Jahren zwischen der Ausgabe der zwei Karten hat die Besiedlung deutlich zugenommen und die Bahnlinie wurde erstellt. Dennoch zeigen die zwei Karten eine praktisch identische mittlere Sohlenbreite. Eine Gewichtung von je 50% ist daher gerechtfertigt.

Referenzstrecke

Die Referenzstrecke zeigt dynamische Breiten zwischen 30 und 60m mit einem Mittelwert von 40m. Damit liegt die mittlere Breite etwas unter derjenigen der historischen Karten. Wegen der von der Projektstrecke abweichenden Morphologie (Talmäander) wird der Wert nicht berücksichtigt.

Empirische Ansätze

Mit den empirischen Ansätzen werden Gerinnebreiten zwischen 42 m und 80 m erreicht. Die Werte sind mehrheitlich grösser als die Breite gemäss den historischen Karten. Die grosse Schwankungsbreite widerspiegelt die grosse Unsicherheit bei Anwendung dieser Ansätze. Mit der Methode "Parker mit

Anwendungsbeispiele

Morphologie" wird eine Breite von 43 m (HQ₂) bis 49 m (HQ₅) erreicht, was gut mit den Breiten der historischen Karten übereinstimmt.

*Natürliche
Sohlenbreite*

Mit der empfohlenen Gewichtung resultiert eine **mittlere natürliche Sohlenbreite von 45m**.

Anwendungsbeispiele

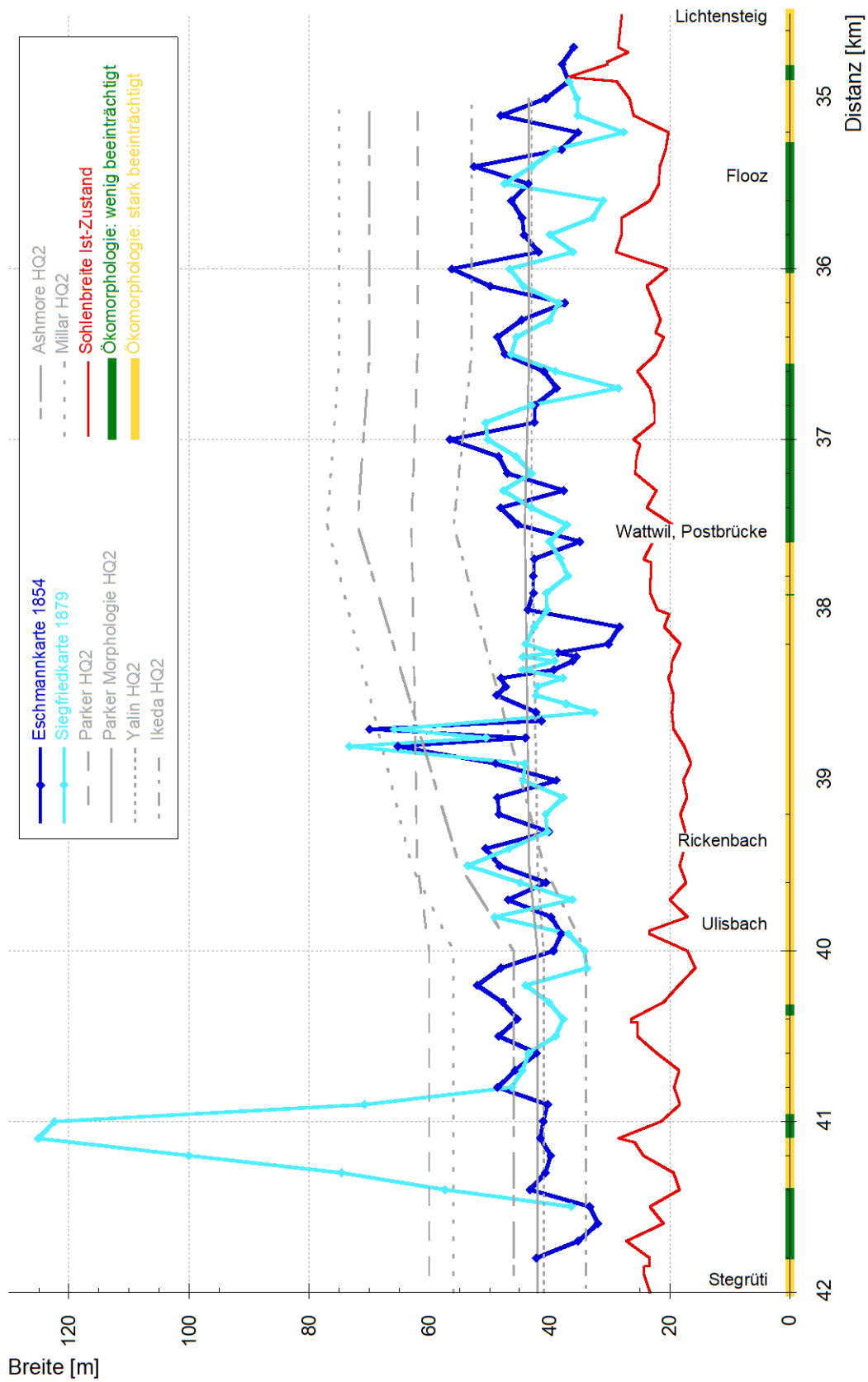


Abb. 33 Thur GEWISS km 42 – 34.5. Längenprofil der Breite gemäss historischen Karten, für verschiedene empirische Ansätze sowie im Istzustand. Bei den empirischen Ansätzen ist die Änderung der Breite in Fließrichtung auf die Abflusszunahme zurückzuführen.

Anwendungsbeispiele



Abb. 34 *Thur ab Brücke Waisenhausstrasse (GEWISS km 39.9) mit schmaler, ausgeräumter Sohle sowie steilen und strukturarmen Ufern (2015). Blick flussaufwärts.*



Abb. 35 *Thur mit anstehendem Fels entlang dem Prallufer und einer Kiesbank entlang dem Gleitufer (GEWISS km 35.9). Blick flussabwärts (2015).*

Anwendungsbeispiele

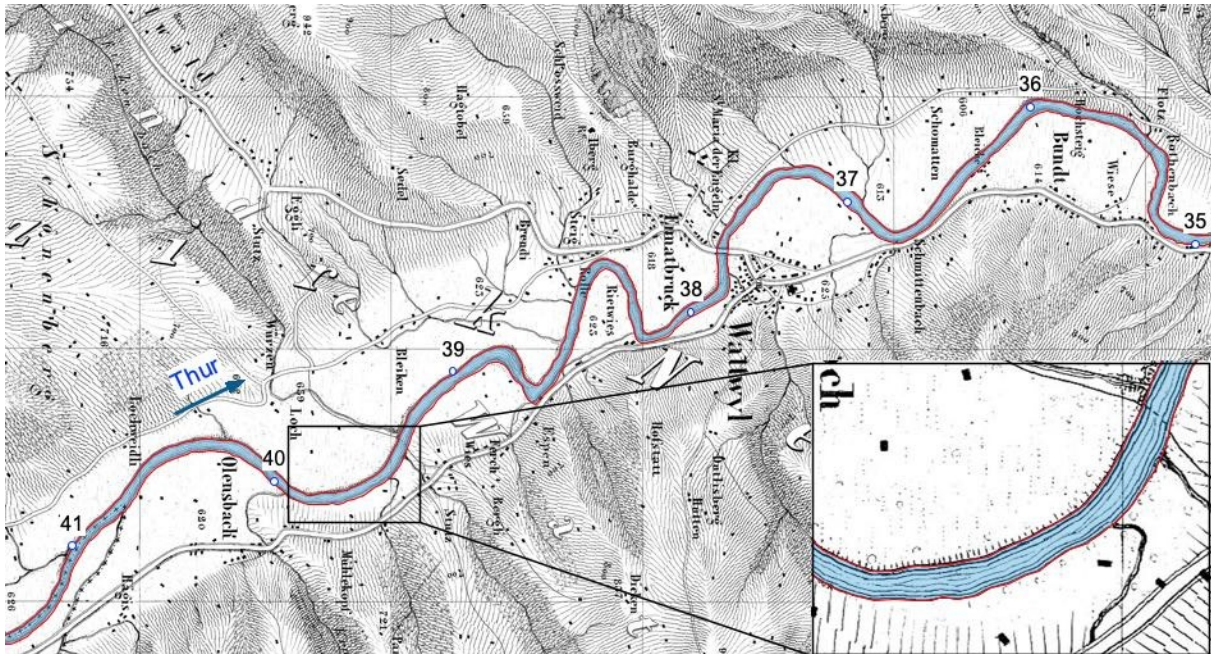


Abb. 36 Thur, Eschmannkarte (1854). Stegrüti (Ebnet-Kappel) bis Lichtensteig mit dem planimetrierten Gerinne (rote Linie). Dargestellter Massstab 1:30'000, Detail 1:10'000.

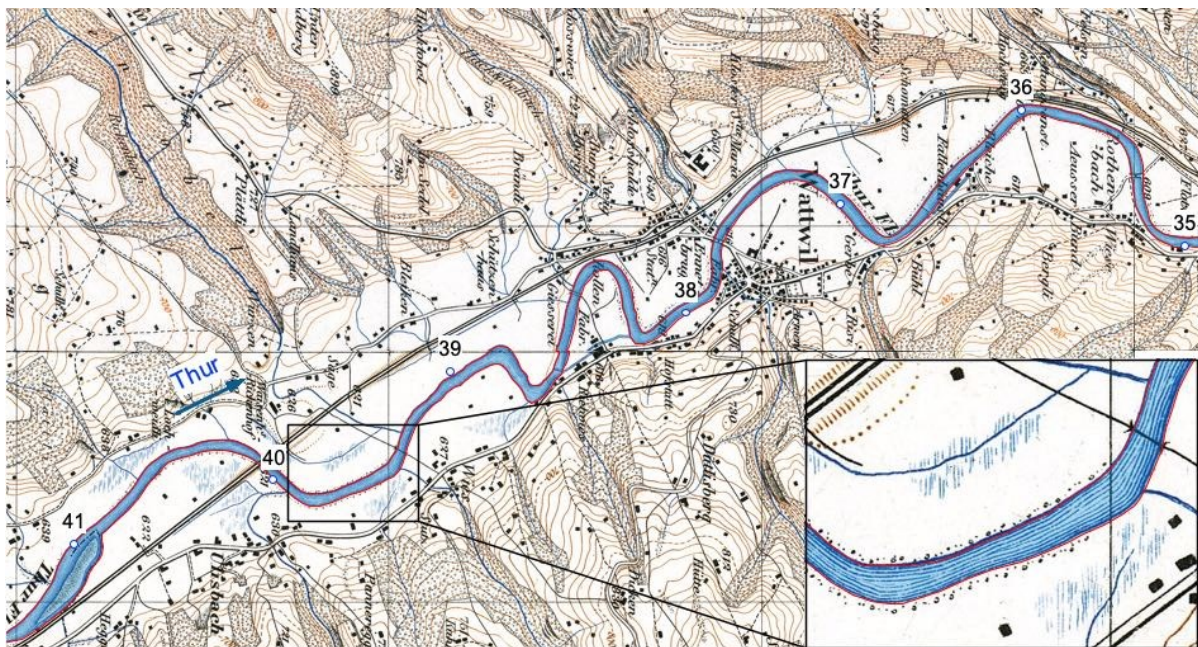


Abb. 37 Thur, Siegfriedkarte, Erstausgabe (1879). Stegrüti (Ebnet-Kappel) bis Lichtensteig mit dem planimetrierten Gerinne (rote Linie). Dargestellter Massstab 1:30'000, Detail 1:10'000.

Anwendungsbeispiele



Abb. 38 Thur bei Lichtensteig mit zwei Referenzstrecken. A: Fläche Gewässersohle (dynamischer Bereich); L: Abschnittslänge; ØB: Mittlere Sohlenbreite. Zwischen den zwei Referenzstrecken befindet sich eine natürliche Engstelle (Fels).

Anwendungsbeispiele

8.4 Sitter (Kanton Thurgau)

Im Beispiel wird die Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite der Sitter an der Grenze der Kantone Thurgau und St. Gallen von GEWISS km 6.6 – 8.6 (siehe Abb. 39) vorgestellt.

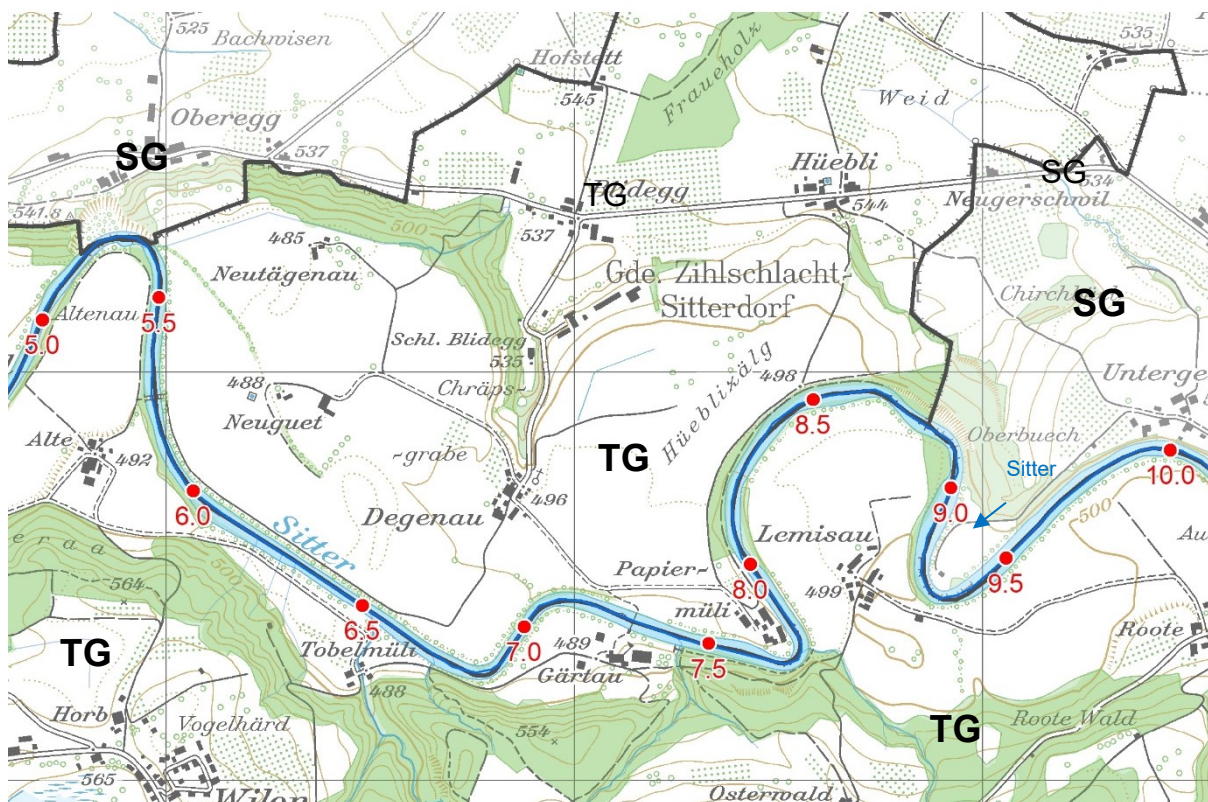


Abb. 39 Lage des Untersuchungsperimeters an der Sitter (GEWISS km 6.6 – 8.6)

8.4.1 Ist-Zustand

Einzugsgebiet

Im Untersuchungsperimeter weist die Sitter ein Einzugsgebiet rund 300 km² auf.

Gerinneform

Die Sitter fliesst im Untersuchungsperimeter fast ausschliesslich durch offenes Landwirtschaftsland. Einzelne Weiler und Waldflächen werden nur punktuell tangiert. Die Flussachse hat einen gewundenen bis mäandrierenden Verlauf. Die aktuelle Sohlenbreite beträgt im Mittel ca. 31 m.

Zustand Gerinne

Morphologisch weist der Fluss wegen der bestehenden Uferverbauungen eine geringe Breitenvariabilität auf. Die Sohle zeigt jedoch ausgeprägte Bank-Kolk-Strukturen. Innerhalb des Untersuchungsperimeters ist keine Vegetation auf den Bänken zu erkennen (Abb. 42, Abb. 43).

Anwendungsbeispiele

8.4.2 Grundlagen und Ansätze zur Breitenermittlung

1 Historische Dokumente						
Grundlage	Gerinnebreite	Schätzung Uferbereichsbreite	Sohlenbreite (Gerinne - Ufer)	Gerinneform	anthropogene Einflüsse	
1a. Sulzbergerkarte (1836)	70 m	2 x 4 m	62 m	gewundenes bis mäandrierendes Gerinne mit einzelnen Verzweigungen	Es sind keine Uferverbauungen zu erkennen, sie dürften aber wegen der Landwirtschaftlichen Nutzung des Umlandes vorhanden gewesen sein.	
1b. Dufourkarte (1844)	95 m	2 x 4 m	87 m			
1c. Eschmannkarte (1850)	70 m	2 x 4 m	62 m			
2 Naturnahe Vergleichsstrecken						
Abschnitt	Gerinnebreite	Uferbereichsbreite	Sohlenbreite	Gerinneform	anthropogene Einflüsse	
2a. km TG 8.8 - 9.2	45 m	2 x 4 m	37 m	gewundenes bis mäandrierendes Gerinne mit einzelnen Verzweigungen, Abschnitt zu Kurz um die Gerinneform sicher zu bestimmen	stellenweise linksseitiger Uferverbau vorhanden, wird gemäss Ökomorphologiestufe F als natürlich / naturnah eingestuft	
3 Terrainanalysen						
Grundlage	Auswertung	Gerinneform				
3a. Swisssalti 3D von 2019 50cm Raster	Im Untersuchungsperimeter konnten im Terrain keine gut erhaltenen Altläufe erkannt werden, weshalb sich über diese Grundlage keine direkten Rückschlüsse zur natürlichen Sohlenbreite herleiten lassen.	Die Reliefformen weisen darauf hin, dass es sich im Naturzustand um ein schwach mäandrierendes Gerinne gehandelt hat. Der heutige Gewässerverlauf entspricht immer noch dieser Form.				
4 Empirische Ansätze						
Ansatz	Formel	Sohlenbreite		Parameter		
4a. Gleichgewichtsbr. nach Yalin	$Sohlenbreite = 1.5 Q^{0.5} / dm^{0.25}$	46 m		$Q = 285 \text{ m}^3/\text{s}$, $dm = 0.09 \text{ m}$		
4b. Grenzbreite nach Ashmore	$Sohlenbreite = 0.0098 (\rho_w g Q J)^{0.777} / dm^{0.7}$	74 m		$Q = 285 \text{ m}^3/\text{s}$, $J = 0.004 \text{ m/m}$, $dm = 0.09 \text{ m}$		
4c. Grenzbreite nach Millar	$Sohlenbreite = 16.5 Q^{*0.7} J^{0.6} \mu^{-1.1} dm$ mit $Q^* = Q / ((s-1) g dm)^{0.5} dm^2$	46 m		$Q = 285 \text{ m}^3/\text{s}$, $J = 0.004 \text{ m/m}$, $\mu = 1.5$, $dm = 0.09 \text{ m}$, $s = 2.65$		

Anwendungsbeispiele

8.4.3 Gewichtung

Gewichtungsmatrix

Die Nachfolgende Matrix zeigt die aus den Grundlagen ermittelten Breiten und die gewählte Gewichtung. Daraus ergibt sich an der Sitter im Untersuchungsabschnitt eine natürliche Sohlenbreite von 60 m.

			gewichtete Breite (gerundet)	Gewichtung Methode
1. Historische Dokumente			62 m	100 %
		<u>Breite</u>	<u>Gewichtung</u>	
1a.	Sulzbergerkarte (1836)	62 m	50 %	
1b.	Dufourkarte (1844)	87 m	0 %	
1c.	Eschmannkarte (1850)	62 m	50 %	
2. Naturnahe Vergleichsstrecken			37 m	0 %
		<u>Breite</u>	<u>Gewichtung</u>	
2a.	km TG 8.8 - 9.2	37 m	100 %	
3. Terrainanalysen			-	0 %
4. Empirische Ansätze			keine	0 %
		<u>Breite</u>	<u>Gewichtung</u>	
4a	Gleichgewichtsbreite nach Yalin	46 m	keine, Werte nur zur Plausibilisierung genutzt	
4b.	Grenzbreite nach Ashmore	74 m		
4c.	Grenzbreite nach Millar	46 m		
Resultierende Sohlenbreite (gerundet)			60 m	

Begründung der Gewichtungen:*Historische
Dokumente*

Die Dufourkarte wurde im Massstab 1:100'000 gezeichnet, womit sie deutlich gröber aufgelöst ist als die Eschmannkarte und die Sulzbergerkarte (beide 1:25'000). Der Detailreichtum der Dufourkarte ist auch entsprechend gering. Aufgrund dessen wurde entschieden die Dufourkarte mit 0 % zu gewichten. Die Sulzbergerkarte und die Eschmannkarte sind beide deutlich genauer als die Dufourkarte. Auf beiden Karten fehlen aber weitgehend Gewässermorphologische Details wie Kiesbänke oder Uferstrukturen. Dies führt zur Annahme, dass das gesamte Gerinne als Wasserfläche eingezeichnet wurde. Dem entsprechend wird die gemessene Wasserspiegelbreite als Gerinnebreite interpretiert. Auch Uferverbauungen sind nicht sichtbar, obschon sie im landwirtschaftlich genutzten Tal durchaus hätten vorhanden sein können. Die Sulzbergerkarte zeigt Waldflächen an, wohingegen diese in der Eschmannkarte nicht dargestellt wurden. Bezüglich grösserer Hochwasser oder Trockenperioden vor dem Aufnahmezeitpunkt

Anwendungsbeispiele

liegen sowohl bei der Sulzbergerkarte als auch bei der Eschmannkarte keine Angaben vor. Da die beiden Karten eine vergleichbare Qualität aufweisen, werden sie bei den historischen Dokumenten mit jeweils 50 % gewichtet.

Mit der Sulzbergerkarte und der Eschmannkarte wird die Methode "historische Dokumente" als brauchbar zur Festlegung der natürlichen Sohlenbreite beurteilt. Wie unten aus dem Beschrieb der anderen Methoden hervorgeht, sind die historischen Dokumente die besten Grundlagen zur Festlegung der natürlichen Sohlenbreite. Es wird auch der Methode "naturnahe Vergleichsstrecken" eine gewisse Aussagekraft zugestanden. Da sich die Methode "naturnahe Vergleichsstrecken" aber auf einen anthropogen stärker beeinflussten Zustand bezieht, wird sie gegenüber den historischen Dokumenten als weniger aussagekräftig beurteilt. Die Gewichtung der Methode "historische Dokumente" wird deshalb gutachterlich als alleinig massgebend bei 100 % festgelegt.

*Naturnahe
Vergleichsstrecken*

Die naturnahe Vergleichsstrecke zeigt ein strukturreiches Gewässer mit teils zuwachsenden Bereichen innerhalb des morphologisch frei zur Verfügung stehenden Raumes. Die Sohle wird aber in ihrer Breite durch Uferverbauungen oder einseitig durch natürliche Steilwände begrenzt. Die beobachtete Sohlenbreite liegt deshalb tendenziell unter der natürlichen Sohlenbreite. Da die Methode der historischen Dokumente qualitativ gute Grundlagen beinhaltet, wird die Methode der naturnahe Vergleichsstrecken nicht für die Herleitung der natürlichen Sohlenbreite verwendet.

Terrainanalysen

Im Untersuchungsperimeter konnten im Terrain keine gut erhaltene Altläufe erkannt werden die Rückschlüsse auf die natürliche Sohlenbreite liefern könnten. Die Methode wird dem entsprechend mit 0 % gewichtet.

Empirische Ansätze

Da nebst den empirischen Ansätzen andere qualitativ gute Grundlagen zur Verfügung stehen, wurde die Methode der empirischen Ansätze mit 0 % gewichtet.

Anwendungsbeispiele

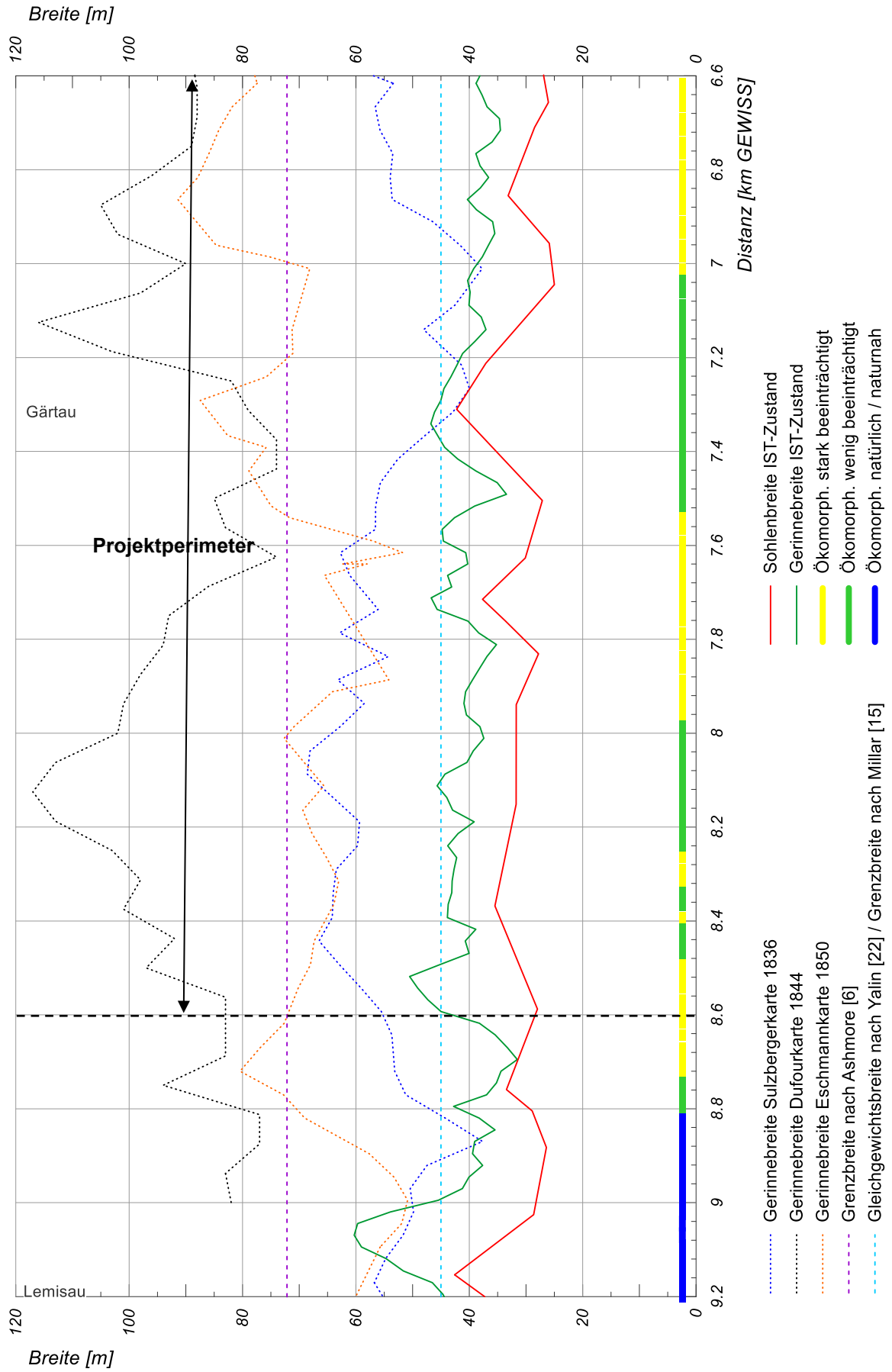


Abb. 40 Sitter GEWISS Km 6.6 -9.2, Darstellung ermittelte Breiten im Längenprofil

Anwendungsbeispiele

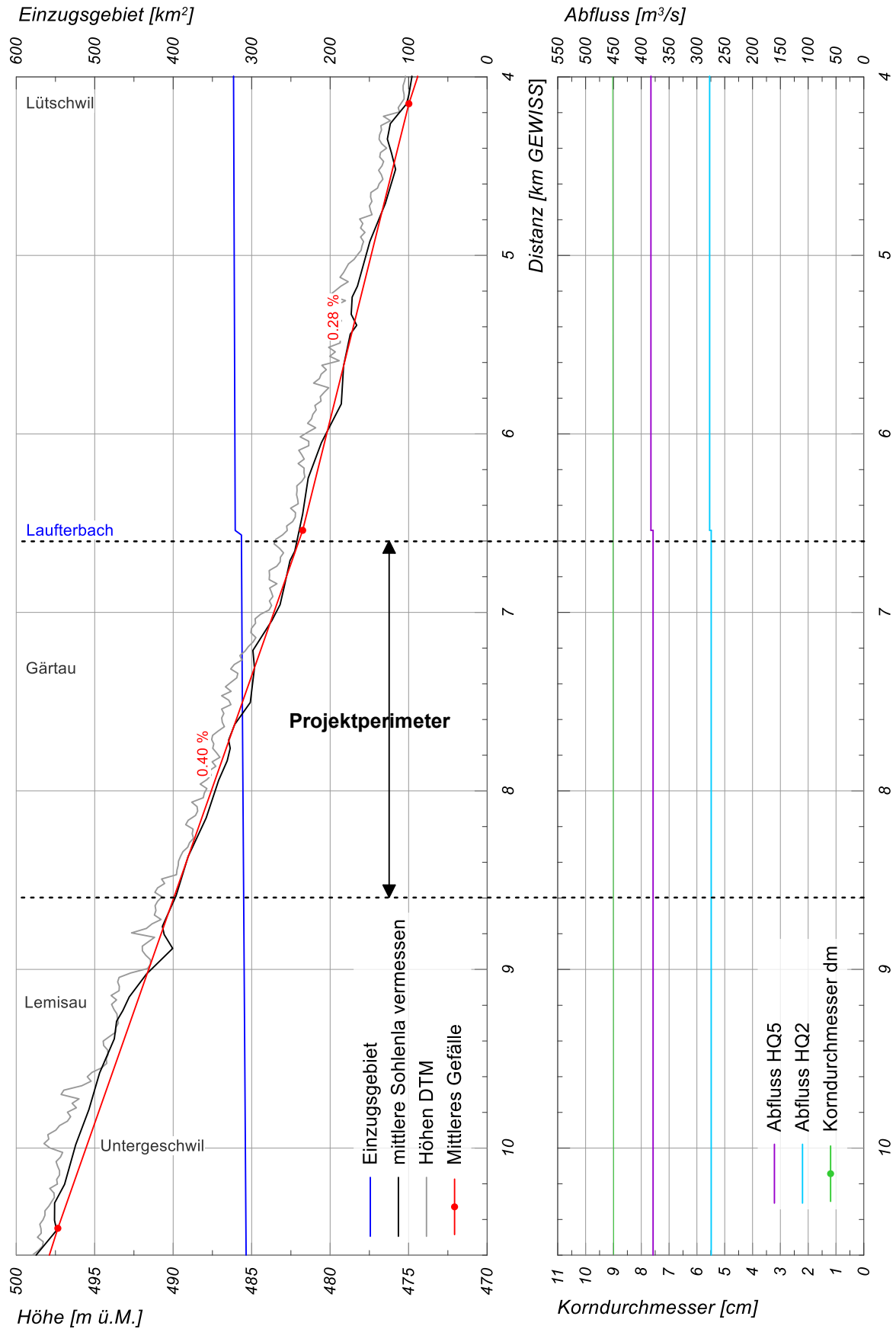


Abb. 41 Sitter GEWISS Km 4.0 -10.6, Darstellung diverser Grundparameter im Längenprofil

Anwendungsbeispiele



Abb. 42 Sitter bei Gertau km 7.3, Fließrichtung von links nach rechts (11.05.2016, $Q = \text{ca. } 6 \text{ m}^3/\text{s}$)



Abb. 43 Sitter bei Gertau km 7.2, Blick flussabwärts (11.05.2016, $Q = \text{ca. } 6 \text{ m}^3/\text{s}$)

Anwendungsbeispiele

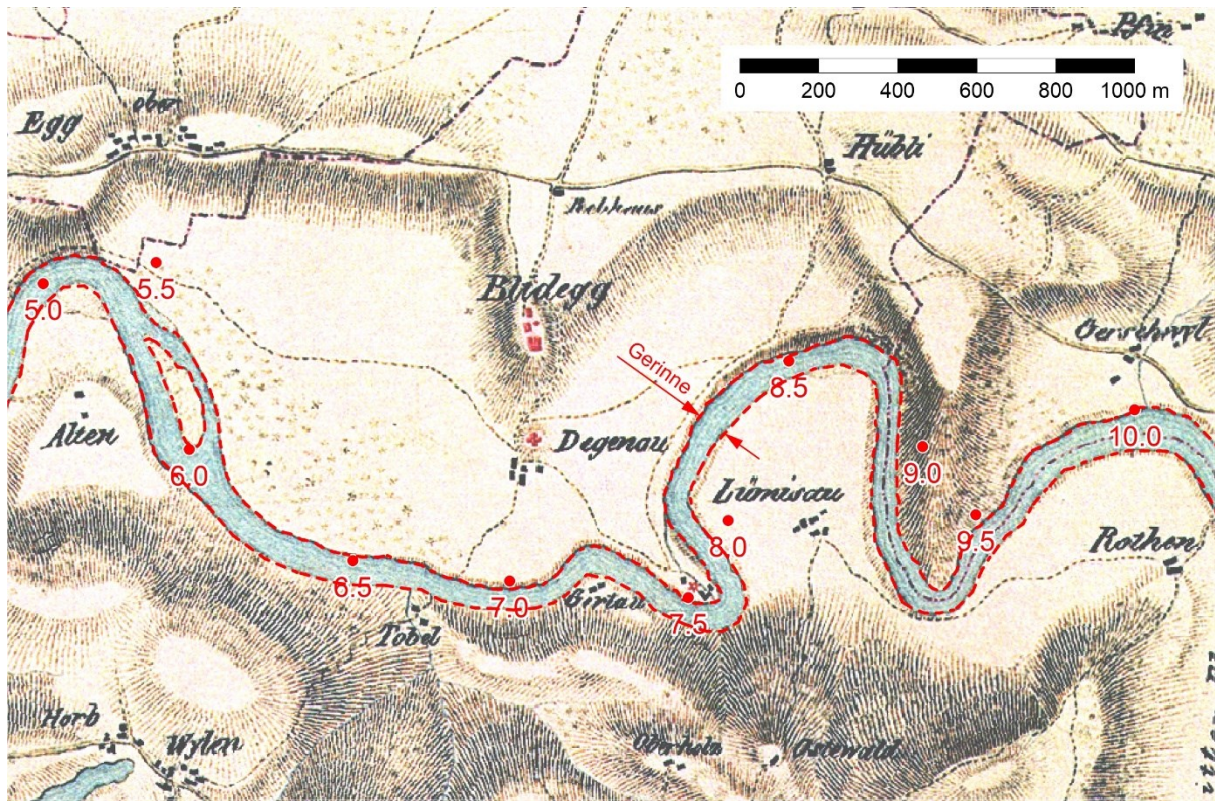


Abb. 44 Sitter Sulzbergkarte 1836 km 5.0 – 10.0, rot-gestrichelte Linie = Gerinnebreite

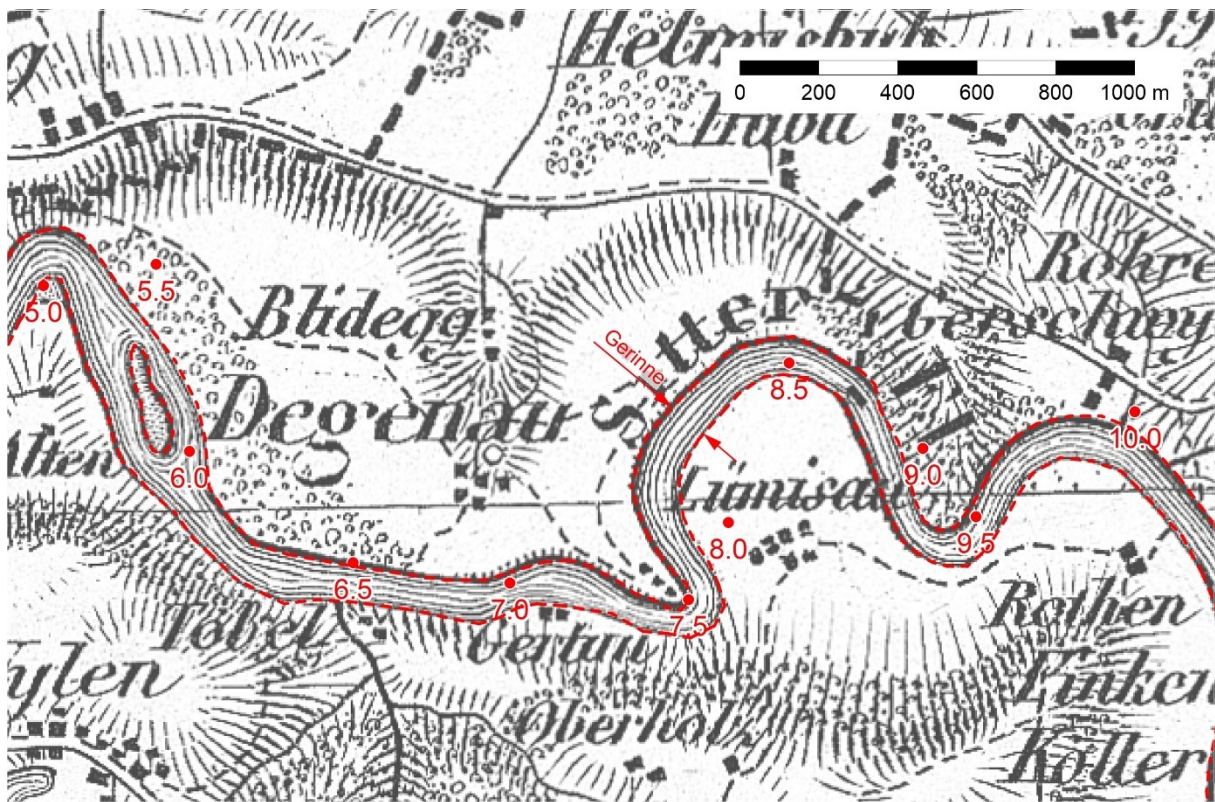


Abb. 45 Sitter Dufourkarte Erstausgabe 1844 km 5.0 – 10.0, rot-gestrichelte Linie = Gerinnebreite

Anwendungsbeispiele

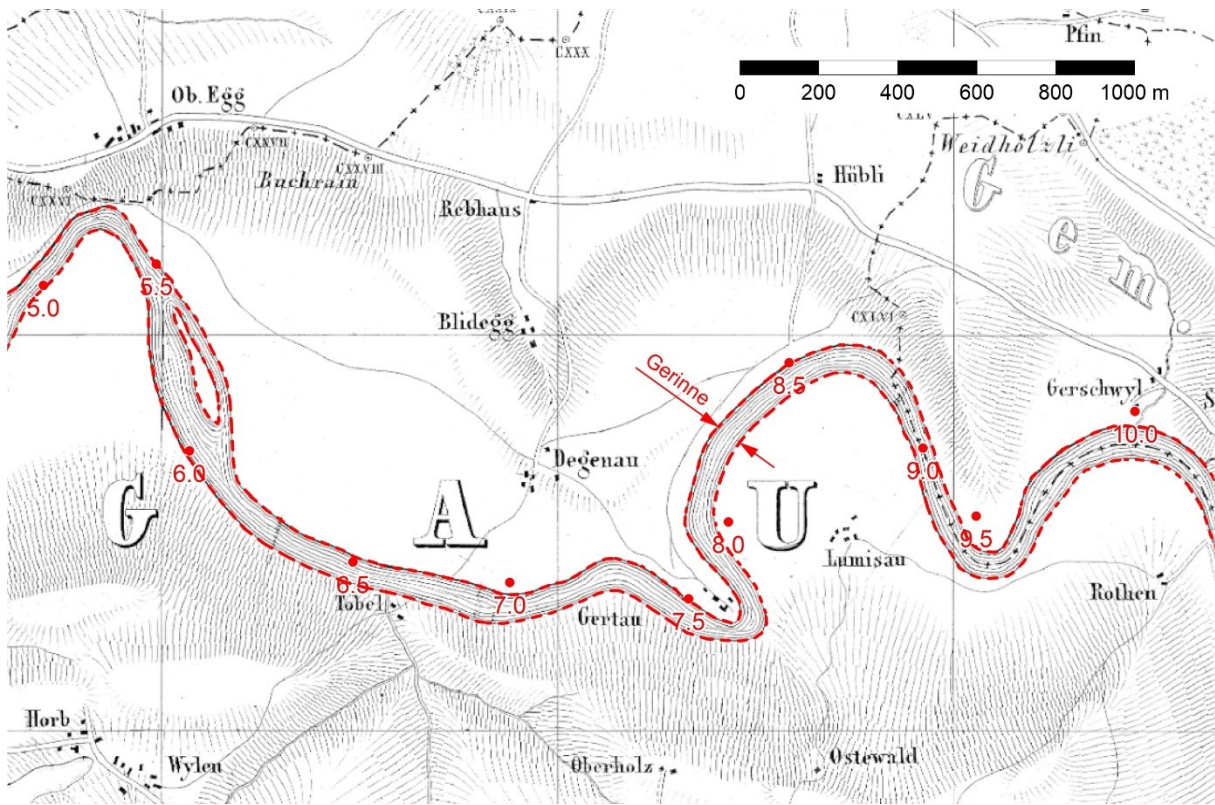


Abb. 46 Sitter Eschmannkarte 1850 km 5.0 – 10.0, rot-gestrichelte Linie = Gerinnebreite

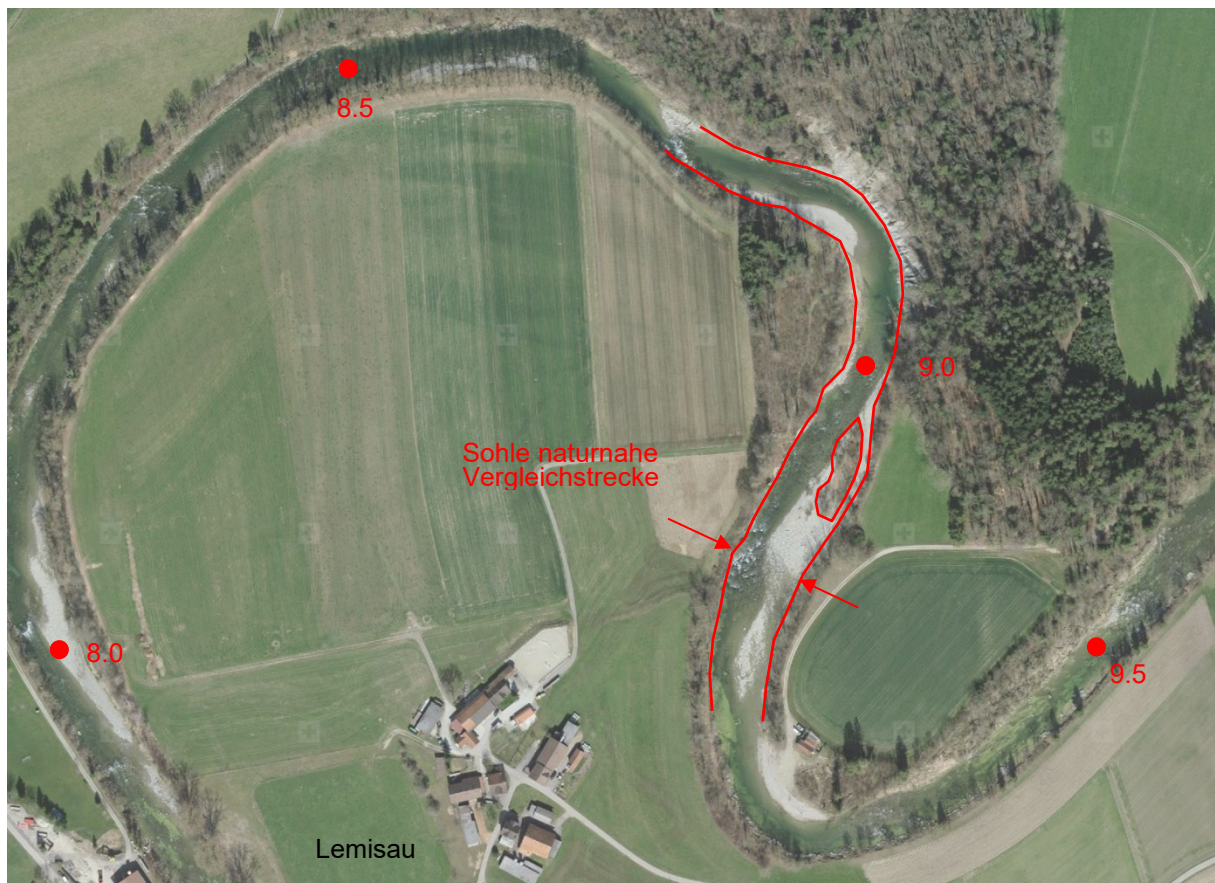


Abb. 47 Naturnahe Vergleichsstrecke (km 8.8 – 9.2)

9 Quellenverzeichnis

- [1] BAFU (1998): Ökomorphologie Stufe F, Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer gemäss dem Modul-Stufen-Konzept, Bern.
- [2] BAFU (2001): Hochwasserschutz an Fliessgewässern, Wegleitung des BWG (heute BAFU), Bern
- [3] BAFU und EAWAG (2006): Ökomorphologie Stufe S, Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer gemäss dem Modul-Stufen-Konzept, Bern.
- [4] BAFU (2015): Fachspezifische Erläuterungen zur Programmvereinbarung im Bereich Revitalisierungen, Handbuch Programmvereinbarungen im Umweltbereich 2016 – 2019
- [5] Schälchli, U. & Hunzinger, L. (2021): Die erforderliche Geschiebefracht. Fachbericht zum Modul «Geschiebehaushalt – Massnahmen» der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt. Abteilung Wasser.
- [6] Hunzinger L., Schälchli U., Nitsche M., Kirchhofer A., Pfändler M., Roulier C., Ruesch T (Entwurf 21.9.2021): Geschiebehaushalt – Massnahmen. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. X:
- [7] 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.
- [8] Bray, D.I. (1982): Regime equations for gravel-bed rivers. In: Gravel-Bed Rivers (Eds. R.D. Hey, J.C. Bathurst and C.R. Thorne), pp. 517-552. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, United Kingdom.
- [9] Fahnestock, R.K. (1963): Morphology and hydrology of a glacial stream - White River, Mount Rainer, Washington. U. S. Geological Survey Professional Paper, 422A.
- [10] Griffiths, G.A. (1981): Stable channel design in gravel-bed rivers. Journal of Hydrology, 52, 291-305.
- [11] Henderson, F.M. (1966): Open channel flow. MacMillan Publishing, New York, 522 pp.

Quellenverzeichnis

- [12] Hey, R.D, Thorne, C.R (1986): Stable Channels with Mobile Gravel Beds. *J. Hydraul. Eng.*, 112(8),671-689
- [13] Ikeda, S. et al. (1988): Stable Width and Depth of Straight Gravel Rivers with Heterogeneous Bed Material. *Water Resources Research*, 24, 713-722
- [14] Meyer-Peter, E., Müller, R. (1948): Formulas for Bed-Load Transport, Second Meeting IAHR, Stockholm, 1948
- [15] Marti, C. (2006): Morphologie von verzweigten Gerinnen – Ansätze zur Abfluss-, Geschiebetransport- und Kolkiefenberechnung. Mitteilung Nr. 199, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich, Zürich, pp. 282.
- [16] Millar, R.G. (2005): Theoretical regime equations for mobile gravel-bed rivers with stable banks. *Geomorphology*, 64, 207-220.
- [17] Mosley, M.P. (1983): Response of braided rivers to changing discharge. *Journal of Hydrology*, 22(1), 18-67.
- [18] Paccaud, G. Roulier, Ch. (2016) : Espace nécessaire aux grands cours d'eau de Suisse, Service conseil Zones alluviales, Yverdon, 2016
- [19] Parker, G. (1979): Hydraulic geometry of active gravel rivers. *Journal of the Hydraulics Division*, 105(HY9), 1185-1201.
- [20] Requena, P. (2008): Seitenerosion in kiesführenden Flüssen, Prozessverständnis und quantitative Beschreibung. VAW Mitteilungen Nr. 210, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich, Zürich.
- [21] Rosgen, D.L. (1994): A classification of natural river. *Catena*, 22, 169-199.
- [22] Vischer, D.L. (2003): Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz
- [23] Yalin, M.S. (1992): *River Mechanics*. Pergamon Press, Oxford, 219 pp.
- [24] da Silva, A.M.A.F. (1991): *Alternate bars and related alluvial processes*, Queen's University, Kingston

Quellenverzeichnis

- [25] 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*, 49:6, 718-727. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.614518>.
- [26] 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
- [27] Zeller, J. (1962): Die «Regime-Theorie», eine Methode zur Bemessung stabiler Flussgerinne, *Schweizerische Bauzeitung*, Jahrgang 83, Heft 5, 1965

Anhang

Anhang A Empirische Ansätze

