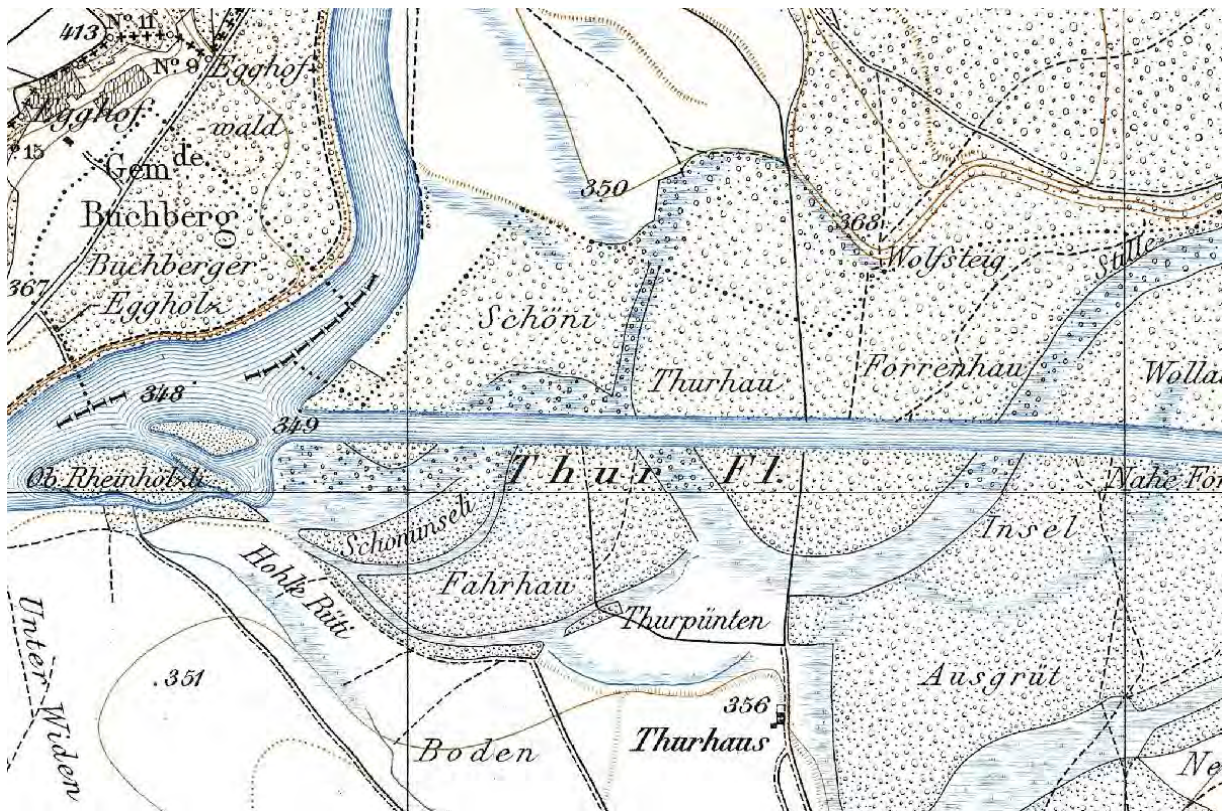


Handbuch zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite



Mündung der Thur in den Rhein – Siegfriedkarte von 1880

Impressum

Autoren

Firma	Personen	Mitwirkung
Bundesamt für Umwelt	Ulrich von Blücher Katharina Edmaier Antoine Magnollay Manuel Nitsche	Methodik und Koreferat Methodik und Koreferat Methodik und Koreferat Methodik und Koreferat
CSD INGENIEURS SA	Tamara Ghilardi	Fallbeispiel: Jogne Freiburg und Bern
Flussbau AG	Ueli Schälchli	Fallbeispiele: Aare Wildeg, Thur Wattwil
Hunziker, Zarn & Partner AG	Roni Hunziker Sammy Mirjan	Methodik Methodik Fallbeispiel: Sitter Thurgau

Dokument

Datum	Nr.	Status / Änderungen	Bezeichnung
April 2022	1.0	Entwurf	

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Wasser
Papiermühlestrasse 172
3063 Ittigen

Ulrich von Blücher
Tel.: +41 (0)58 464 76 36
ulrich.vonbluecher@bafu.admin.ch

Katharina Edmaier
Tel.: +41 (0)58 469 77 51
katharina.edmaier@bafu.admin.ch

Inhalt

- Ausgangslage* Die natürliche Sohlenbreite ist eine wichtige Ausgangsgrösse bei der Massnahmenplanung zur Aufwertung der Fliessgewässer sowie zur Beurteilung von Wasserbaumassnahmen. Da sich heute die Mehrheit der grösseren Gewässer in der Schweiz in einem naturfremden Zustand befindet, kann sie zumeist nicht aufgrund von naturnahen Vergleichsstrecken hergeleitet werden, sondern muss mit kartographischen sowie empirischen Ansätzen gutachterlich erarbeitet werden.
- Ziel der Studie* Der vorliegende Bericht stellt die gängigen Methoden zur Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite vor und zeigt ihre Vor- und Nachteile sowie Anwendungsgrenzen auf.
- Ablauf Verfahren* In einem ersten Schritt werden Abschnitte definiert, in welchen die massgebenden Parameter für die natürliche Sohlenbreite möglichst homogen sind. Anschliessend werden die verschiedenen Ansätze zur Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite angewendet und bezüglich ihrer Aussagekraft diskutiert. Daraus folgt die Gewichtung der Grundlagen und die Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage und Zweck des Handbuchs	1
2	Glossar	2
3	Natürliche Sohlenbreite und morphologische Einordnung	4
4	Übersicht Methodik	8
5	Abschnittseinteilung	10
6	Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite	12
6.1	Allgemeine Hinweise zur Auswertung	12
6.2	Historische Dokumente	14
6.2.1	<i>Einleitung</i>	<i>14</i>
6.2.2	<i>Historische Karten und Katasterpläne</i>	<i>14</i>
6.2.3	<i>Historische Luftbildaufnahmen</i>	<i>17</i>
6.2.4	<i>Historische Fotos und Gemälde</i>	<i>19</i>
6.2.5	<i>Berichte und Pläne früherer Wasserbauprojekte</i>	<i>22</i>
6.3	Naturnahe Vergleichsstrecken	24
6.4	Terrainanalyse	27
6.5	Empirische Ansätze	29
6.5.1	<i>Einleitung</i>	<i>29</i>
6.5.2	<i>Anwendung der empirischen Ansätze</i>	<i>32</i>
6.5.3	<i>Grundlagen</i>	<i>34</i>
7	Festlegung der natürlichen Sohlenbreite	36
7.1	Vorgehen	36
7.2	Die natürliche Sohlenbreite bei verändertem Abfluss oder Geschiebe	39
7.2.1	<i>Wann ist es sinnvoll die natürliche Sohlenbreite anzupassen</i>	<i>39</i>
7.2.2	<i>Anpassung der Sohlenbreite bei verändertem Abfluss</i>	<i>39</i>
7.2.3	<i>Anpassung der Sohlenbreite bei veränderter Geschiebelieferung</i>	<i>40</i>
7.3	Sohlbreite bei Fließgewässern mit ehemals sehr grossen natürlichen Sohlbreiten und Nutzungsdruck	41
8	Anwendungsbeispiele	43
8.1	Jogne (cantons de Fribourg et Berne)	44
8.1.1	<i>Etat actuel</i>	<i>44</i>
8.1.2	<i>Bases et méthodologie de la détermination de la largeur naturelle du lit</i>	<i>45</i>
8.1.3	<i>Pondération</i>	<i>46</i>
8.2	Beispiel Aare Wildegg - Brugg (Kanton Aargau)	55
8.2.1	<i>Ist-Zustand</i>	<i>56</i>

8.2.2	<i>Grundlagen und Ansätze zur Breitenermittlung</i>	56
8.2.3	<i>Gewichtung und natürliche Sohlenbreite</i>	59
8.2.4	<i>Veränderte Randbedingungen</i>	63
8.3	Beispiel Thur Wattwil (Kanton St. Gallen).....	65
8.3.1	<i>Ist-Zustand</i>	65
8.3.2	<i>Grundlagen und Ansätze zur Breitenermittlung</i>	66
8.3.3	<i>Gewichtung und natürliche Sohlenbreite</i>	68
8.4	Sitter (Kanton Thurgau).....	74
8.4.1	<i>Ist-Zustand</i>	74
8.4.2	<i>Grundlagen und Ansätze zur Breitenermittlung</i>	75
8.4.3	<i>Gewichtung</i>	76
9	Schlusswort	83
10	Quellenverzeichnis	84

1 Ausgangslage und Zweck des Handbuchs

Die natürliche Sohlenbreite ist eine wichtige Ausgangsgrösse, sowohl zur Dimensionierung des Raumbedarfs bei Wasserbauprojekten als auch zur Ermittlung des Gewässerraumes. In der Gewässerschutzgesetzgebung wird sie explizit als Basis zur Ermittlung des Gewässerraums an Fliessgewässern erwähnt (Art. 41a GSchV). Somit bildet die natürliche Sohlenbreite die Grundlage zur Herleitung der Mindestanforderungen zur Erfüllung der natürlichen Funktionen von Fliessgewässern, aber auch zur Ermittlung von Subventionsansprüchen bei Wasserbauprojekten.

Generell soll bei grossen Fliessgewässern nach Art. 43a GSchG die natürliche Sohlenbreite als Berechnungsgrundlage für die Bestimmung des Gewässerraums herangezogen werden.

Da sich heute viele grosse Fliessgewässer in der Schweiz in einem naturfremden Zustand befinden, kann die natürliche Sohlenbreite meist nicht aufgrund von Vergleichsstrecken im natürlichen Zustand abgeleitet werden, sondern muss gutachterlich hergeleitet werden.

Das vorliegende Handbuch macht einen Vorschlag, mit welchen Methoden die natürliche Sohlenbreite ermittelt werden kann. Die Methoden werden mit Beispielen vorgestellt und hinsichtlich ihrer Aussagekraft diskutiert. Die beschriebenen Ansätze sind primär für die Breitenermittlung von Fliessgewässern mit einer natürlichen Sohlenbreite grösser als 15 m. Bei guten Grundlagen können die Ansätze auch für kleinere Fliessgewässer angewendet werden.

2 Glossar

<i>Referenzzustand</i>	<p>Der Referenzzustand ist der naturnahe Zustand bezüglich Morphologie und 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.</p>
<i>Restriktionen</i>	<p>Unter Restriktionen werden Anlagen und Nutzungen oder Beeinträchtigungen verstanden, welche in einem überschaubaren Zeitraum mit einem verhältnismässigen Aufwand nicht verändert werden können und welche die ökomorphologische Entwicklungsmöglichkeit des Gewässers einschränken. Dabei unterscheidet man zwischen harten Restriktionen, die eindeutig nicht oder nur mit unverhältnismässigem Aufwand verschiebbar sind und weichen Restriktionen, die in einem überschaubaren Zeitraum einen Spielraum (für eine Interessenabwägung) zulassen.</p>
<i>Bettbildender Abfluss</i>	<p>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 auf den folgenden Überlegungen:</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Der bettbildende Abfluss muss gross genug sein, um morphologisch relevante Veränderungen auszulösen. Dies ist bei kleineren bis mittleren, im Gerinne abfliessenden Hochwassern der Fall.▪ Der bettbildende Abfluss muss eine Häufigkeit aufweisen, bei welcher die morphologisch aktiven Flächen nicht zuwachsen (Gehölz) und somit nicht fixiert werden können. <p>Der bettbildende Abfluss darf nicht zu klein, aber auch nicht zu gross oder zu selten sein. Er wird aufgrund von Erfahrungen häufig zwischen einem HQ₂ und einem HQ₅ gewählt.</p>
<i>Gerinne und Gerinnebreite</i>	<p>Das Gerinne setzt sich aus Sohle und Uferböschungen zusammen. In einem natürlichen Gerinne fliesst der bettbildende Abfluss (HQ₂ bis HQ₅) ohne Ausuferungen ab. Die Gerinnebreite entspricht deshalb in der Regel der Wasserspiegelbreite beim bettbildenden Abfluss.</p>

Glossar

<i>Uferböschungen</i>	Uferböschungen liegen innerhalb des Gerinnes. Sie bilden den Übergangsbereich zwischen der Sohle und dem terrestrischen Terrain. Im natürlichen Zustand können sowohl Steil- (fast senkrechte Böschungen) als auch Flachufer (Böschungneigung flacher als 1:3) beobachtet werden.
<i>Sohle und Sohlenbreite</i>	Die Sohle ist der Anteil an der Gerinnebreite, der von mehrjähriger terrestrischer Vegetation frei ist (gehölzfrei), abzüglich der Böschungsbreite.
<i>Natürliche Sohlenbreite</i>	Breite im Referenzzustand
<i>Primäre Seitenerosion</i>	Eigendynamische Gerinneaufweitung eines eingegengten Gerinnes bei welchem die Ufersicherungen entfernt wurden. Direkt nach Entfernung der Ufersicherungen sind noch keine ausgeprägten Sohlenstrukturen und dadurch auch keine gerinneformenden Querströmungen vorhanden.
<i>Sekundäre Seitenerosion</i>	Seitenerosionsprozesse infolge Querströmungen, nach der primären Seitenerosion.
<i>Gleichgewichtsbreite</i>	Breite nach der primären Seitenerosion.
<i>Grenzbreite</i>	Breite nach der sekundären Seitenerosion.

3 Natürliche Sohlenbreite und morphologische Einordnung

Definition natürliche Sohlenbreite

Die natürliche Sohlenbreite entspricht der natürlichen mittleren Breite der Gewässersohle innerhalb eines ausgewählten Gewässerabschnittes. Die Sohle ist der Anteil an der Gerinnebreite, der von mehrjähriger terrestrischer Vegetation frei ist (gehölzfrei), abzüglich der Böschungsbreite. Verbaute und eingetiefte Gewässer weisen in der Regel schmalere Sohlenbreiten und eine geringe, eingeschränkte oder fehlende Wasserspiegelbreitenvariabilität auf.

Einordnung 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 [19] entwickelte ein Gedankenmodell, welches die Prozesse bei der eigendynamischen Verbreiterung eines kiesführenden Fließgewässers bis hin zur natürlichen Sohlenbreite beschreibt (Abb. 1). Es wird zwischen einer primären und einer sekundären Seitenerosion unterschieden. Die gesuchte natürliche Sohlenbreite wird, je nach den örtlichen morphologischen Verhältnissen, zwischen diesen beiden Breiten definiert.

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.

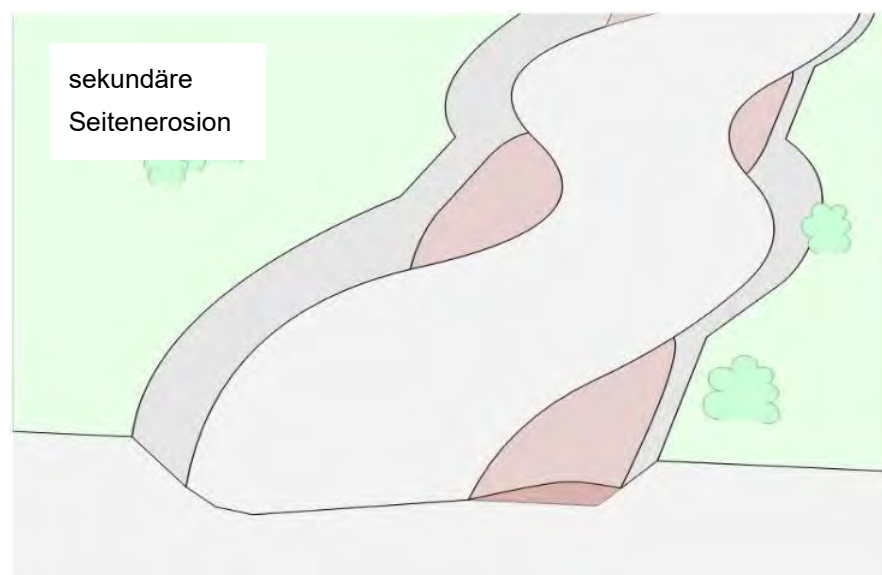
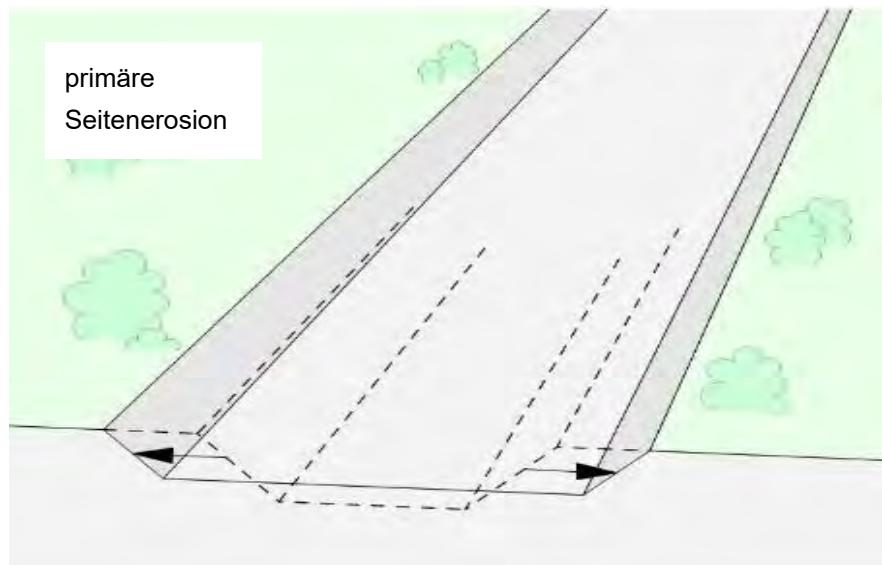
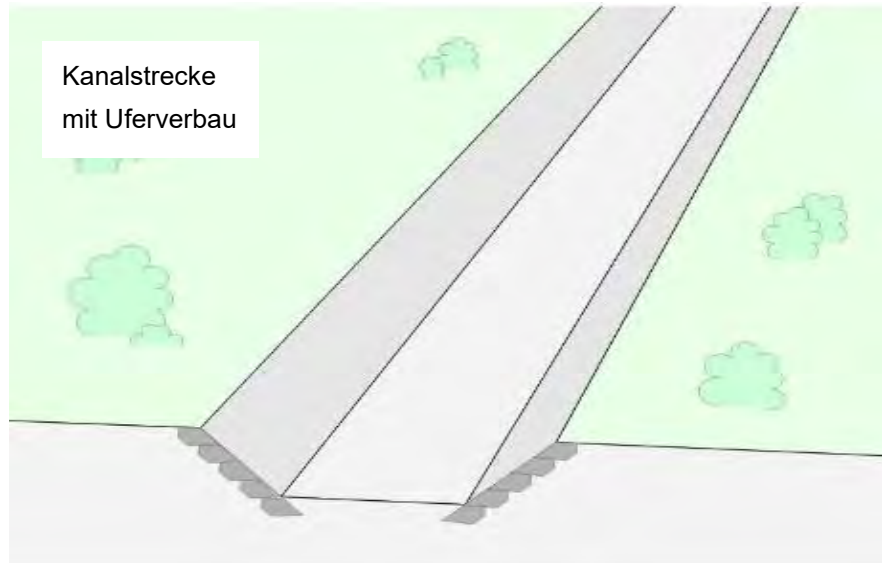


Abb. 1 Konzept der primären und sekundären Seitenerosion

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. Der Geschiebetransport befindet sich oft nicht in einem Gleichgewichtszustand¹. Falls die Geschiebezufuhr grösser ist als die Transportkapazität (Auflandungszustand), ist mit einer Ausprägung der Sohlenstrukturen und einer grösseren Breite zu rechnen, falls die Geschiebezufuhr geringer ist als die Transportkapazität (Erosionszustand), mit einer geringeren Sohlenbreite.

Je nach Sohlenbreite, Abfluss, Gefälle und Sohlenmaterial können sich verschiedene Morphologien ausbilden. Welche Struktur sich im konkreten Fall einstellt, kann aufgrund der Diagramms von da Silva [23] oder Zarn [25] ermittelt werden.

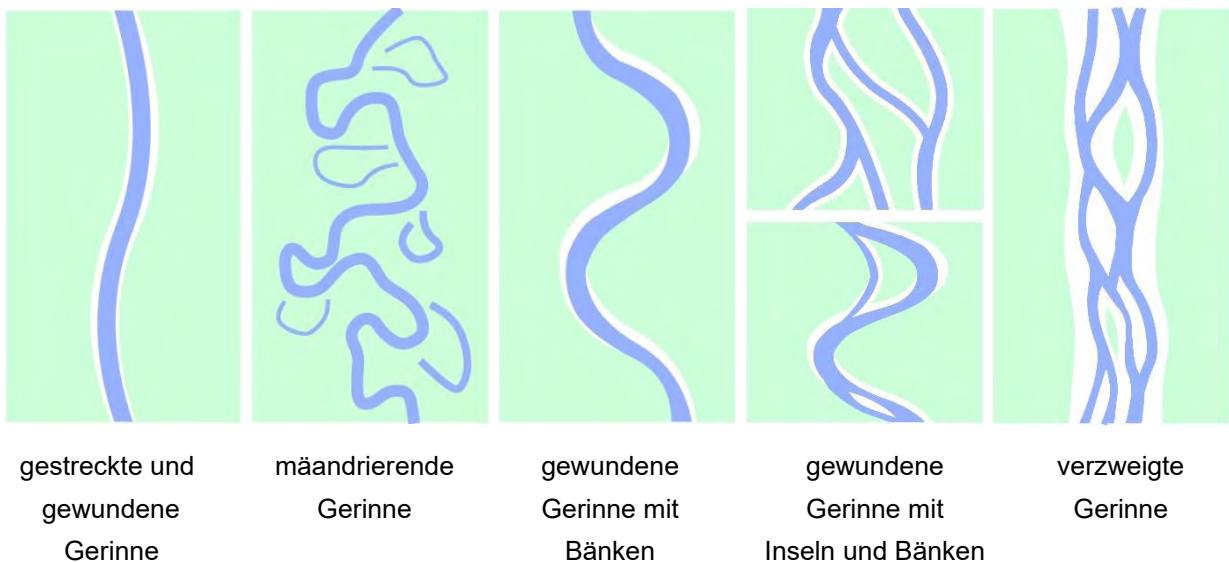


Abb. 2 Einteilung der natürlichen Gerinneformen. Alternierende Bänke werden nicht als eigene Gerinneform, sondern als Sohlenstruktur bei einem gradlinigen oder schwach mäandrierenden Gerinne betrachtet.

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 einarmiges Gerinne sich nach einem Hochwasser zeitweise verzweigen.

¹ Im Gleichgewichtszustand entspricht die Geschiebezufuhr der Transportkapazität (Sättigungsgrad 1.0)

Natürliche Sohlenbreite und morphologische Einordnung

Unterschied zwischen Gerinne- und Sohlenbreite

Je nach Morphologie (Abb. 2, Mäander, verzweigtes Gerinne, usw.) besitzt die Sohle und der Uferbereich ganz unterschiedliche Ausprägungen. Die Übergänge zwischen Sohle, Uferböschungen, Weich- und Hartholzauen sind meist fließend.

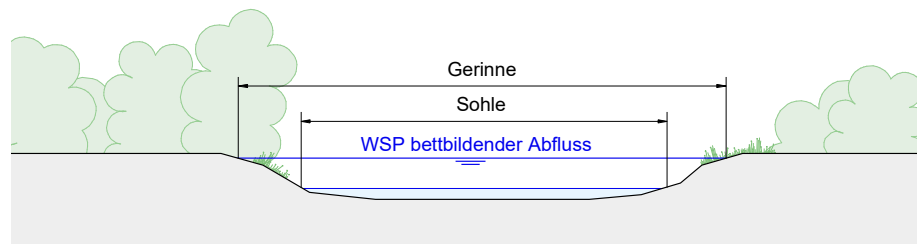
Zur Definition der Sohlenbreite werden folgende Kriterien vorgeschlagen:

- Die Sohle liegt zwischen den Uferböschungsfüssen
- Sohlenfläche = benetzte Fläche + vegetationsfreie Fläche

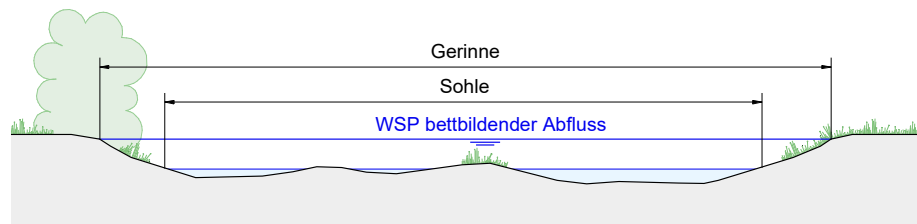
Die Sohle ist in der Regel frei von terrestrischer Vegetation, sie kann jedoch bei länger ausbleibenden Hochwassern auch kleinere Pioniervegetation wie Gräser und Stauden aufweisen.

- Beim bettbildenden Abfluss (HQ₂ bis HQ₅) wird die gesamte Sohle morphologisch mobilisiert
- Die Wasserspiegelbreite beim bettbildenden Abfluss entspricht der Gerinnebreite und ist grösser als die Sohlenbreite (siehe Abb. 3).

Einarmiges Gerinne:



Einarmiges Gerinne, verzweigte Struktur:



Mehrmarmiges Gerinne:

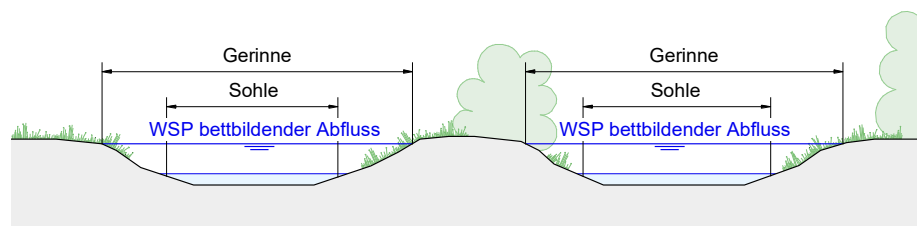


Abb. 3 Schematische Darstellung der Sohlen- und Gerinnebreite sowie des bordvollen, bettbildenden Abflusses bei verschiedenen morphologischen Gerinnetypen. Der Übergang zwischen einarmig und mehrarmig ist fließend und muss gutachterlich beurteilt werden.

4 Übersicht Methodik

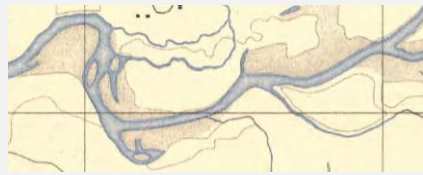
In der vorliegenden Anleitung werden verschiedene Ansätze zur Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite vorgeschlagen und hinsichtlich ihrer Bandbreite und Unschärfe beurteilt. Bei allen vorgestellten Methoden muss davon ausgegangen werden, dass keine exakte Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite möglich ist, sondern dass es sich um eine gutachterliche Abschätzung auf Basis unterschiedlicher Annahmen handelt. Die Breiten hängen stark von den Eingangsgrößen ab und je nach Standort eignet sich eine Methode besser oder weniger. Das Dokument soll helfen, auf Basis der vorgestellten Methoden eine plausible natürliche Sohlenbreite herzuleiten.

Methoden

Die unterschiedlichen Ansätze können in die folgenden vier Methoden eingeteilt werden:

1. Historische Dokumente

Analyse historischer Karten, Luftaufnahmen, Gemälde, Fotos und Berichte



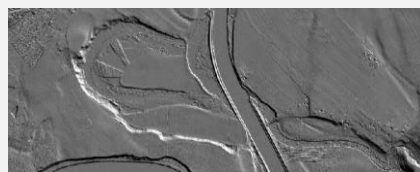
2. Naturnahe Vergleichsstrecken

Analyse von aktuellen Karten und Luftbildern, Begehung im Feld



3. Terrainanalysen

Analyse von historischen Flussläufen mit Hilfe von Terrainmodellen



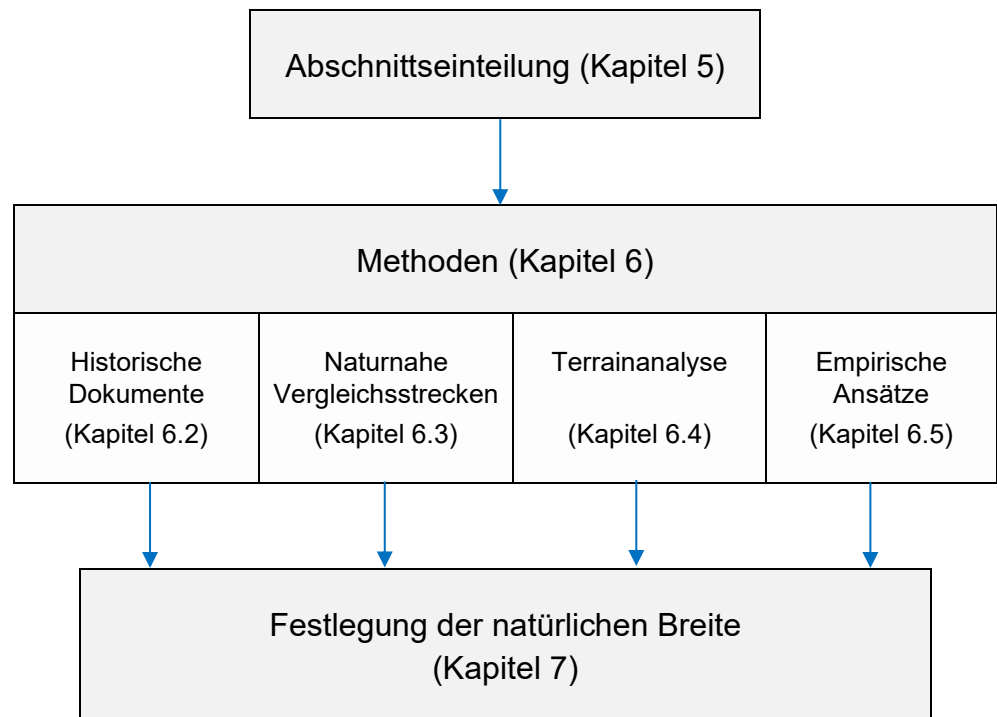
4. Empirische Ansätze

Anwendung der Regime- und der Schleppkrafttheorie

Übersicht Methodik

Ablauf

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

*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. Generell sollen aber möglichst alle zur Verfügung stehenden Grundlagen ausgewertet und möglichst alle Methoden angewendet werden. Qualitativ schlechte Grundlagen werden bei der Festlegung aussortiert oder entsprechend weniger gewichtet. So bleibt aber nachvollziehbar welche Grundlagen bei der Beurteilung zur Verfügung standen, auch wenn sie schliesslich nicht zur Breitenbestimmung verwendet werden konnten.

Anforderung an die AnwenderInnen

Die im vorliegenden Dokument beschriebene Methodik zur Herleitung der natürlichen Sohlenbreite setzt zur Anwendung gewisse Grundkenntnisse im Flussbau voraus, da immer 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 Sensitivität der Grundlagendaten.

5 Abschnittseinteilung

Die natürliche Sohlenbreite wird durch zahlreiche Parameter beeinflusst. Daher sollte die Sohlenbreite in möglichst homogenen Abschnitten bestimmt werden. In homogenen Abschnitten sind die Gerinnegeometrie und die morphologischen Parameter ähnlich.

Kriterien

Eine Abschnittsunterteilung ist sinnvoll, wenn:

- sich das Gefälle² signifikant verändert
- sich der bettbildende Abfluss (HQ₂ bis HQ₅) verändert
- sich der Korndurchmesser verändert (bei Zuflüssen)
- sich der Geschiebesättigungsgrad ändert
(wenn grössere Zuflüsse einmünden, das Gefälle sich ändert oder das Geschiebekontinuum natürlicherweise unterbrochen wird, z.B. durch Seen)
- eine topographische Einengung oder Aufweitung auftritt
(Breite der Talebene, Schwemmkegel von Zuflüssen)
- natürliche Abstürze oder anstehender Fels vorkommen.

Bei längeren Untersuchungsabschnitten ist es hilfreich, alle verfügbaren Parameter in einem Längenprofil darzustellen (vgl. Abb. 4).

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 möglicherweise 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 mit den topographischen, hydrologischen und geschiebetechnischen Gegebenheiten abgestimmt werden.

² Für die Herleitung der natürlichen Sohlenbreite ist das natürliche Gefälle massgebend. Dieses Gefälle wird nicht durch Wehranlagen oder anthropogen bedingte Schwellen 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.

Abschnittseilteilung

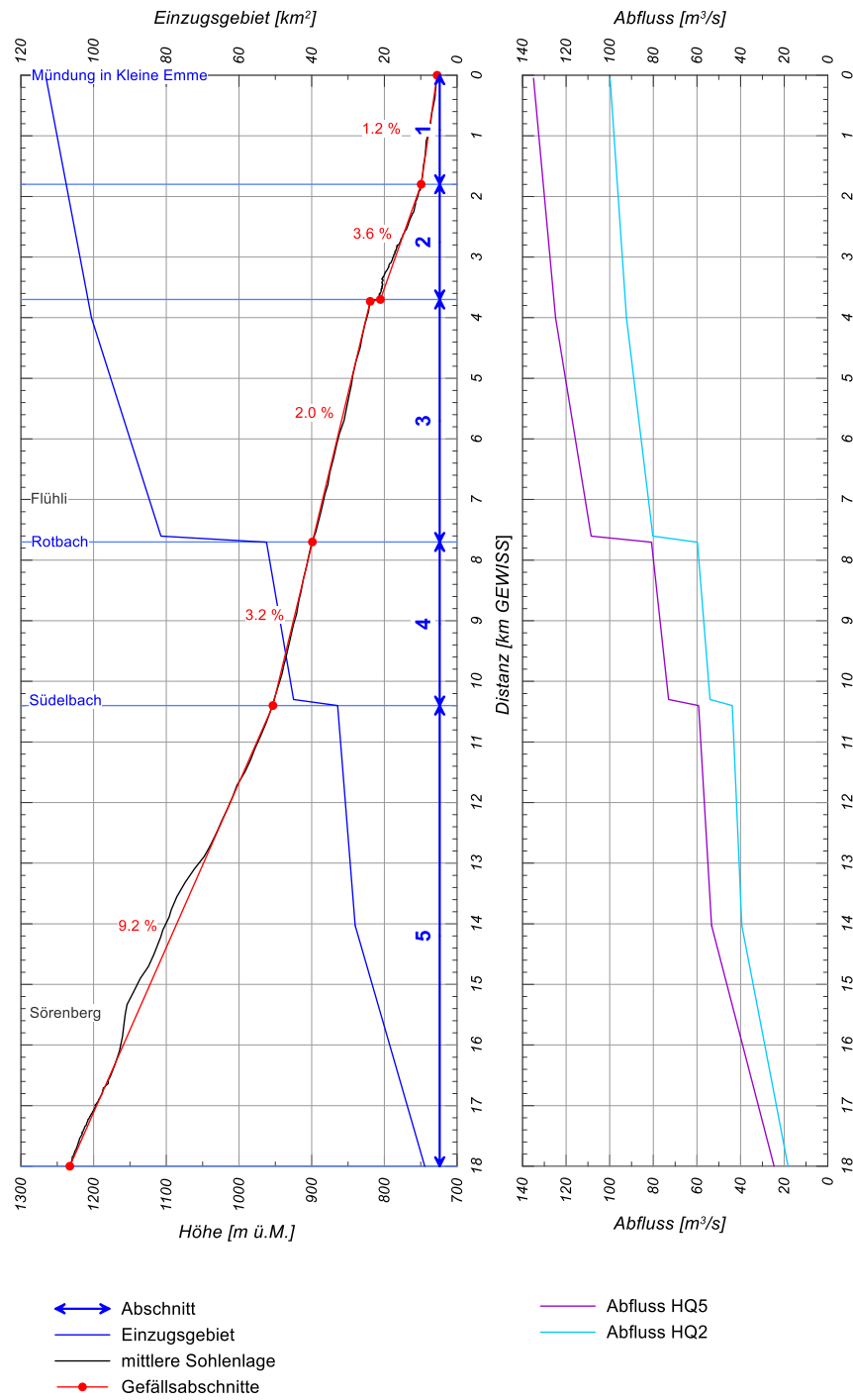


Abb. 4 Beispiel zur Abschnittsbildung, Waldemme, km GEWISS 0- 18

Die Abschnittsübergänge sind wie folgt begründet:

von 1 zu 2: Änderung Gefälle

von 2 zu 3: Absturz und Änderung Gefälle

von 3 zu 4: Zufluss (Änderung Hydrologie) und Änderung Gefälle

von 4 zu 5: Zufluss (Änderung Hydrologie) und Änderung Gefälle

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 Empfehlungen abgegeben, wie damit umgegangen werden kann.

6.1 Allgemeine Hinweise zur Auswertung

Die nachfolgenden Hinweise gelten allgemein bei der Anwendung der in den Kapiteln 6.2 bis 6.5 beschriebenen Methoden. Weitere methodenspezifische Hinweise sind unter den jeweiligen Methoden aufgeführt.

*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*

Der Geschiebehaushalt hat einen wesentlichen Einfluss auf die natürliche Sohlenbreite. Falls sich der Fluss in einem Auflandungszustand befand, ist mit wesentlich grösseren Sohlenbreiten zu rechnen als in einem Gleichgewichts- oder Erosionszustand. Hinweise auf einen Auflandungszustand geben die Morphologie, das Längenprofil des Flusses oder geologische Untersuchungen³. Ausgeprägte Sohlenstrukturen oder fluviale Ablagerungen weisen auf einen Auflandungszustand hin.

*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 solche Effekte zu erkennen, muss nach solchen Ereignissen recherchiert werden. Mögliche Quellen dafür sind hydrologische Jahrbücher, Ereignischroniken von Gefahrenkarten oder

³ Aus Sondierbohrungen oder Bodenprofilen im anstehenden Material kann auf die Kornverteilung in den Gesteinsschichten geschlossen werden, wodurch Aussagen zu früheren Auflandungs- oder Erosionszustände gemacht werden können.

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

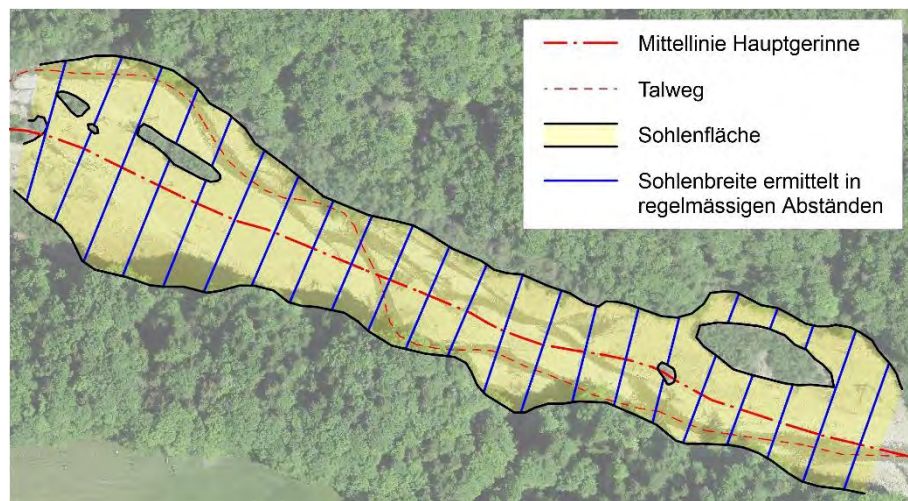
Aufzeichnungen des jeweiligen kantonalen Amts für Landwirtschaft oder jenes für Jagd und Fischerei.

Einfluss der Jahreszeiten

Die Jahreszeit, bzw. die Vegetationsphase, in welcher eine Grundlage erhoben wurde, kann einen grossen Einfluss auf die Flächendarstellung in den Karten, Fotos oder Gemälden haben. So wirken bewachsene Kiesbänke im Winter deutlich weniger dicht als im Sommer. Insbesondere bei der Auswertung von historischen Dokumenten muss dies berücksichtigt werden. 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 Gewässerabschnitts entspricht der Länge der Mittellinie des Hauptgerinnes (siehe Abb. 5).

**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. 5 Ermittlung der mittleren Sohlenbreite am Beispiel der Ärgera bei Giffers (FR)

6.2 Historische 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 Jahreszeit beim Aufnahmezeitpunkt bekannt ist, 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 muss.

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.

Jede historische Karte kann Informationen zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite liefern. Es ist deshalb wichtig alle Quellen, die zur Verfügung stehen, zu prüfen.

Vorgehen

Bei allen historischen Karten muss die Breite der Sohle gutachterlich abgegrenzt werden. Dabei geht es vor allem darum, die eingewachsenen Flächen von den freien Kiesflächen, welche in der Regel der Sohle angerechnet werden, zu unterscheiden (siehe auch Unterscheidung zwischen Gerinne und Sohle in Kapitel 3).

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

Häufig ist es schwierig bei historischen Karten scharf abzugrenzen, welche Flächen Bestandteil der Sohle sind und welche nicht. Analog Glossar: Die Sohle ist der Anteil an der Gerinnebreite, der von mehrjähriger terrestrischer Vegetation frei ist (gehölzfrei) abzüglich der Böschungsbreite.

Sie weist, wenn überhaupt, in der Regel eine junge Pioniervegetation auf. Dies ist in den Karten in der Regel nicht klar zu erkennen. Können die Flächen nicht klar der Sohle zugeordnet werden, können eine minimal und eine maximal mögliche Breite definiert werden (siehe Beispiel in Abb. 6). Dies gibt eine Bandbreite für die natürliche Sohlenbreite vor, die dann mithilfe anderer Methoden (z.B. empirische Ansätze) weiter eingegrenzt werden kann. Bei der Auswertung müssen die allgemeinen Hinweise in Kapitel 6.1 beachtet werden.

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)
- die Vermessung zeitlich (Jahr und Jahreszeit) zugeordnet werden kann
- Informationen zu allfälligen Hochwassern oder Trockenperioden vorliegen

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

Beispiele
historischer Karten

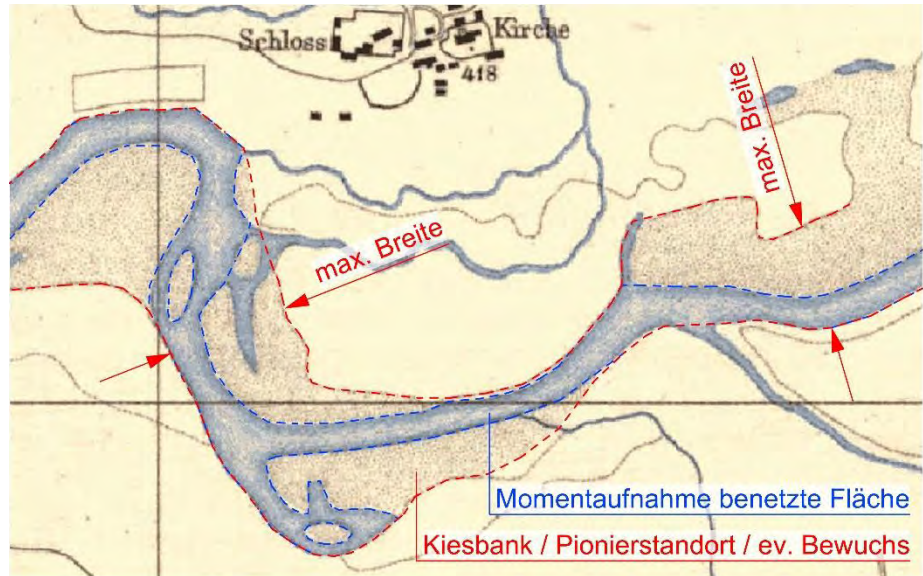


Abb. 6 Ausmass der natürlichen Sohlenbreite an der Thur bei Pfyndorf (Wildkarte von 1850). In der Karte ist nicht ersichtlich, in welchem Ausmass die Kiesbänke bewachsen und somit nicht Teil der Sohle waren. Es kann deshalb eine maximale Breite (Wasserfläche und Kiesbänke) ermittelt werden. Ob die gesuchte natürliche Sohlenbreite der Breite in der historischen Karte entspricht muss mittels weiterer Quellen oder Methoden (z.B. empirische Ansätze) verifiziert werden.

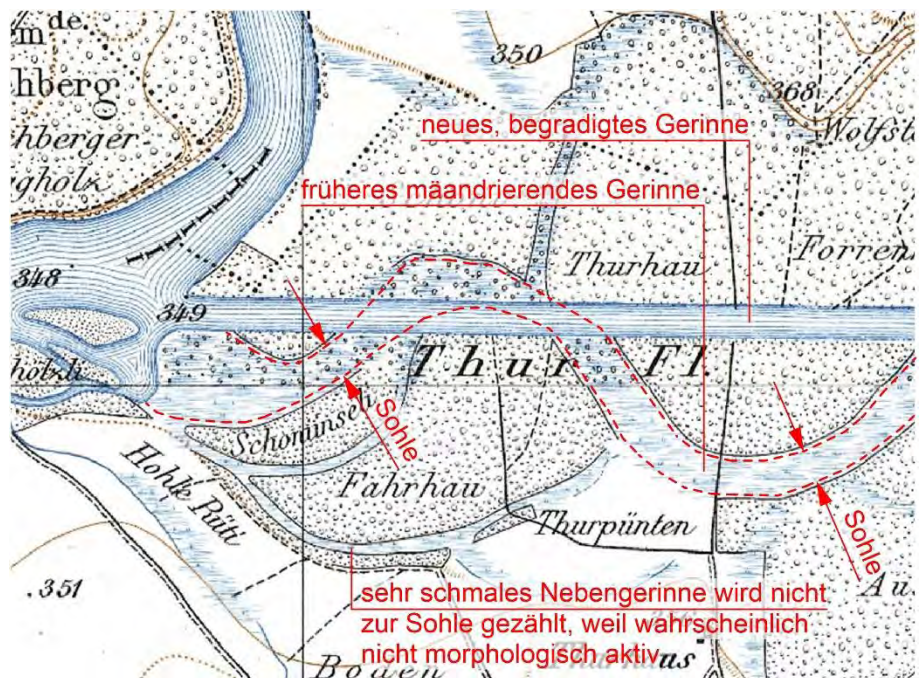


Abb. 7 Ausmass der natürlichen Sohlenbreite an der Thur bei der Mündung in den Rhein (Siegfriedkarte von 1880). Bei der Festlegung der Sohlenbreite ist darauf zu achten, dass nur morphologisch aktive Gerinne berücksichtigt werden.

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 natürliche Sohlenbreite aus historischen Luftbildaufnahmen ermittelt werden kann und was dabei beachtet werden muss.

Grundlagen

Eine sehr grosse Sammlung von historischen Luftbildaufnahmen wird von der Swisstopo⁴ 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 eingewachsenen Flächen von den freien Kiesflächen, welche in der Regel der Sohle angerechnet werden, zu unterscheiden (siehe Beispiele in Abb. 8 und Abb. 9). Häufig werden Luftbilder nach Extremereignissen aufgenommen. Dies muss bei der Interpretation der Daten beachtet werden. Bei der Auswertung müssen 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 (Jahr und Jahreszeit) zugeordnet werden kann
- Informationen zu allfälligen Hochwassern oder Trockenperioden vorliegen

⁴ Luftbilder von Swisstopo können online auf map.geo.admin.ch bezogen werden

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

Hinweise zur Auswertung

Da sich die das Erscheinungsbild der Vegetation mit den Jahreszeiten massiv verändert, spielt bei der Interpretation der Luftbilder der Aufnahmezeitpunkt eine wichtige Rolle. Um Verbuschungen und Grasnarben einfach zu erkennen, werden Luftbilder, welche im Sommer aufgenommen wurden, bevorzugt. Bei sehr 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).

Beispiele historischer Luftbildaufnahmen

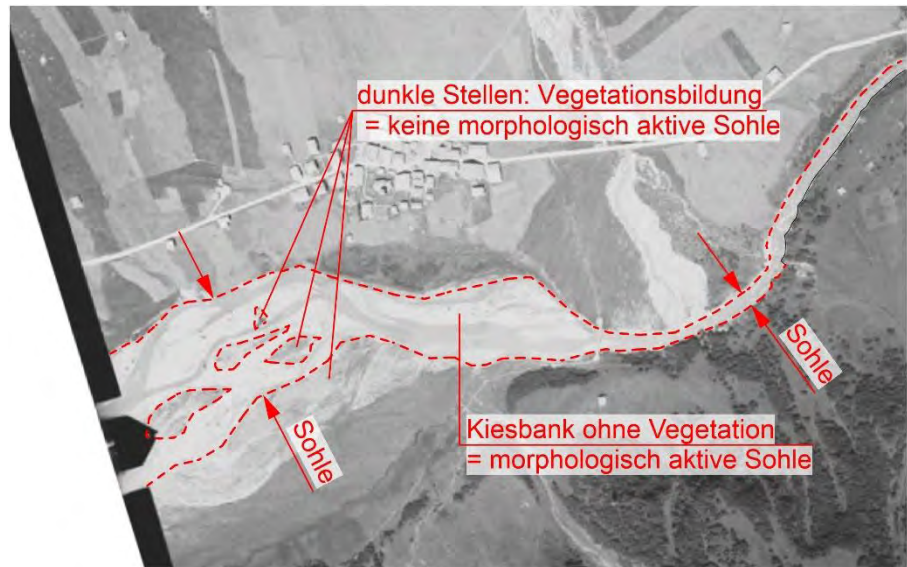


Abb. 8 Hinterrhein bei Ortschaft Hinterrhein, Luftbild 24.07.1942 (map.geo.admin.ch)

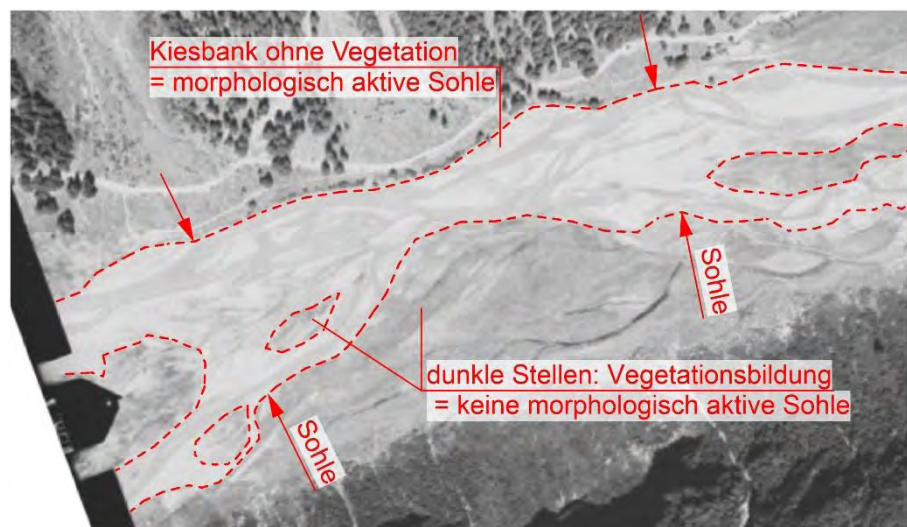


Abb. 9 Hinterrhein beim Panzerschiessplatz, Luftbild 24.07.1942 (map.geo.admin.ch). Dass es sich auf dem Beispielbild bei den dunklen Stellen um Vegetation handelt, ist eine gutachterliche Einschätzung, die nicht generell gilt.

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 besonders 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 aus 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. 10 und Abb. 11), 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 und zu allfälligen 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
- die Aufnahme zeitlich (Jahr und Jahreszeit) zugeordnet werden kann
- Informationen zu allfälligen Hochwassern oder Trockenperioden vorliegen

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

Beispiele
historischer Fotos
und Gemälde

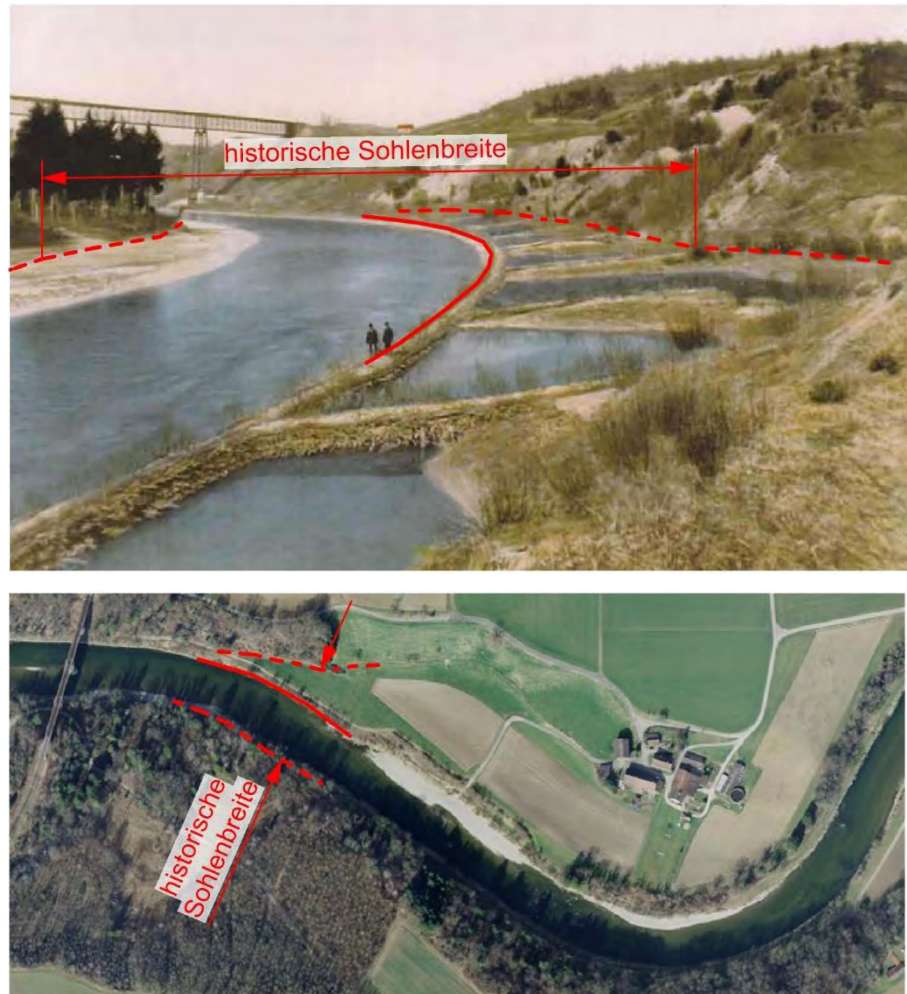


Abb. 10 Ausmass der natürlichen Sohlenbreite an der Thur oberhalb Kleinandelfingen (Foto von 1882), natürlicher Zustand = Bild oben, heutiger Zustand = Bild unten

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

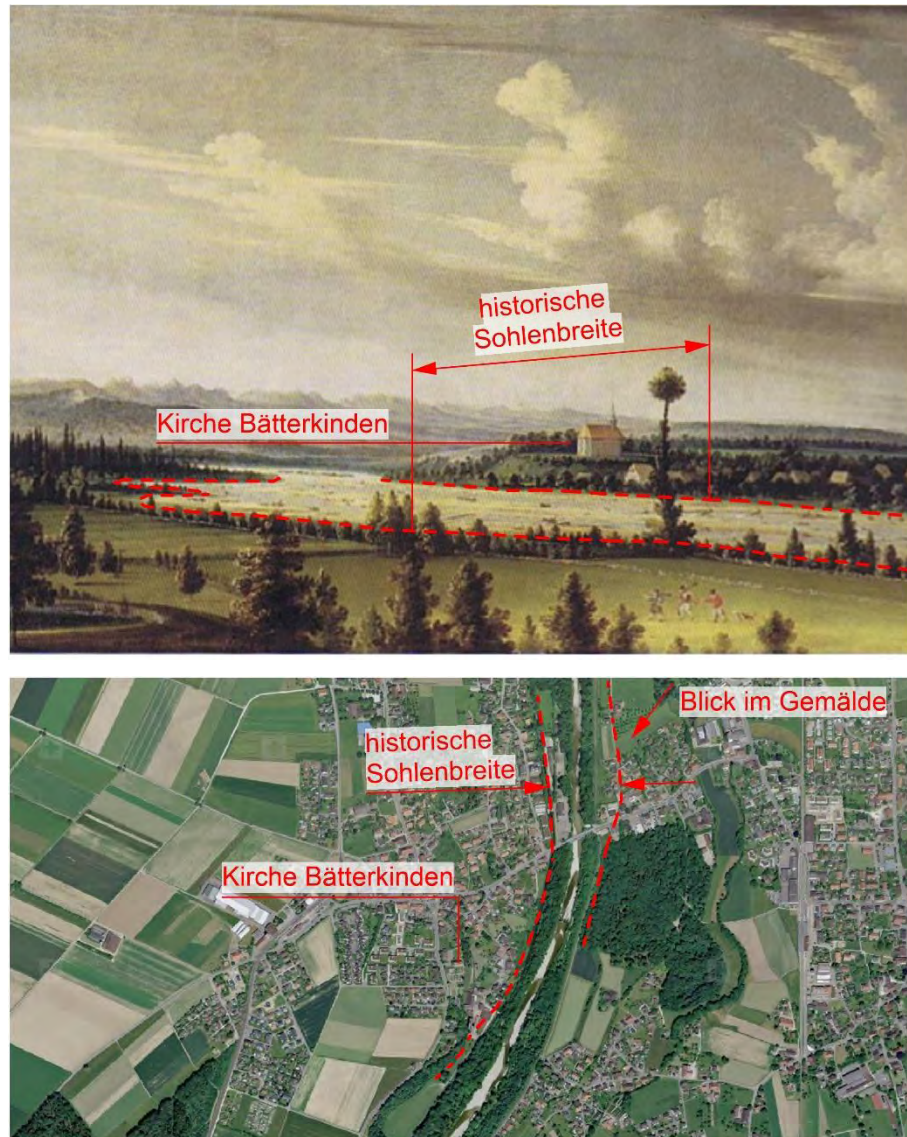


Abb. 11 Ausmass der natürliche Sohlenbreite der Emme bei Utzenstorf.
Bild oben: Emme vor der Korrektur. Blick vom Schloss Landshut
flussaufwärts (Quelle [21])

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 in der Regel der Sohle angerechnet werden, zu unterscheiden (siehe auch Unterscheidung zwischen Gerinne und Sohle in Abb. 3).

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. Können die Flächen nicht klar der Sohle zugeordnet werden, können eine minimal und eine maximal mögliche Breite definiert werden. Dies gibt eine Bandbreite für die natürliche Sohlenbreite vor die dann mithilfe anderer Methoden, z.B. empirische Ansätze, weiter eingegrenzt werden kann.

Eine grosse Hilfe können, wenn vorhanden, auch historische Querprofil-aufnahmen 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 (Jahr und Jahreszeit) zugeordnet werden können
- Informationen zu allfälligen Hochwassern oder Trockenperioden vorliegen

Beispiele früherer Wasserbauprojekte

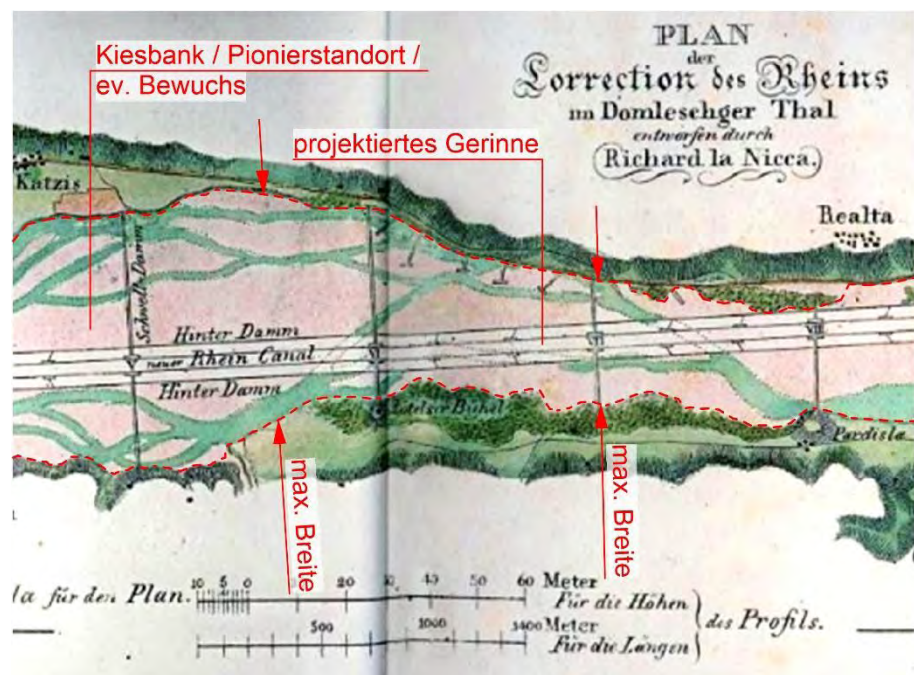


Abb. 12 Hinterrhein Domleschg, Plan von R. la Nicca ca. 1850

Das jetzige Emmenbett ist sehr unregelmässig, nicht nur weil es in seiner Richtung viele Krümmungen zeigt, sondern namentlich weil seine Breite 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. 13 Ausschnitt aus dem technischen Bericht der Emmenkorrektion von Kirchberg bis zur Kantonsgrenze Solothurn (1873)

6.3 Naturnahe 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 Geschiebehaushalt gerechnet werden, was die Vergleichbarkeit mit dem Untersuchungsabschnitt erschwert.

Grundlagen

Folgende Grundlagen müssen vorhanden sein:

- 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 eine Verbuschung aus, so zeigt dies, dass die morphologisch aktive 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 und Karten. Luftbildaufnahmen sind generell gegenüber Karten zu bevorzugen, da hier die Vegetation besser sichtbar ist (siehe Beispiel Abb. 14). Unter der Baumgrenze entspricht die Sohle ca. der vegetationsfreien Fläche. Bei schwierig zu interpretierenden Luftbildern (z.B. keine Vegetation oberhalb der Baumgrenze, Schattenwurf oder ins Gerinne ragende Bäume) sollte zusätzlich ein Terrainmodell zur Beurteilung der Gerinne und Sohlenstruktur beigezogen werden (siehe auch Unterscheidung zwischen Gerinne und Sohle in Abb. 3 sowie Methode 6.4 Terrainanalyse).

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

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

Beurteilung der Grundlage

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

- die Hydrologie, die Terrainbeschaffenheit, und der Geschiebehaushalt 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 stehenden 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 massiv verändert, spielt bei der Interpretation der Luftbilder der Aufnahmezeitpunkt eine wichtige Rolle. Um Verbuschungen und Grasnarben einfach zu erkennen, werden Luftbilder, welche im Sommer aufgenommen wurden, bevorzugt. Bei sehr 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.

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

Beispiel einer
naturnahen
Vergleichsstrecke

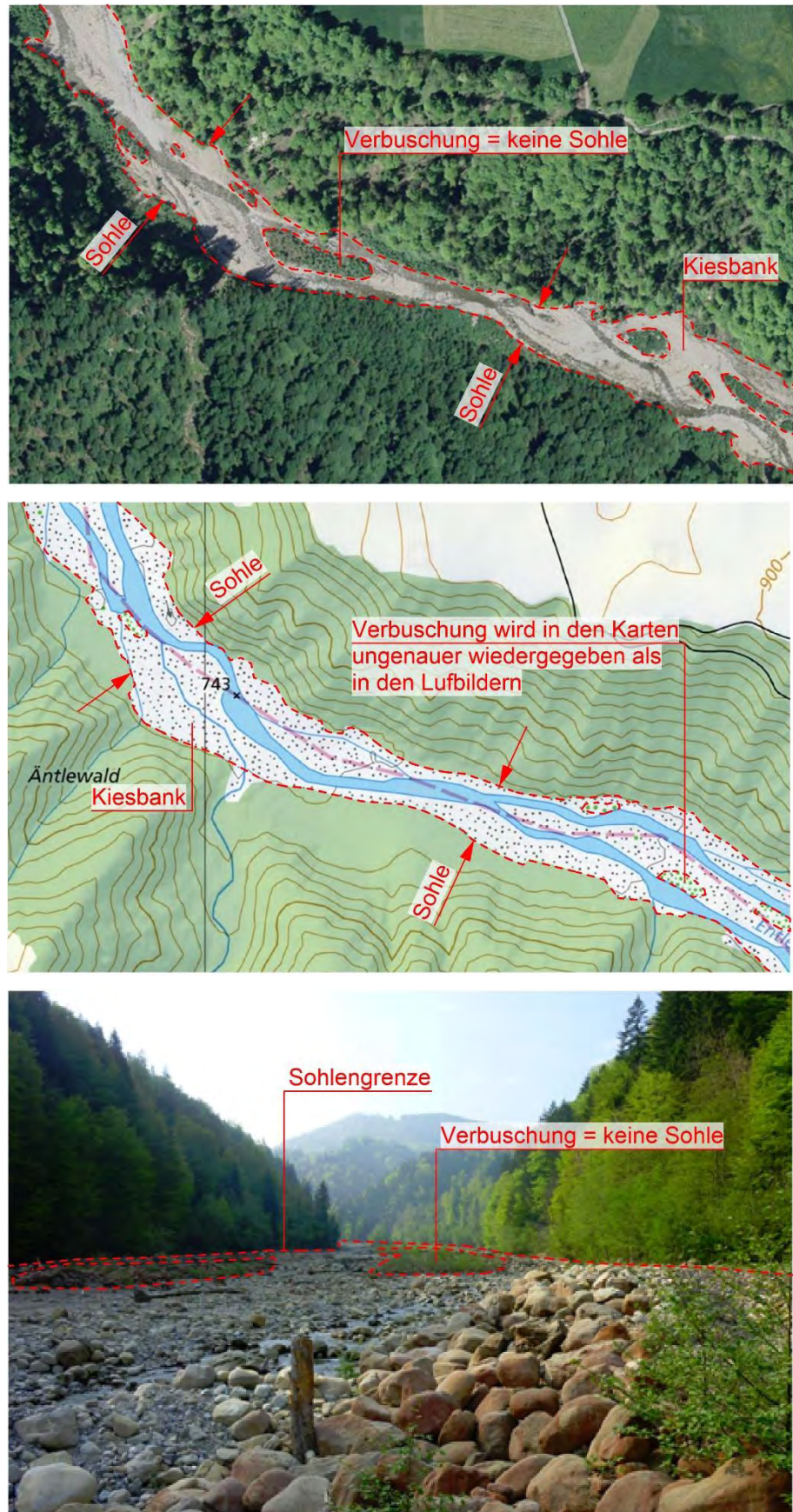


Abb. 14 Die Entle oberhalb Entlebuch

6.4 Terrainanalyse

Bei der Terrainanalyse werden alte Flussläufe oder naturnahe Vergleichsstrecken (siehe Kapitel 6.3, Naturnahe 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 hervorragende 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. 15). 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 morphologisch 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 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 einarmiges Gerinne 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

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

Beispiel
Terrainanalyse



Abb. 15 Die Reuss bei Fischbach-Göslikon (AG)

6.5 Empirische Ansätze

6.5.1 Einleitung

Die Bestimmung der morphologischen Charakteristiken von natürlichen Fließgewässern ist eine wichtige Fragestellung in der Morphologie. Es gibt zahlreiche Untersuchungen zu diesem Thema und verschiedene 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 [25], Yalin [22]) 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 [13] sind typische Vertreter der Schleppkrafttheorie. Zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite steht ein Ansatz von Ikeda [12] 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

*Konzept zur
Einordnung der
empirischen Ansätze*

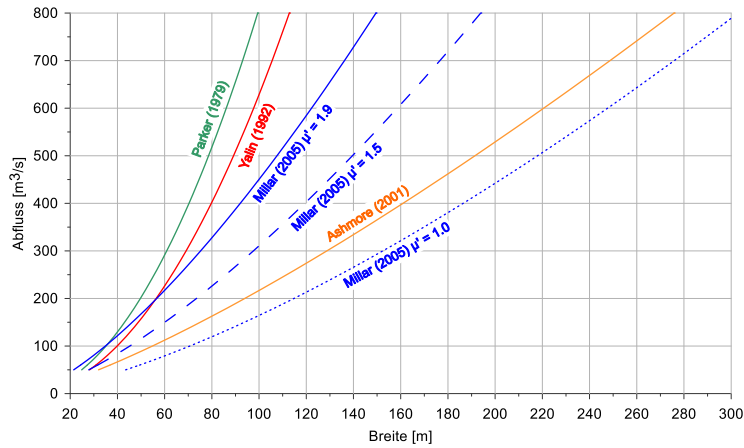
Die Untersuchungen verschiedener Autoren (Yalin [22], Parker [18], Ashmore [6], Millar [15], weitere Autoren im Anhang A) zeigen, dass die natürliche Breite eines Flusses vom Abfluss, dem Gefälle und dem Korndurchmesser des Sohlenmaterials abhängt. Die Auswertung zahlreicher Naturdaten ergibt aber immer eine grosse Streuung. Millar zeigte, dass die grosse Streuung eine Folge der unterschiedlichen Einzugsgebietscharakteristiken, insbesondere auch der Uferbeschaffenheit, ist. Der Fluss versucht immer eine maximale Effizienz⁵ bezüglich Geschiebetransport und einen Gleichgewichtszustand zu erreichen.

Das von Millar beschriebene Konzept der optimalen Transporteffizienz kann auch ins Konzept von Requena [19] mit der Gleichgewichtsbreite und der Grenzbreite integriert werden. Die Gleichgewichtsbreite stellt dabei die untere Grenze der Bandbreite möglicher natürlicher Sohlenbreiten dar, die Grenzbreite die obere. Für beide Grenzen bestehen Ansätze (Abb. 16): Yalin [22] und Parker [18] geben eher einen Wert für die untere Bandbreite, Ashmore [6] eher einen oberen Wert an. Millar [15] erfasst zudem den Effekt der Böschungstabilität. Seine Beziehung liefert Werte zwischen der Gleichgewichts- und der Grenzbreite.

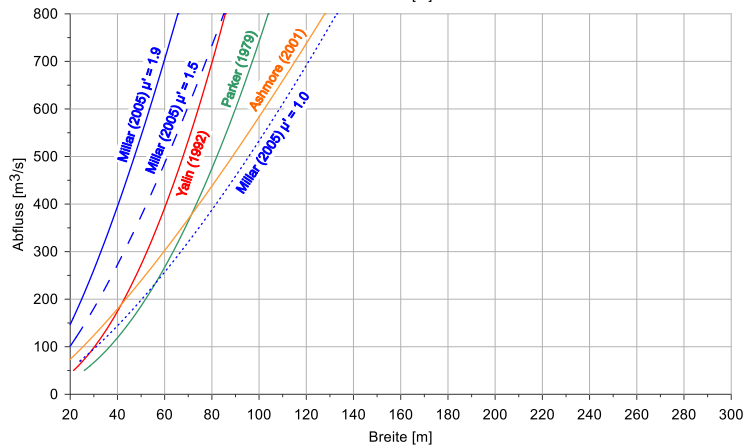
⁵ Die Transport-Effizienz η ist definiert als $\eta = G_b / \rho Q J$ mit G_b = Transportrate [kg/s], ρ = Dichte Wasser [kg/m³], Q = Abfluss [m³/s] und J = Gefälle [-]

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

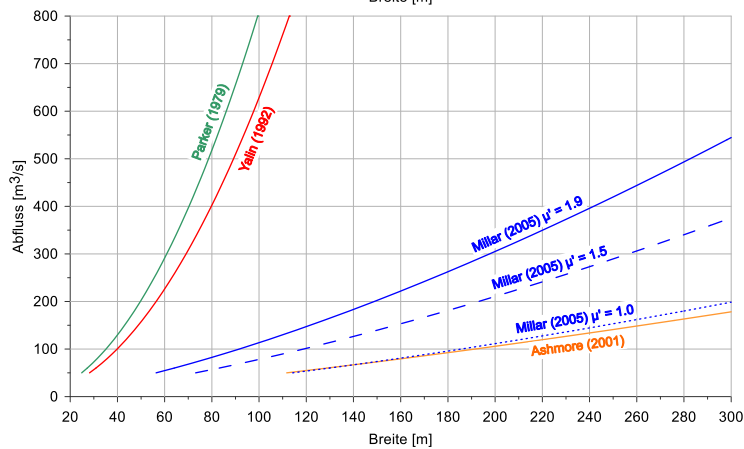
Gefälle = 0.2 %
 dm = 2 cm



Gefälle = 0.2 %
 dm = 6 cm



Gefälle = 1.0 %
 dm = 2 cm



Gefälle = 1.0 %
 dm = 6 cm

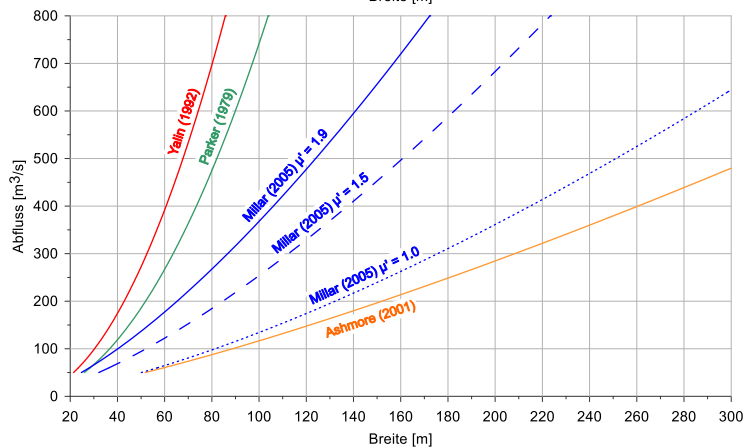


Abb. 16 Sohlenbreite aus verschiedenen Formeln bei Variation des Gefälles und des Korndurchmessers

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 ausgewählt⁶, der Hintergrund der Formel analysiert und diese bezüglich ihrer Position⁷ 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. 17).

Yalin

Die Formel von Yalin [22] 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 [19].

Gleichgewichtsbreite nach Yalin⁸: $SB = 1.5 \cdot Q^{0.5} / dm^{0.25}$

Parker

Parker [18] 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: $SB = 4.4 \cdot Q^{0.5} / ((s-1) \cdot g \cdot dm)^{0.25}$

⁶ 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 [19].

⁷ Die Einordnung ist vergleichbar mit derjenigen von Requena [19]

⁸ 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 [-]
dm	= mittlerer Korndurchmesser [m] des Sohlenmaterials
s	= $\rho_{\text{Geschiebe}} / \rho_{\text{Wasser}}$

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite*Ashmore*

Die Formel von Ashmore [6] 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 [19] wird durch Ashmore dementsprechend die Grenzbreite (Breite nach sekundärer Seitenerosion) berechnet.

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

Millar

Millar [15] bestimmte aufgrund eines umfangreichen Data-Sets die Konstanten in den B-Q resp. h/Q-Beziehungen und publizierte folgende Formel, welche gemäss Requena [19] 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 [12] 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 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 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. 17). Rückschlüsse zur natürlichen Gerinneform können aus historischen Dokumenten (Kapitel 6.2), naturnahen Vergleichsstrecken (Kapitel 6.3), Terrainanalysen (Kapitel 6.4) oder dem

Methoden zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite

Ansatz von Rosgen [20] abgeleitet werden. Ist die Wahl der geeigneten Formeln unsicher, so wird die Formel von Millar [15] (mit $\mu = 1.5$) empfohlen.

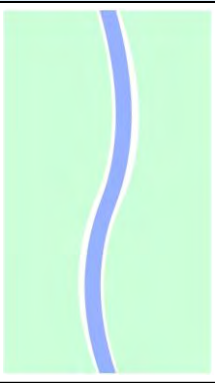


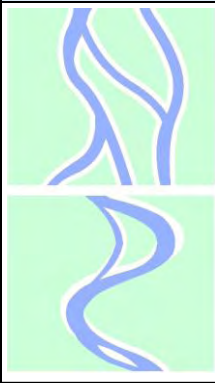
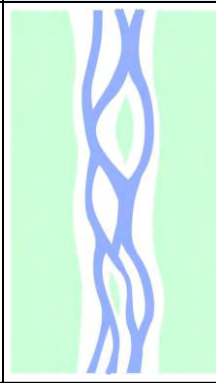
Einteilung der natürlichen Gerinneform	gestreckte und gewundene Gerinne	mäandrierende Gerinne	gewundene Gerinne mit Bänken	gewundene Gerinne mit Inseln und Bänken	verzweigte Gerinne	
						
Merkmale der natürlichen Gerinneform	steiles Gefälle, wenig Seitenbewegung, meist grobes Sohlenmaterial	flaches 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, Teilgerinne trennen sich nicht über weite Strecken	
Parameter für empirische Formeln	betbildender Abfluss	HQ ₂ - HQ ₅	ca. HQ ₂	HQ ₂ - HQ ₅	HQ ₂ - HQ ₅	ca. HQ ₅
	massgebende Korngrösse	tendenziell Unterschichtsmaterial	tendenziell Unterschichtsmaterial	tendenziell Unterschichtsmaterial	tendenziell feiner als Unterschichtsmaterial	tendenziell feiner als Unterschichtsmaterial
tendenziell angestrebte Breite	Gleichgewichts-breite	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. 17 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. [17]

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 (dm) benötigt. 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 = dm 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 dm etwas feiner als das Unterschichtmaterial zu wählen. Der gewählte mittlere Korndurchmesser darf aber nicht feiner als jener des laufenden Materials sein.

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 Festlegung 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 wird deshalb vorgeschlagen, 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

Festlegung 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, können die Methoden tendenziell wie folgt gewichtet werden:

- | | |
|---------------------------------|---------------------------|
| 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.

Plausibilisierung mit Hilfe der empirischen Ansätze

Die empirischen Ansätze können häufig gut zur Plausibilisierung der ermittelten natürlichen Sohlenbreite verwendet werden. Aufgrund der natürlichen Gerinneform (geradliniges, ausgeprägt mäandrierendes, schwach mäandrierendes oder mehrarmiges / verzweigtes Gerinne) kann eingeordnet werden, ob die natürliche Sohlenbreite tendenziell eher bei der Gleichgewichtsbreite oder bei der Grenzbreite liegt (siehe Einordnung in Abb. 17). Die Gleichgewichts- und die Grenzbreite können über die empirischen Ansätze berechnet werden (siehe Kapitel 6.5). Die Bandbreite bei den empirischen Ansätzen ist meist relativ gross, was in der Regel viel Spielraum zwischen Gleichgewichts- und Grenzbreite lässt.

Folgende Kriterien deuten darauf hin, dass die mit den Methoden 1 bis 3 ermittelte Breite zu schmal ist:

- Die ermittelte natürliche Sohlenbreite ist kleiner als die rechnerische Gleichgewichtsbreite
- Die natürliche Gerinneform ist ein mehrarmiges oder verzweigtes Gerinne und die ermittelte natürliche Sohlenbreite liegt nahe bei der Gleichgewichtsbreite

Folgendes deutet darauf hin, dass die ermittelte Breite zu breit ist:

- Die ermittelte natürliche Sohlenbreite ist grösser als die rechnerische Grenzbreite

Festlegung der natürlichen Sohlenbreite

- Die natürliche Gerinneform ist ein gradliniges oder ein mäandrierendes Gerinne und die ermittelte natürliche Sohlenbreite liegt nahe der Grenzbreite

Die Methode der empirischen Ansätze wird nur dann direkt zur Berechnung der natürlichen Sohlenbreite mitverwendet, wenn die anderen Grundlagen aufgrund geringer Aussagekraft keine befriedigenden Resultate liefern und wenn die Eingabegrößen in guter Näherung vorhanden sind.

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 natürliche Sohlenbreite bei verändertem Abfluss oder Geschiebe

7.2.1 Wann ist es sinnvoll die natürliche Sohlenbreite anzupassen

Die Sohlbreite 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 Geschiebehalt 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 Renaturierungsmassnahmen 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 Sohlbreite 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, wenn ein verändertes Abflussregime oder Geschiebelieferung vorliegen. Da aber jeder Gewässerabschnitt von zahlreichen weiteren Faktoren abhängen kann, muss der Einfluss immer im Einzelfall plausibilisiert werden.

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).

Festlegung der natürlichen Sohlenbreite

- 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 aber 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 Sohlbreite bei Fließgewässern mit ehemals sehr grossen natürlichen Sohlbreiten und Nutzungsdruck

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

Die einstmals grosse natürliche Sohlbreite stellt bei diesen Fließgewässern eine grosse Herausforderung für die Umsetzung von Wasserbauprojekten dar, 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 Sohlbreite 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):

Festlegung der natürlichen Sohlenbreite

- Die Bestimmung/Ermittlung der theoretischen natürlichen Sohlbreite 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, Pioniervegetation, Gleit- und Prallufer, Strömungsvielfalt im Gerinne, Mikrohabitate, eigenständige 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 innerhalb von Siedlungen, namentlich bei dichter Besiedlung, wo Ufermauern notwendig sein können.
- 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 wird die im Handbuch beschriebene Methodik zur Ermittlung der natürlichen Sohlenbreite anhand von Anwendungsbeispielen aufgezeigt.

Anwendungsbeispiele

8.1 Jogne (cantons de Fribourg et Berne)

Cet exemple présente la détermination de la largeur naturelle du fond du lit (L_{nat}) de la Jogne (Jaunbach) entre Kappelboden et Charmey dans les cantons de Fribourg et Berne, sur un secteur de 10.7 km entre les km 5.9 et 17.1 (Abb. 18). Le secteur a été divisé en 12 tronçons homogènes selon la pente du lit, le débit, la topographie du fond de vallée et l'état avant correction selon les plans d'archive (Abb. 22 - Abb. 26) Dans le cadre de cet exemple, il a été décidé de traiter uniquement de l'étude des tronçons 1 (0.5 km), 4 (1.6 km), 5 (0.6 km), 9 (0.7 km) et 12 (0.4 km) afin de limiter les redondances. La méthodologie utilisée pour les autres tronçons est identique.



Abb. 18 Localisation du périmètre d'étude sur la Jogne (km 5.9 – 17.1)

8.1.1 Etat actuel

Bassin versant

Dans le périmètre d'étude, la Jogne présente un bassin versant d'une surface d'environ 102 km².

Type de cours d'eau

Dans le périmètre d'étude, la Jogne longe majoritairement des surfaces d'exploitation agricole. Elle traverse toutefois les hameaux de la Tzintre, Im Fang et Jaun. Les zones forestières ne sont touchées que par endroits. Le style de la Jogne est majoritairement celui d'un cours à méandre migrants. La largeur moyenne actuelle du lit de la rivière est d'environ 10-15 m.

État du cours d'eau

Concernant la morphologie, la rivière présente une faible variabilité de largeur en raison des stabilisations des berges existantes (digues longitudinales). La structure du lit est relativement homogène. La Jogne est toutefois un cours d'eau très actif avec une pente longitudinale moyenne d'environ 2%, charriant ainsi des grandes quantités de sédiments. Localement, la Jogne s'apparente à un torrent avec une pente très importante de l'ordre d'environ 9%.

Anwendungsbeispiele

8.1.2 Bases et méthodologie de la détermination de la largeur naturelle du lit

Le tableau ci-dessous montre un extrait de l'analyse pour quelques tronçons choisis.

1 Documents historiques						
Base	Evaluation	Estimation de la largeur pleins bords (valeurs mesurées)	Estimation de la largeur des berges	Largeur du lit	Forme du lit	Influence anthropique
T1	Aucun plan existant	-	-	-	T1: cours encaissé	T9: stabilisations de berge présentes, donc Lnat pas pertinente.
T4	Plan d'endiguement XIXe	Figures 7-8	60 m (47 à 72 m)	42 m	Autres tronçons: cours à méandres migrants	Autres tronçons: quelques stabilisations ponctuelles présentes, ayant un impact localisé et limité sur la Lnat.
T5	Plan d'endiguement 1890	Figure 9	36 m (30 à 43 m)	25 m		
T9	Plan d'endiguement 1890	Figure 10	13 m (11 à 14 m)	9 m		
T12	Plan d'endiguement 1893	Figure 11	29 m (23 à 40)	20 m		
2 Tronçons de référence naturels						
Section	Evaluation	Estimation de la largeur pleins bords (valeurs mesurées)	Estimation de la largeur des berges	Largeur du lit	Forme du lit	Influence anthropique
Aucun tronçon naturel comparable n'a pu être identifié.						
3 Analyse de la topographie						
Base	Evaluation	Estimation de la largeur pleins bords (valeurs mesurées)	Estimation de la largeur des berges	Largeur du lit	Forme du lit	
T1	Swissalti 3D de 2019, 50cm sur profils en travers	Mesures	12 m (7 à 15 m)	2 x 0.5 m = 1 m	11 m	Cours encaissé avec une très forte pente. Fond de vallée = largeur du lit à pleins bords.
T4	Non évalué	-	-	-	-	
T5	Non évalué	-	-	-	-	Cours à méandres migrants avec généralement un seul bras actif; méandres pouvant se déplacer latéralement.
T9	Swissalti 3D de 2019, 50cm sur profils en travers	Mesures	40 m	2 x 2.5 m = 5 m	35 m	Vallée comparable à celle des tronçons 8 et 11 (non présentés) qui présentent une Lnat compatible avec la formule de Millar.
T12	Non évalué	-	-	-	-	
4 Formules empiriques						
Approche	Estimation de la largeur pleins bords (moyenne)			Largeur du lit (moyenne)	Paramètres	
T1	Y: Largeur pleins bords (après érosion primaire) selon Yalin	Y: 21 m; P: 31 m; A: 307 m; M: 131 m		Y: 19 m; P: 27 m; A: 270 m; M: 115	Q=33-56m ³ /s, dm=0.04-0.06m, J=0.093	
T4	P: Largeur pleins bords (après érosion primaire) selon 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: Largeur pleins bords (après érosion secondaire) selon 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: Largeur pleins bords (après érosion secondaire) 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

8.1.3 Pondération

Tableau de pondération

Le tableau suivant montre les largeurs déterminées à partir des données de base et de la pondération choisie. Il en résulte les largeurs naturelles du lit suivantes : T1 : 11 m ; T4 : 42 m ; T5 : 25 m ; T9 : 15 m ; T12 : 20 m.

1 Documents historiques			
		Largeur du lit	Pondération
T1	Aucun plan existant	-	0%
T4	Plan d'endiguement fin XIXe siècle	42 m	100%
T5	Plan d'endiguement de 1890	25 m	100%
T9	Plan d'endiguement de 1890	9 m	0%
T12	Plan d'endiguement de 1893	20 m	100%
			42 m
			25 m
			20 m
2 Tronçons de référence naturels			
		Largeur du lit	Pondération
			aucune
3 Analyse de la topographie			
		Largeur du lit	Pondération
T1	Profils en travers sur MNT	11 m	100%
T4	Non évalué	-	0%
T5	Non évalué	-	0%
T9	Profils en travers sur MNT	35 m	0%
T12	Non évalué	-	0%
			11 m
4 Formules empiriques			
Approche		Largeur du lit	Pondération
T1	Y: Largeur pleins bords (après érosion primaire) selon Yalin	Y: 19 m; P: 27 m; A: 270 m; M: 115 m	0%
T4	P: Largeur pleins bords (après érosion primaire) selon Parker	Y: 11 m; P: 17 m; A: 24 m; M: 15 m	0%
T5	A: Largeur pleins bords (après érosion secondaire) selon Ashmore	Y: 10 m; P: 14 m; A: 23 m; M: 14 m	0%
T9	M: Largeur pleins bords (après érosion secondaire) Millar ($\mu=1.5$; $s=2.65$)	Y: 9 m; P: 13 m; A: 27 m; M: 15 m	100%
T12		Y: 8 m; P: 12 m; A: 20 m; M: 11 m	0%
			15 m

A titre d'information, le tableau ci-dessous donne les largeurs naturelles en mètres déterminées pour les tronçons qui ne sont pas présentés dans cet exemple d'application.

Tronçon	T2	T3	T6	T7	T8	T10	T11
Largeur naturelle (m)	38	27	19	19	19	9	12
Longueur du tronçon (km)	3.1	1.3	1.0	0.5	0.7	0.4	0.7
Méthode de détermination*	1	4 (A)	1	2 (T6 et T8)	1	1	1

* 1 : documents historiques. 2 : référence spatiale. 3 : analyse de la topographie. 4 : formules empiriques (auteur).

Justification des choix des valeurs retenues

Anwendungsbeispiele

Dans le cadre de cette étude, les valeurs mesurées sur les plans ont été utilisées en priorité pour définir la largeur naturelle du lit, car elles constituent la méthode jugée la plus fiable, les plans étant assez précis et les stabilisations de berge presque complètement absentes. Au total, la largeur du lit de 8 des 12 tronçons a été définie selon les plans d'endiguement. Concernant cet exemple, les plans ont permis de définir la largeur naturelle du lit des tronçons T4, T5 et T12.

En second lieu, ce sont les formules empiriques qui ont été utilisées pour définir la largeur naturelle du lit. La méthode empirique est jugée plus fiable que l'étude de la topographie. En effet, les modifications de la morphologie du cours d'eau dues aux travaux d'endiguement et le degré de précision du MNT peuvent influencer considérablement les valeurs mesurées sur les profils en travers. Les plans d'archives n'étant pas pertinents pour le tronçon T9, ce sont les formules empiriques qui ont permis de déterminer la largeur naturelle du lit. Le choix de la formule empirique à retenir a été basé sur la comparaison de la performance des diverses formules sur des tronçons jugés similaires au T9 (T8 et T11, non présentés dans cet exemple). Sur ces tronçons, c'est la formule de Millar qui fournit des résultats correspondant aux mesures sur les documents historiques. Cette formule a donc été retenue pour définir la largeur naturelle du lit pour le T9.

Finalement, l'étude de la topographie a été utilisée en dernier recours. Les plans d'archives et les formules empiriques n'étant pas pertinents pour le tronçon T1, la largeur naturelle a été définie selon des mesures sur les profils en travers. Ce tronçon encaissé n'ayant jamais subi de correction, les mesures sur les profils en travers s'avèrent pertinentes.

Ci-dessous sont décrites les évaluations effectuées pour chaque méthodologie pour les tronçons présentés dans cet exemple.

Documents historiques

Les cartes historiques de la Jogne ne permettent pas de mesurer la largeur naturelle du lit. En revanche, les plans d'endiguement de la fin du XIX^e siècle, trouvés aux archives cantonales, donnent des informations très utiles concernant la largeur de la Jogne avant les corrections. Toutefois, les dimensions mesurées doivent être considérées avec précaution aux endroits où existaient déjà des ouvrages de retenue et des stabilisations ponctuelles, avant les grands travaux d'endiguement.

T1 : La L_{nat} moyenne n'a pas pu être mesurée sur les plans car ce tronçon n'y est pas représenté. Au vu de son encaissement naturel, ce tronçon n'a vraisemblablement jamais fait l'objet d'endiguement.

Anwendungsbeispiele

T4 : La L_{nat} moyenne mesurée correspond à 42 m. Les secteurs amont et aval de ce tronçon sont très larges. Plusieurs mesures au niveau du secteur central ont été exclues car des stabilisations préexistantes influencent les valeurs mesurées.

T5 : La L_{nat} moyenne mesurée correspond à 25 m. Les stabilisations préexistantes sont peu nombreuses et ne semblent pas influencer les valeurs mesurées.

T9 : La L_{nat} moyenne mesurée correspond à 9 m mais ne semble pas pertinente car de nombreuses stabilisations préexistantes, visibles sur les méandres en extrados, influencent les valeurs mesurées.

T12 : La L_{nat} moyenne mesurée correspond à 20 m. Les stabilisations préexistantes sont visiblement peu nombreuses et ne semblent pas influencer significativement les valeurs mesurées.

Etat de référence

Une recherche de tronçons de référence a eu lieu. Toutefois, aucun tronçon comparable n'a pu être identifié.

Analyses de la topographie

T1 : La L_{nat} moyenne mesurée sur les profils en travers correspond à 11 m (fond de vallée). Les stabilisations sont inexistantes. La pente est très importante.

T9 : Des terrasses alternées d'une largeur d'environ 40-50 m sont visibles sur les profils en travers. Cela laisse supposer que ce tronçon est comparable aux tronçons T8 et T11 qui présentent des terrasses similaires sur les profils en travers.

Les profils en travers des tronçons T4, T5 et T12 n'ont pas été évalués.

Approche empirique

T1 : Aucune formule ne donne des valeurs raisonnables par rapport aux mesures sur plans de la L_{nat} , ce qui est tout à fait normal puisque les formules ne tiennent pas compte de la particularité des cours encaissés.

T4 : Aucune formule ne donne des valeurs de L_{nat} aussi importantes que celles mesurées sur plans. Toutefois, plusieurs plans montrent des largeurs proches de 60 m. Selon les plans, il s'agit d'une moyenne cohérente. Cette valeur supérieure s'explique vraisemblablement par la présence d'un goulet d'étranglement (passage étroit à cause d'un éperon rocheux) en aval de ce tronçon, induisant une accumulation des sédiments sur le tronçon en question.

Anwendungsbeispiele

T5 : Yalin et Parker donnent des valeurs trop faibles par rapport aux mesures sur plans de la L_{nat} . Ashmore et Millar sont plus pertinents car d'importants bancs de gravier sont visibles sur les plans. Ashmore correspond le mieux à ce qui a été observé sur plans. La moyenne des valeurs de L_{nat} obtenue correspond à 23 m avec Ashmore.

T9 : Ashmore et Millar sont plus pertinents car ce tronçon présentait probablement d'importants bancs de gravier avant son endiguement. Seul Millar donne des valeurs raisonnables en comparaison des L_{nat} mesurées sur les plans pour T8 et T11. La moyenne des valeurs de L_{nat} obtenue avec Millar correspond à 15 m pour T9.

T12 : Yalin et Parker donnent des valeurs trop faibles par rapport aux mesures sur plans de la L_{nat} . Ashmore et Millar sont plus pertinents car d'importants bancs de gravier sont visibles sur les plans. Ashmore correspond le mieux à ce qui a été observé sur plans. La moyenne des valeurs obtenues avec Ashmore correspond à 20 m.

Anwendungsbeispiele

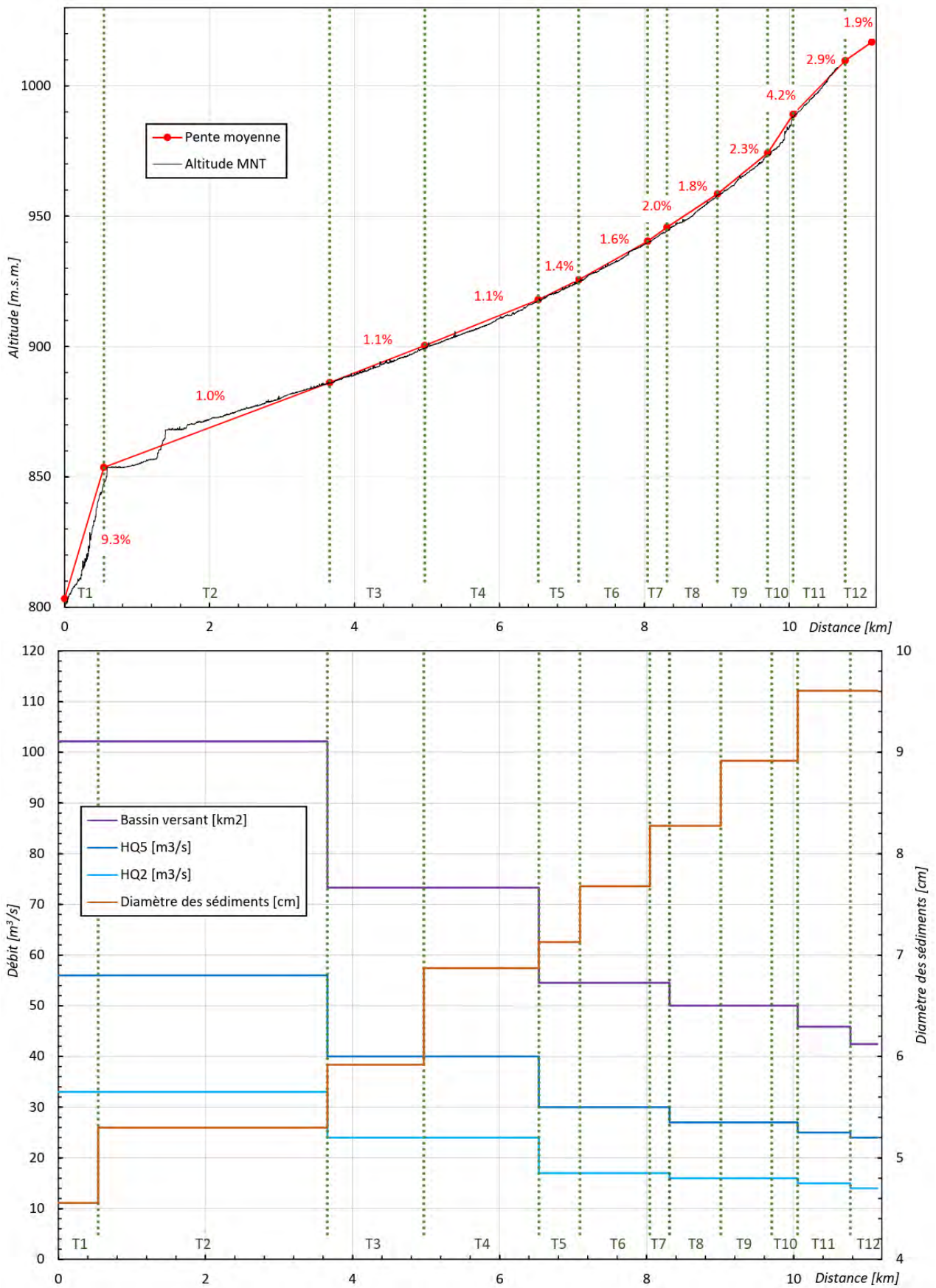


Abb. 19 Représentation des différents paramètres de base sur le profil en long de la Jogne

Anwendungsbeispiele



Abb. 20 La Jogne à la hauteur du Pont du Roc sur le tronçon T2, km 8.84, le 2.12.2021



Abb. 21 La Jogne à la hauteur de Bonnefontaine, sur le tronçon T2, km 8.10, le 2.12.2021

Tronçon 4 (T4)

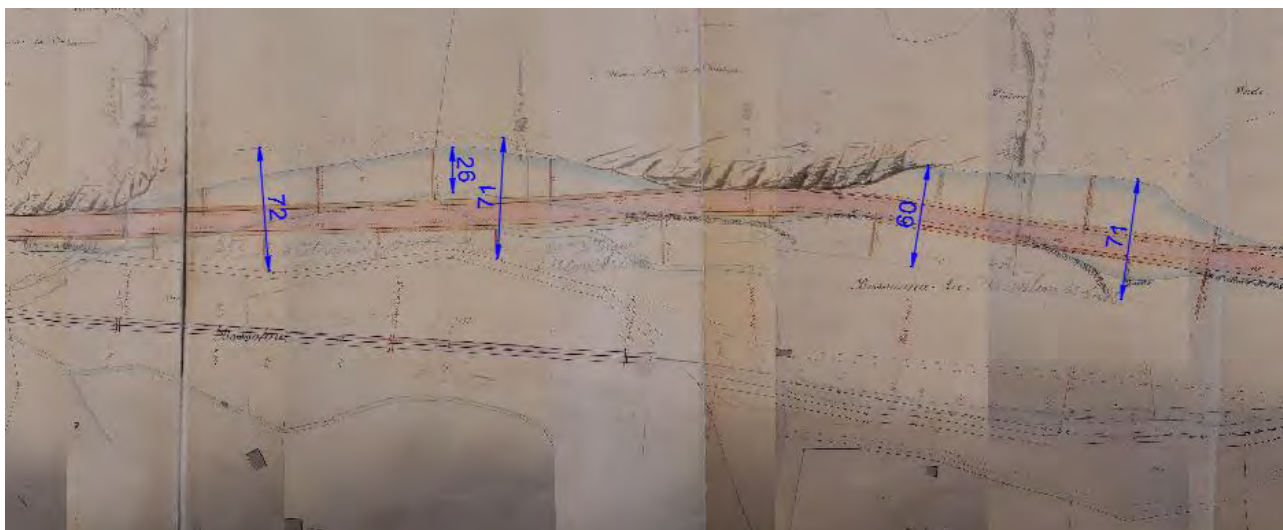


Abb. 22 Extrait du plan d'endiguement de la fin du XIXe siècle entre Krämersweidli et Hinterweld avec des largeurs pleins bords (L_{pb}) mesurées jusqu'à 70 m. Les sédiments n'étant pas clairement représentés sur le plan, la L_{pb} peut être mesurée selon l'emprise latérale des éperons (stabilisations perpendiculaires aux digues).

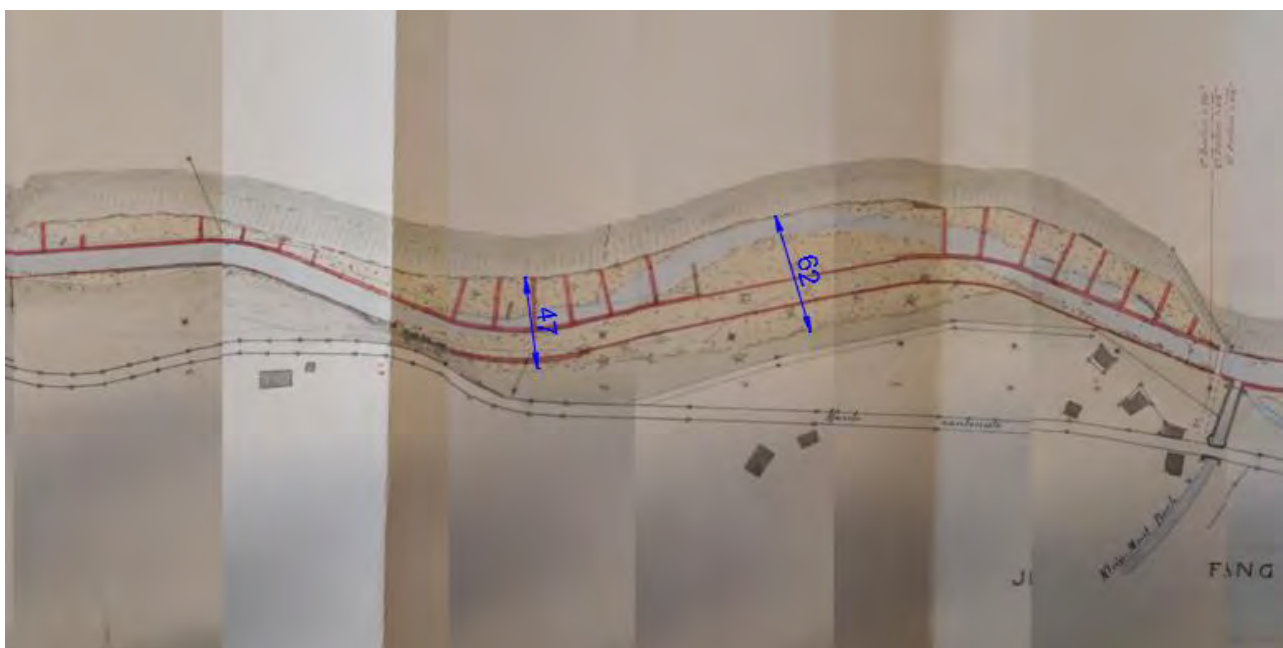


Abb. 23 Extrait du plan d'endiguement de 1890 entre Bifang et Im Fang avec des largeurs pleins bords (L_{pb}) mesurées jusqu'à 60 m.

Tronçon 5 (T5)

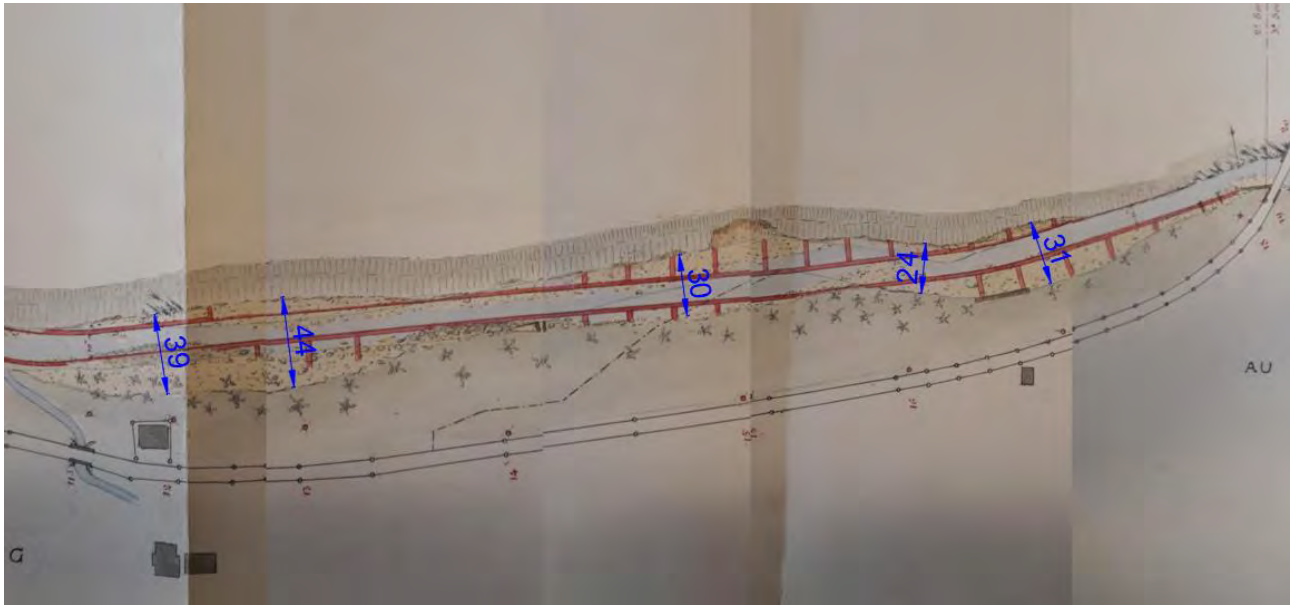


Abb. 24 Extrait du plan d'endiguement de 1890 entre Im Fang et Fangeren Auen avec des largeurs pleins bords (L_{pb}) mesurées jusqu'à 45 m

Tronçon 9 (T9)

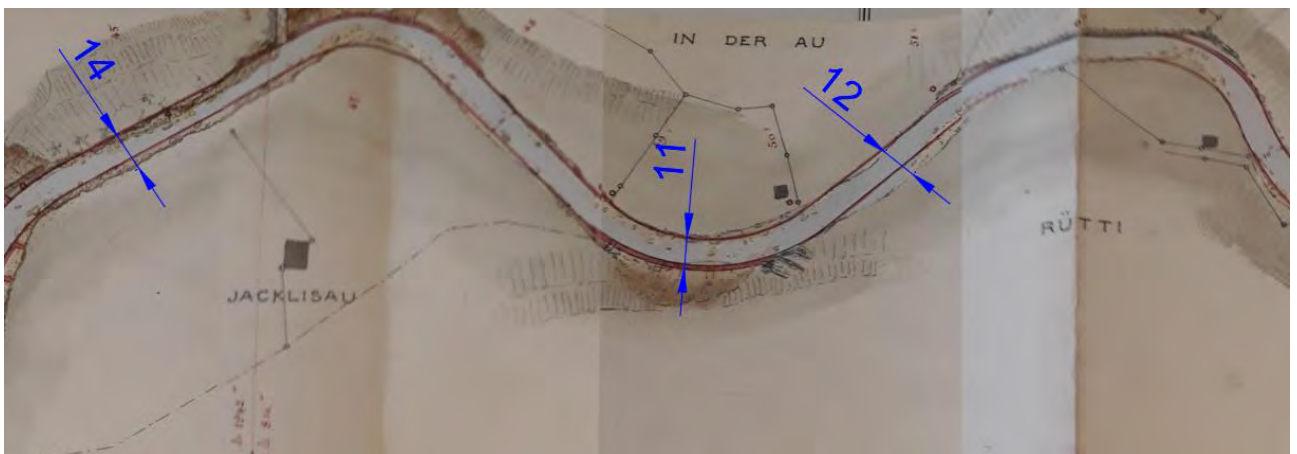


Abb. 25 Extrait du plan d'endiguement de 1890 entre Chuerzi et Grüemersweidli avec des largeurs pleins bords (L_{pb}) mesurées jusqu'à environ seulement 15 m.

Anwendungsbeispiele

Tronçon 12 (T12)



Abb. 26 Extrait du plan d'endiguement de 1893 à la hauteur de Kappelboden jusqu'à la confluence de l'Oberbach et de la Jogne, avec des largeurs pleins bords (L_{pb}) mesurées jusqu'à environ 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. 41) vorgestellt.

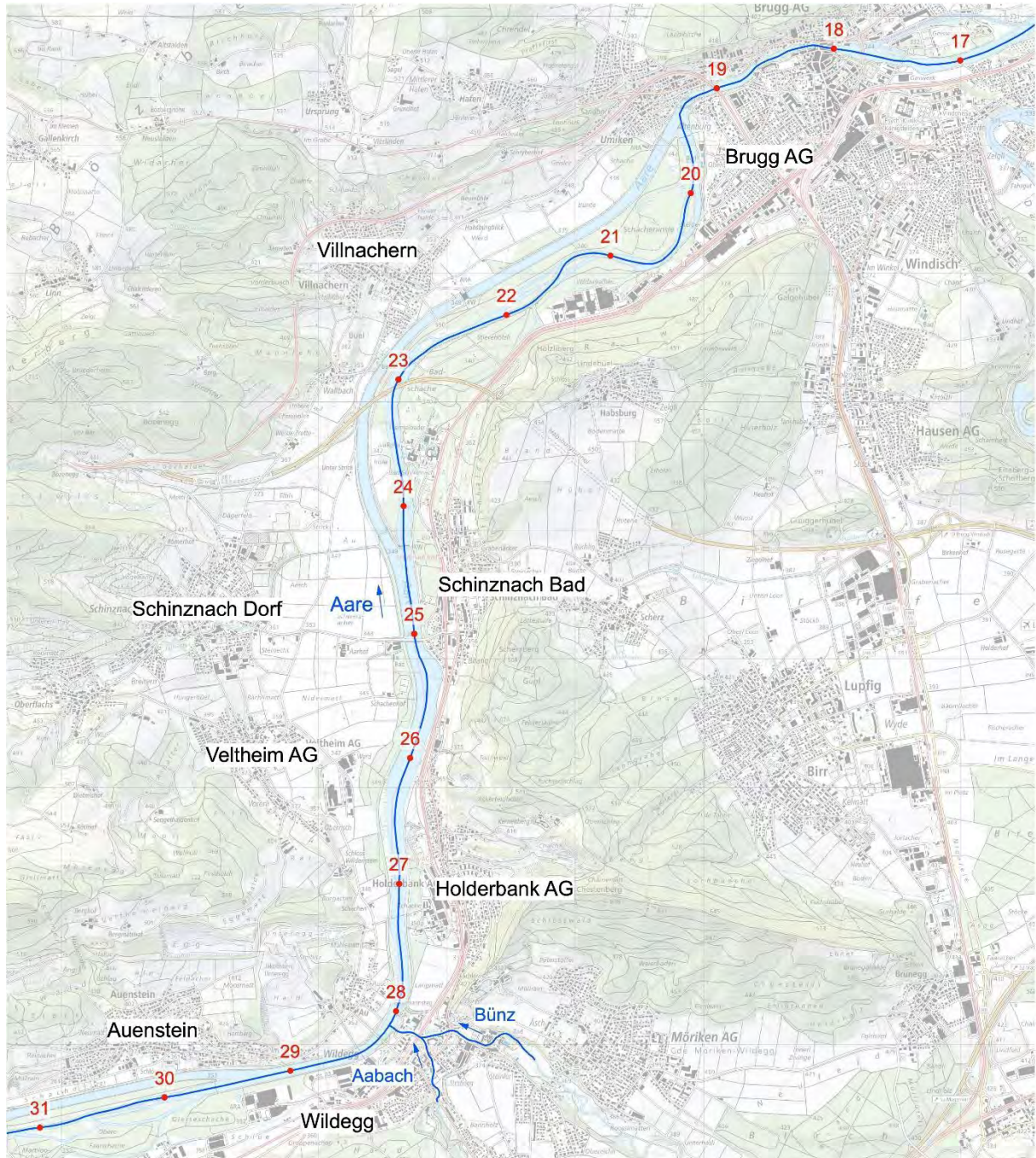


Abb. 27 Lage des Untersuchungsperimeters an der Aare zwischen Wildegg und Brugg (GEWISS km 29.1 – 19.3), Masstab 1:50'000.

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. 46 - Abb. 33). 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. 44). 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. 45). 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 Planimetrie⁹ 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.

⁹ 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

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 (HQ2)	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

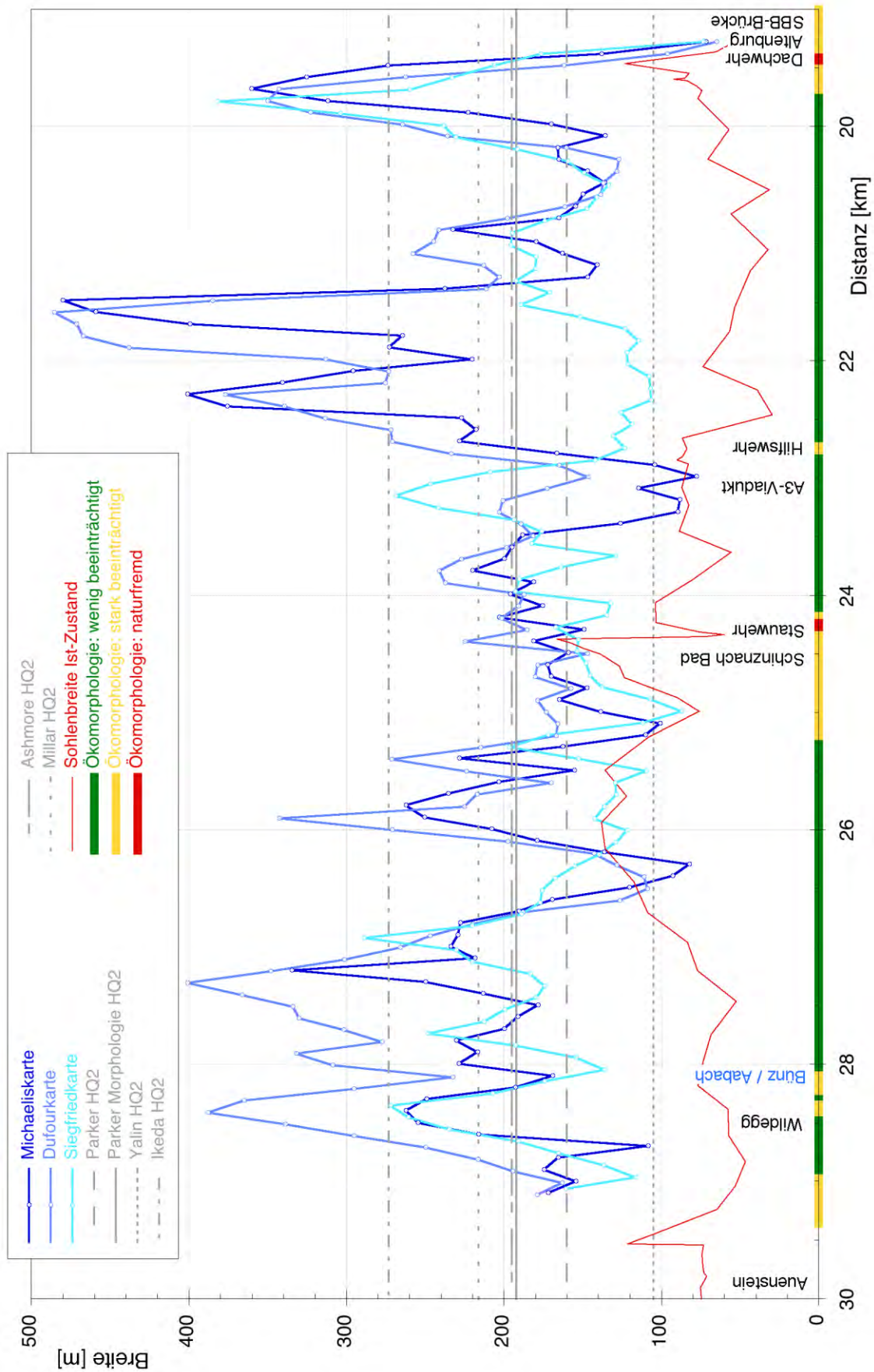


Abb. 28 Aare GEWISS km 30 – 19. Längenprofil der Breite gemäss historischen Karten, für verschiedene empirische Ansätze sowie im Istzustand.

Anwendungsbeispiele



Abb. 29 Aare, Blick in Fließrichtung zur Brücke Schinznach Dorf - Schinznach Bad (GEWISS km 25.1). Strukturarmer Staubereich mit kleiner Fließgeschwindigkeit (2015).



Abb. 30 Aare, Restwasserstrecke flussabwärts des Hilfswehrs (GEWISS km 22.0) mit vielfältigen Strukturen und befestigtem Ufer (2015).

Anwendungsbeispiele

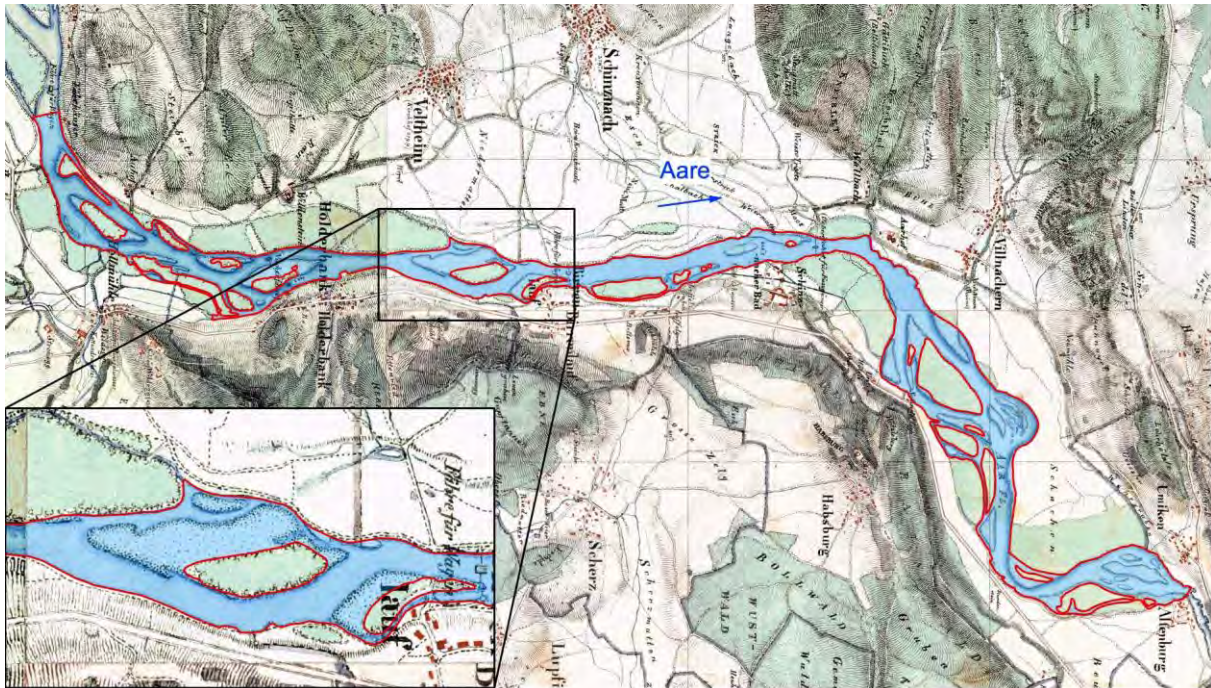


Abb. 31 Aare, Michaeliskarte (1843). Auenstein bis Brugg mit dem planimetrierten Bereich (rote Linie). Dargestellter Massstab 1:50'000, Detail 1:20'000.

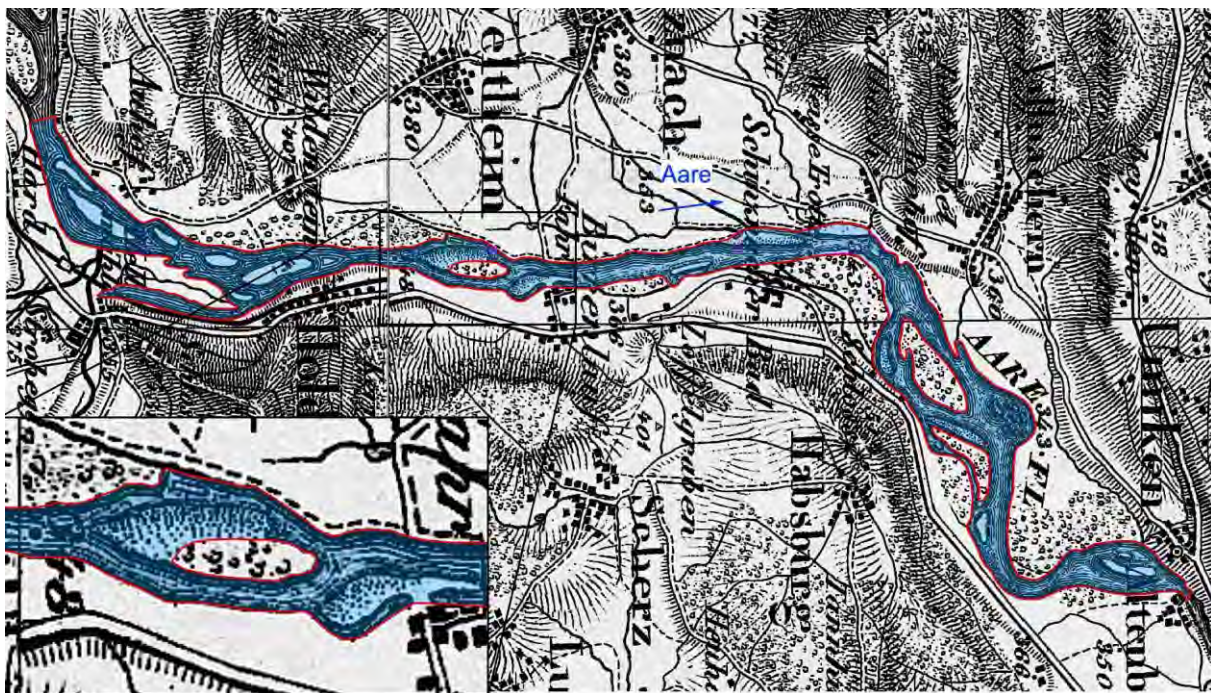


Abb. 32 Aare, Dufourkarte, Erstausgabe (1849-1861). Auenstein bis Brugg mit dem planimetrierten Bereich (rote Linie). Dargestellter Massstab 1:50'000, Detail 1:20'000.

Anwendungsbeispiele

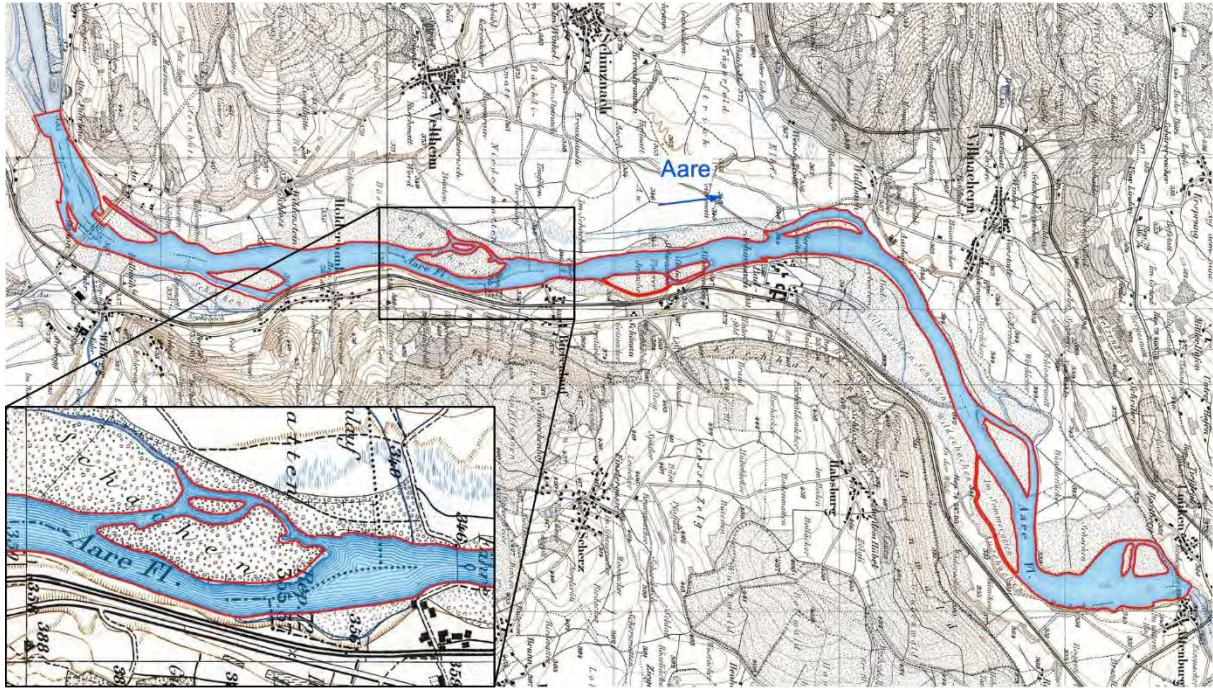


Abb. 33 Aare, Siegfriedkarte, Erstausgabe (1872-1882). Auenstein bis Brugg mit dem planimetrierten Bereich (rote Linie). Dargestellter Massstab 1:50'000, Detail 1:20'000.

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. 41) vorgestellt.

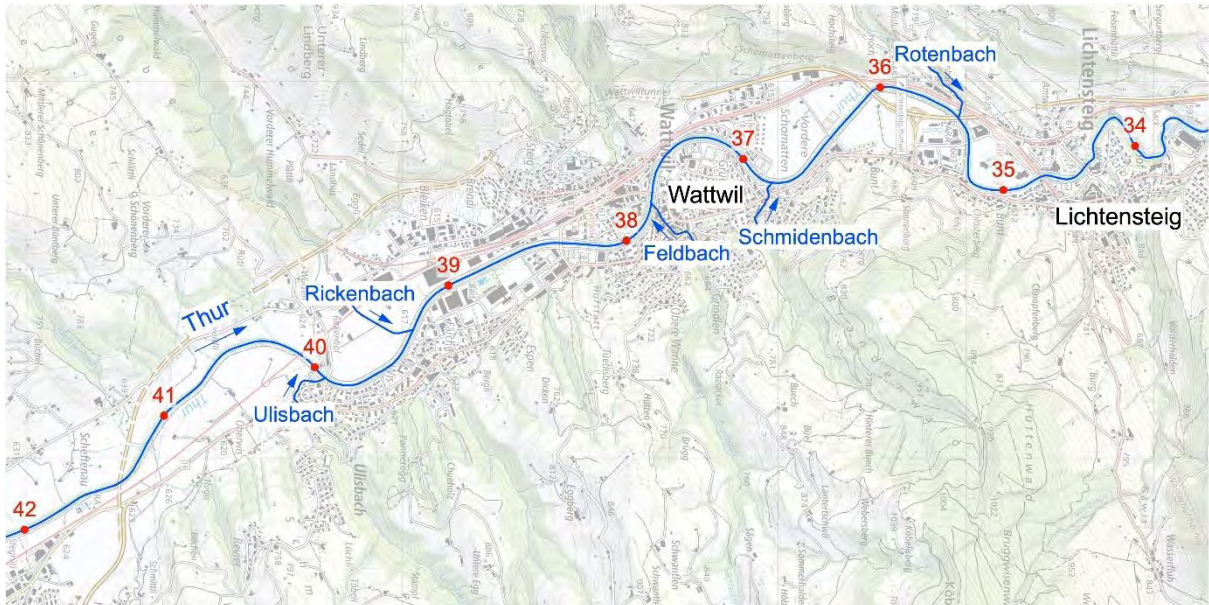


Abb. 34 Lage des Untersuchungsperimeters an der Thur bei Wattwil (GEWISS km 41.7 – 34.8), Massstab 1:40'000.

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.

Geschiebehaushalt

Die Thur weist bei Wattwil eine mittlere Geschiebeführung auf. Die Geschiebefracht ist naturnah und der Geschiebehaushalt 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. 44). Lokal bestehen an den Gleituffern kleine Geschiebebänke (Abb. 45). 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 Planimetrie¹⁰ 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).

¹⁰ 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		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		Ausgabegrösse		Breite HQ2		Breite HQ5
3a.	Parker	Abb. 2	Gerinnebreite		70 - 72 m	
3b.	Parker mit Morphologie	Abb. 2	Gerinnebreite		42 - 43 m	
3b.	Yalin	Abb. 2	Gerinnebreite		41 - 43 m	
3c.	Ikeda	Abb. 2	Gerinnebreite		34 - 53 m	
3d.	Ashmore	Abb. 2	Wasserspiegelbreite		46 - 70 m	
3e.	Millar 2005	Abb. 2	Wasserspiegelbreite		56 - 75 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

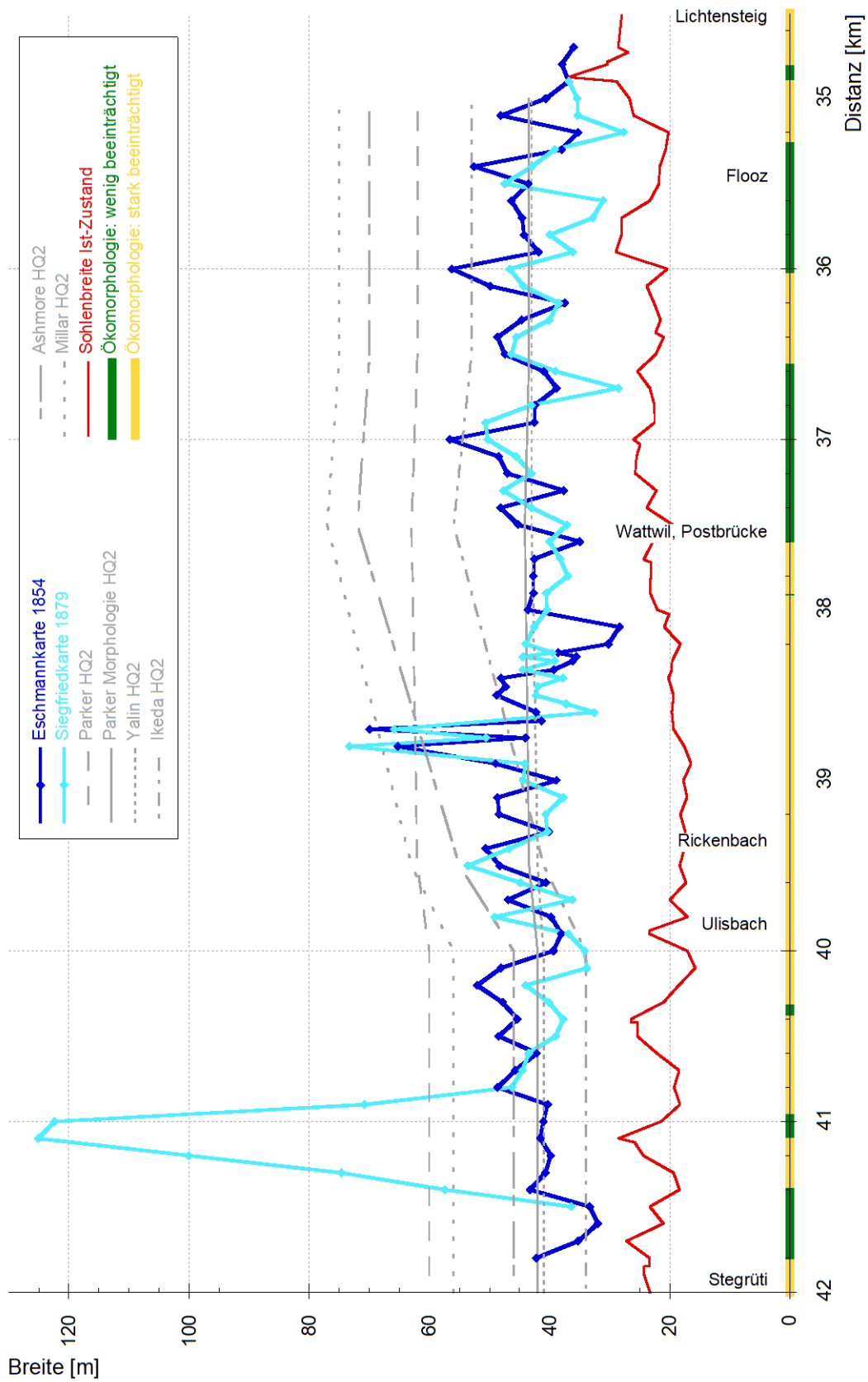


Abb. 35 Thur GEWISS km 42 – 34.5. Längenprofil der Breite gemäss historischen Karten, für verschiedene empirische Ansätze sowie im Istzustand. Bei den empirischen Ansätzen ist die Änderung der Breite in Fliessrichtung auf die Abflusszunahme zurückzuführen.

Anwendungsbeispiele



Abb. 36 Thur ab Brücke Waisenhausstrasse (GEWISS km 39.9) mit schmaler, ausgeräumter Sohle sowie steilen und strukturarmen Ufern (2015). Blick flussaufwärts.



Abb. 37 Thur mit anstehendem Fels entlang dem Prallufer und einer Kiesbank entlang dem Gleitufer (GEWISS km 35.9). Blick flussabwärts (2015).

Anwendungsbeispiele

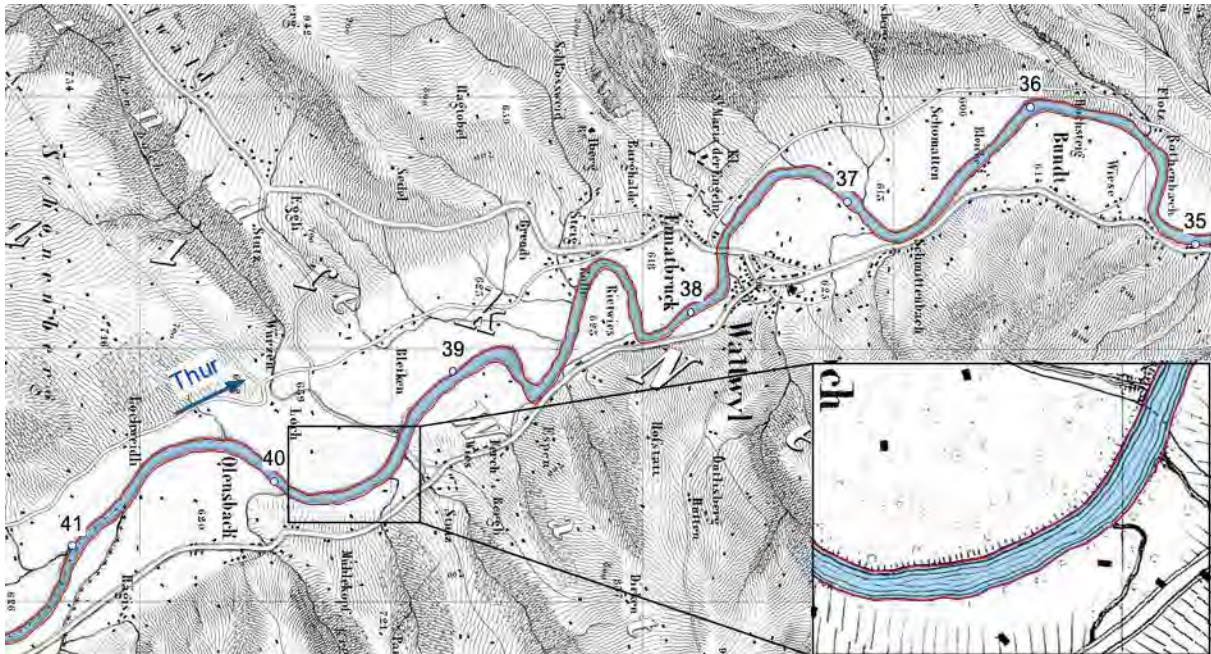


Abb. 38 Thur, Eschmannkarte (1854). Stegrüti (Ebnat-Kappel) bis Lichtensteig mit dem planimetrierten Gerinne (rote Linie). Dargestellter Massstab 1:30'000, Detail 1:10'000.

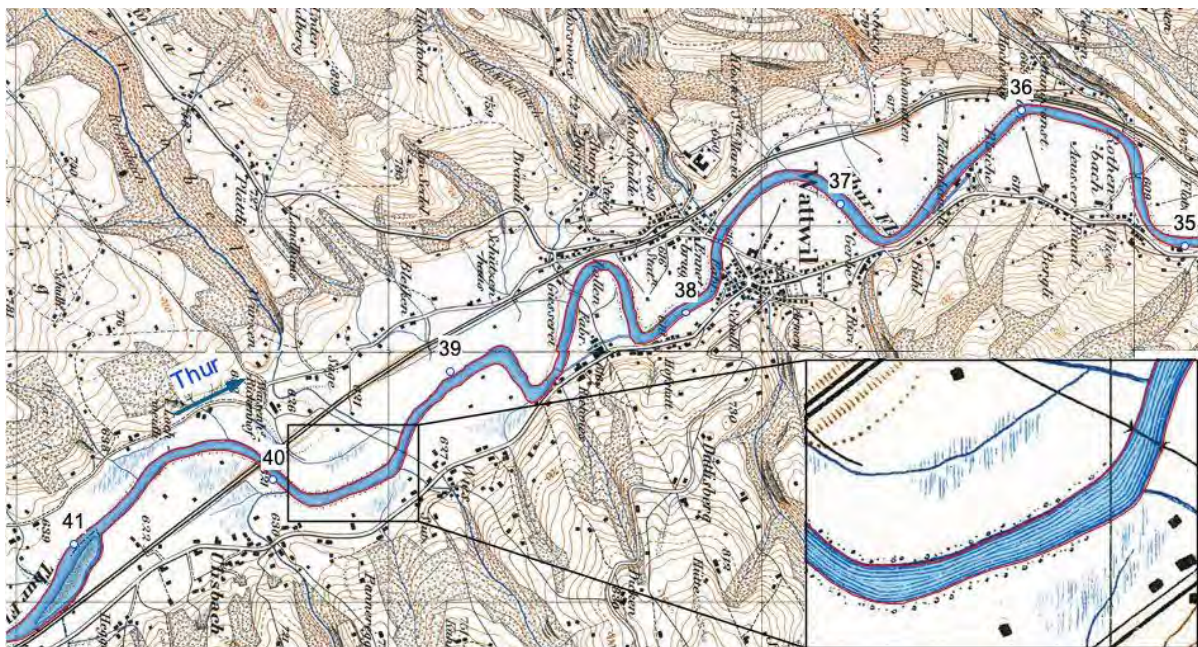


Abb. 39 Thur, Siegfriedkarte, Erstausgabe (1879). Stegrüti (Ebnat-Kappel) bis Lichtensteig mit dem planimetrierten Gerinne (rote Linie). Dargestellter Massstab 1:30'000, Detail 1:10'000.

Anwendungsbeispiele



Abb. 40 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. 41) vorgestellt.

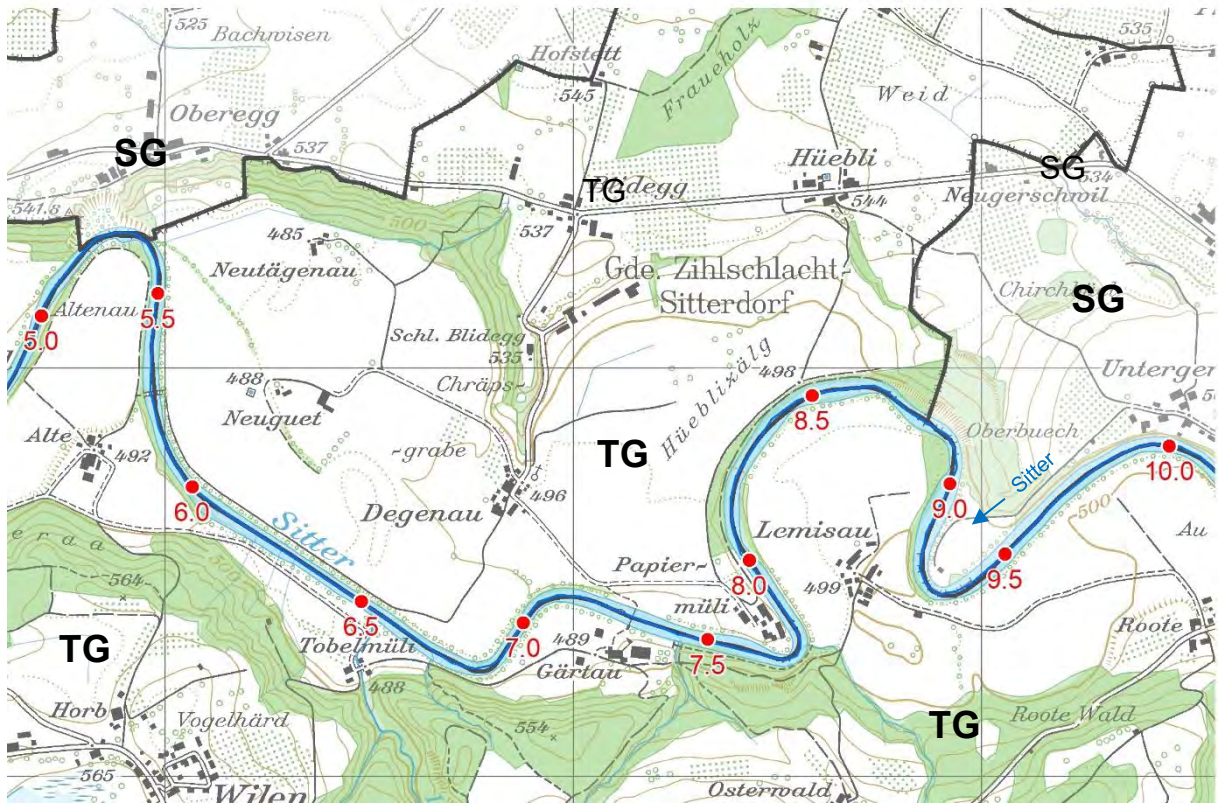


Abb. 41 Lage des Untersuchungsperimeters an der Sitter (GEWISS km 6.6 – 8.6)

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. 44, Abb. 45).

Anwendungsbeispiele

8.4.2 Grundlagen und Ansätze zur Breitenermittlung

1 Historische Dokumente						
Grundlage	Auswertung siehe:	Gerinnebreite	Schätzung Uferbereichsbreite	Sohlenbreite (Gerinne - Ufer)	Gerinneform	anthropogene Einflüsse
1a. Sulzbergerkarte (1836)	Abb. 20, Abb. 23	56 m	2 x 5 m	46 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)	Abb. 20, Abb. 24	95 m	2 x 5 m	85 m		
1c. Eschmannkarte (1850)	Abb. 20, Abb. 25	72 m	2 x 5 m	62 m		
2 Naturnahe Vergleichsstrecken						
Abschnitt	Auswertung siehe:	Gerinnebreite	Uferbereichsbreite	Sohlenbreite	Gerinneform	anthropogene Einflüsse
2a. GEWISS km 8.8 - 9.2	Abb. 20, Abb 26	45 m	2 x 5 m	35 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. Swisalti 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	$Sohlenbreite = 1.5 Q^{0.5} / dm^{0.25}$	45 m		$Q = 275 m^3/s, dm = 0.09 m$		
4b. Grenzbreite nach Ashmore	$Sohlenbreite = 0.0098 (\rho_w g Q J)^{0.777} / dm^{0.7}$	72 m		$Q = 275 m^3/s, J = 0.004 m/m, dm = 0.09 m$		
4c. Grenzbreite nach Millar	$Sohlenbreite = 16.5 Q^{0.7} J^{0.6} \mu^{-1.1} dm$ mit $Q^* = Q / ((s-1) g dm)^{0.5} dm^2$	45 m		$Q = 275 m^3/s, J = 0.004 m/m, \mu = 1.5, dm = 0.09 m, s = 2.65$		

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 50 m.

		gewichtete Breite (gerundet)	Gewichtung Methode
1. Historische Dokumente		55 m	80 %
	<u>Breite</u>	<u>Gewichtung</u>	
1a.	Sulzbergerkarte (1836)	46 m	50 %
1b.	Dufourkarte (1844)	85 m	0 %
1c.	Eschmannkarte (1850)	62 m	50 %
2. Naturnahe Vergleichsstrecken		35 m	20 %
	<u>Breite</u>	<u>Gewichtung</u>	
2a.	GEWISS km 8.8 - 9.2	35 m	100 %
3. Terrainanalysen		-	0 %
4. Empirische Ansätze		keine	0 %
	<u>Breite</u>	<u>Gewichtung</u>	
4a	Gleichgewichtsbreite nach Yalin	45 m	keine, Werte nur zur Plausibilisierung genutzt
4b.	Grenzbreite nach Ashmore	72 m	
4c.	Grenzbreite nach Millar	45 m	
Resultierende Sohlenbreite (gerundet)		50 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

Anwendungsbeispiele

grösserer Hochwasser oder Trockenperioden vor dem Aufnahmezeitpunkt 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 deutlich weniger stark gewichtet. Die Gewichtung der Methode "historische Dokumente" wird deshalb gutachterlich bei 80 % 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 mit nur 20% gewichtet.

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. Die Empirischen Ansätze wurden aber zur plausibilisieren der gewählten natürlichen Sohlenbreite verwendet.

*Plausibilisierung der
gewählten Breite*

Mit 50 m liegt die ermittelte Sohlenbreite aus der Gewichtungsmatrix leicht über der Gleichgewichtsbreite (45 m nach Yalin), was für ein natürlich "gewundenes" Gewässer plausibel ist.

Anwendungsbeispiele

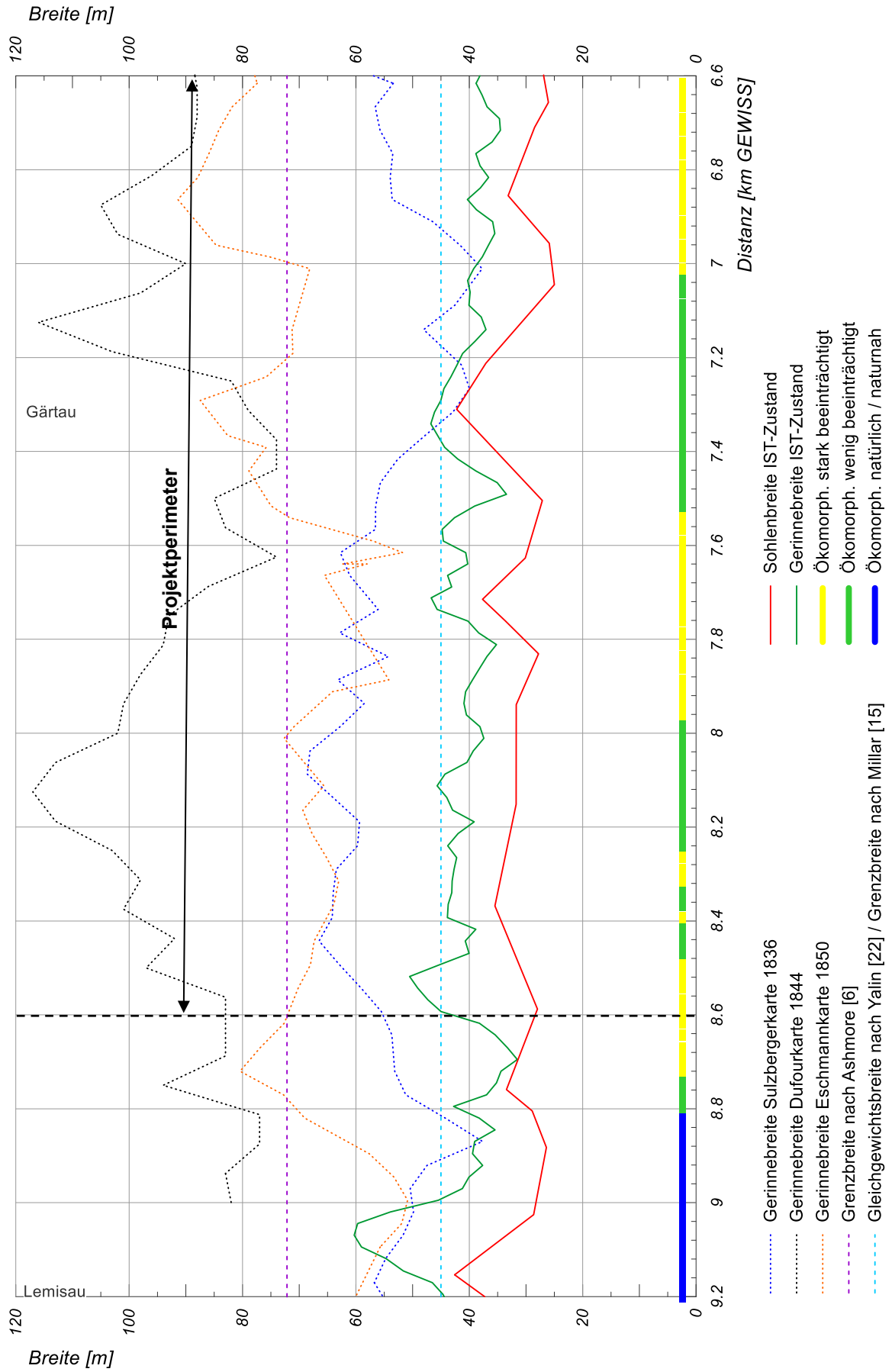


Abb. 42 Sitter GEWISS Km 6.6 -9.2, Darstellung ermittelte Breiten im Längenprofil

Anwendungsbeispiele

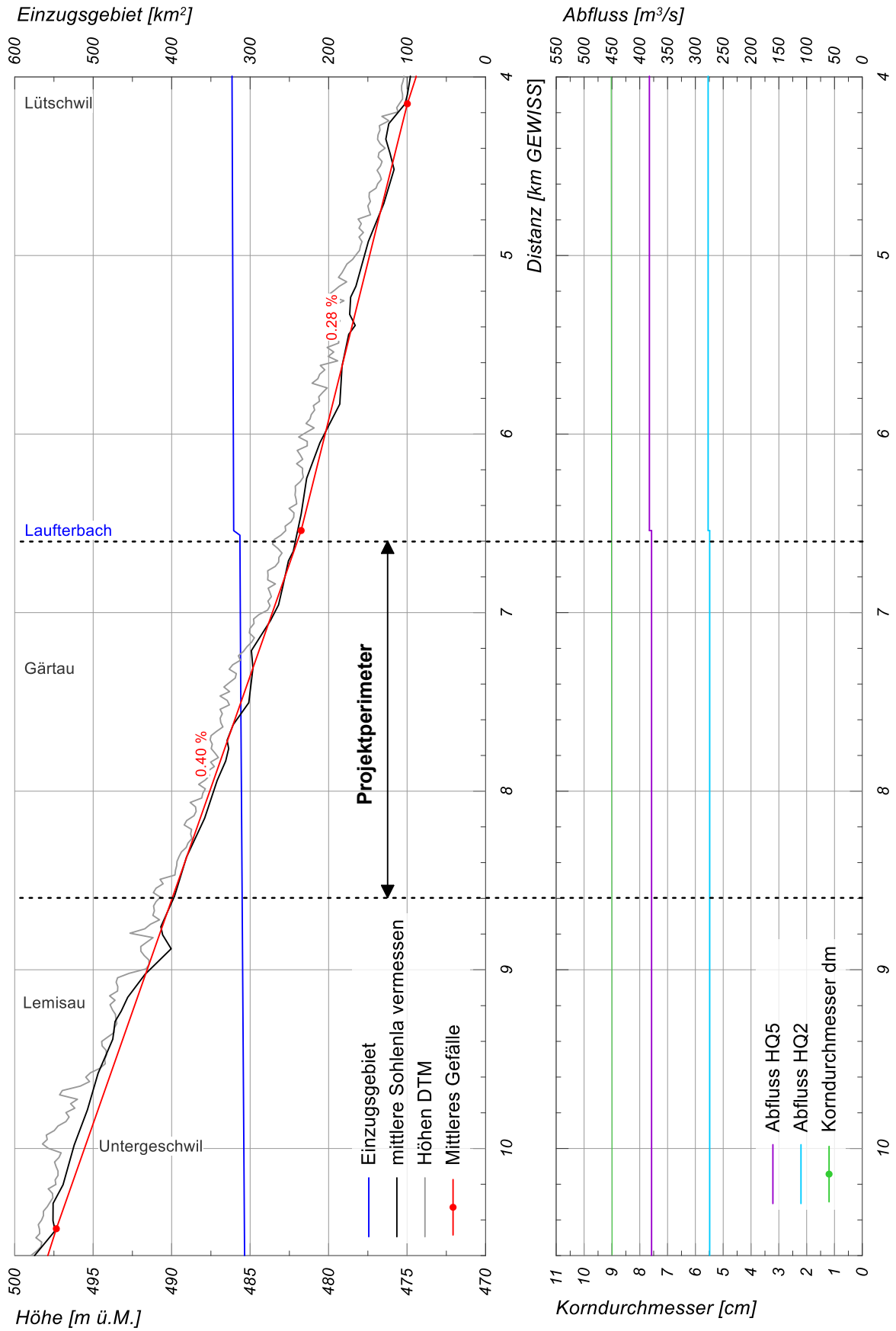


Abb. 43 Sitter GEWISS Km 4.0 -10.6, Darstellung diverser Grundparameter im Längenprofil

Anwendungsbeispiele



Abb. 44 Sitter bei Gertau km 7.3, Fließrichtung von links nach rechts (11.05.2016, $Q = \text{ca. } 6 \text{ m}^3/\text{s}$)



Abb. 45 Sitter bei Gertau km 7.2, Blick flussabwärts (11.05.2016, $Q = \text{ca. } 6 \text{ m}^3/\text{s}$)

Anwendungsbeispiele

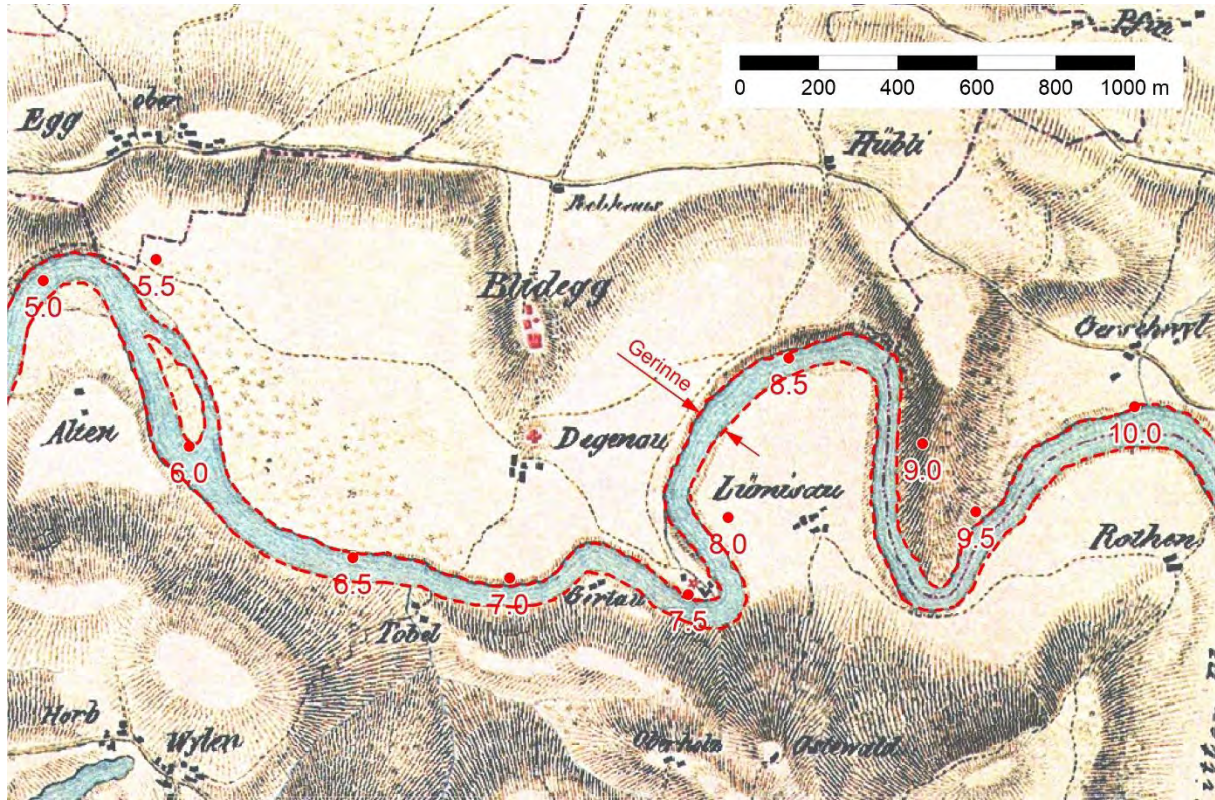


Abb. 46 Sitter Sulzbergkarte 1836 km 5.0 – 10.0, rot-gestrichelte Linie = Gerinnebreite

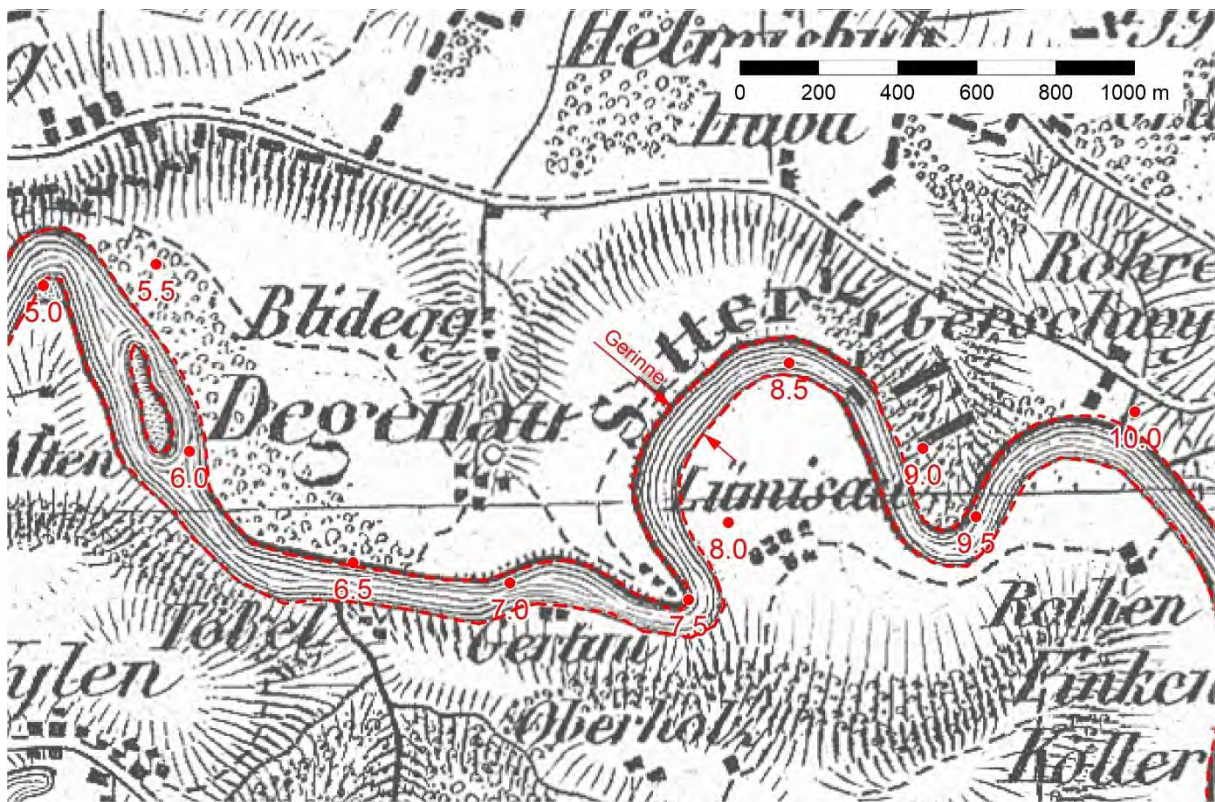


Abb. 47 Sitter Dufourkarte Erstaussgabe 1844 km 5.0 – 10.0, rot-gestrichelte Linie = Gerinnebreite

Anwendungsbeispiele

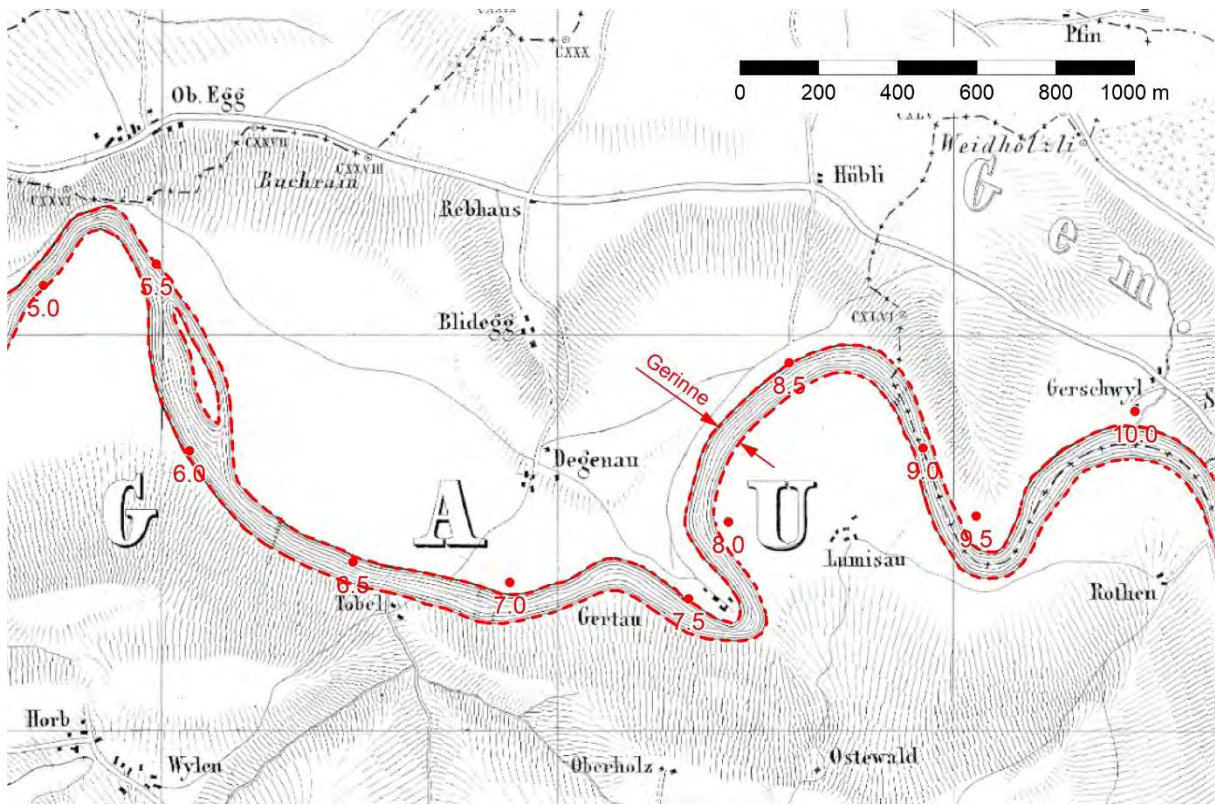


Abb. 48 Sitter Eschmannkarte 1850 km 5.0 – 10.0, rot-gestrichelte Linie = Gerinnebreite

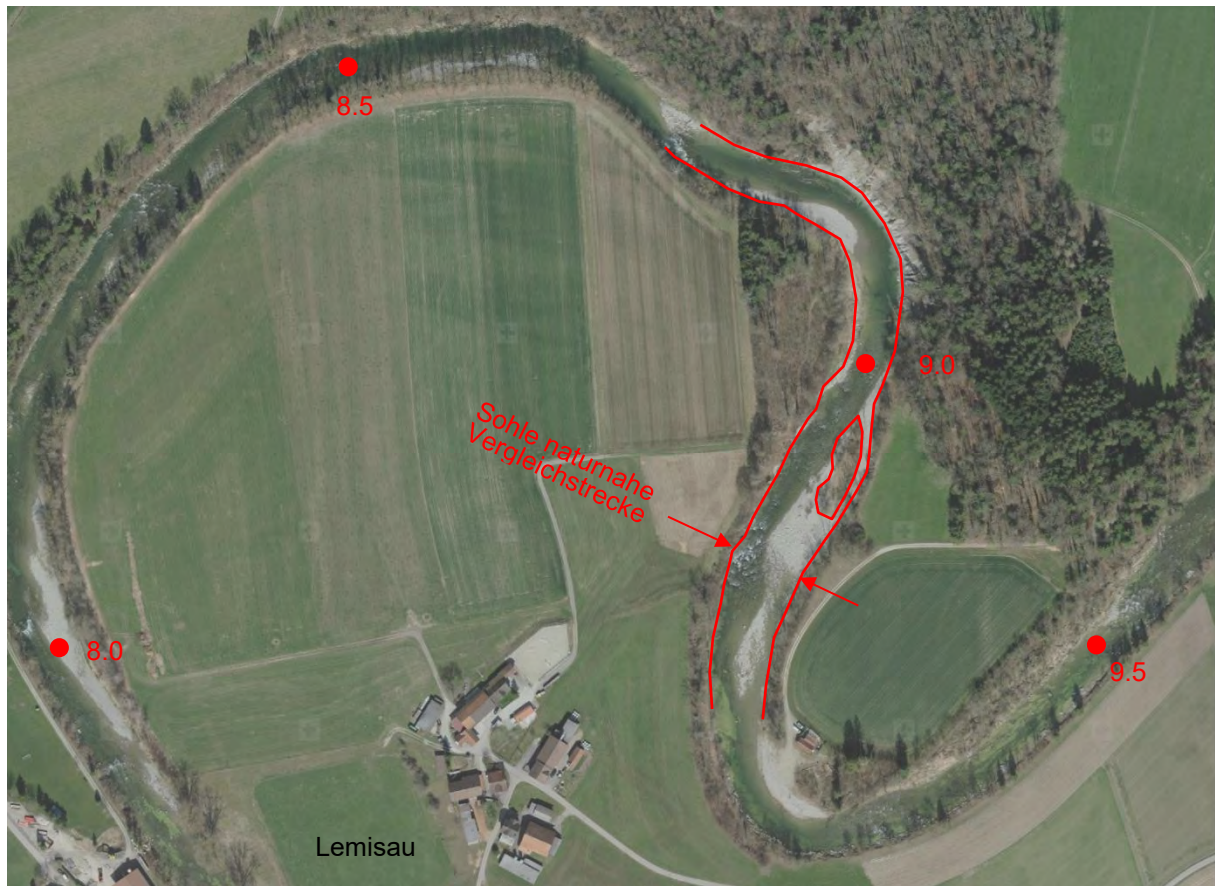


Abb. 49 Naturnahe Vergleichsstrecke (km 8.8 – 9.2)

9 Schlusswort

Die Aussagekraft der ermittelten natürlichen Sohlenbreite ist abhängig von der Qualität der zur Verfügung stehenden Grundlagen. Es lohnt sich deshalb, ausreichend Zeit in die Grundlagenbeschaffung zu investieren.

Bei der Interpretation der Grundlagen und der Gewichtung der verschiedenen Ansätze muss immer berücksichtigt werden, dass diese eine grosse Unschärfe aufweisen. Somit kann eine natürliche Sohlenbreite nicht eindeutig definiert werden und die Wahl der Breite muss als gutachterliche Einschätzung eingestuft werden. Die Dokumentation der Grundlagen und der Zwischenresultate ist darum wichtig, um die Überlegungen des Bearbeiters nachvollziehbar zu machen und die möglichen Bandbreiten aufzuzeigen.

10 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] BAFU (2018): Geschiebehaushalt – Massnahmen, Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer, Bern, V 15 – 08.11.18
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Fahnstock, R.K. (1963): Morphology and hydrology of a glacial stream - White River, Mount Rainer, Washington. U. S. Geological Survey Professional Paper, 422A.
- [9] Griffiths, G.A. (1981): Stable channel design in gravel-bed rivers. Journal of Hydrology, 52, 291-305.
- [10] Henderson, F.M. (1966): Open channel flow. MacMillan Publishing, New York, 522 pp.
- [11] Hey, R.D, Thorne, C.R (1986): Stable Channels with Mobile Gravel Beds. J. Hydraul. Eng., 112(8),671-689
- [12] Ikeda, S. et al. (1988): Stable Width and Depth of Straight Gravel Rivers with Heterogeneous Bed Material. Water Resources Research, 24, 713-722

Quellenverzeichnis

- [13] Meyer-Peter, E., Müller, R. (1948): Formulas for Bed-Load Transport, Second Meeting IAHR, Stockholm, 1948
- [14] 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.
- [15] Millar, R.G. (2005): Theoretical regime equations for mobile gravel-bed rivers with stable banks. *Geomorphology*, 64, 207-220.
- [16] Mosley, M.P. (1983): Response of braided rivers to changing discharge. *Journal of Hydrology*, 22(1), 18-67.
- [17] Paccaud, G. Roulier, Ch. (2016) : Espace nécessaire aux grands cours d'eau de Suisse, Service conseil Zones alluviales, Yverdon, 2016
- [18] Parker, G. (1979): Hydraulic geometry of active gravel rivers. *Journal of the Hydraulics Division*, 105(HY9), 1185-1201.
- [19] Requena, P. (2008): Seitenerosion in kiesführenden Flüssen, Prozessverständnis und quantitative Beschreibung. VAW Mitteilungen Nr. 210, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich, Zürich.
- [20] Rosgen, D.L. (1994): A classification of natural river. *Catena*, 22, 169-199.
- [21] Vischer, D.L. (2003): Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz
- [22] Yalin, M.S. (1992): *River Mechanics*. Pergamon Press, Oxford, 219 pp.
- [23] da Silva, A.M.A.F. (1991): *Alternate bars and related alluvial processes*, Queen's University, Kingston
- [24] 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
- [25] Zeller, J. (1962): Die «Regime-Theorie», eine Methode zur Bemessung stabiler Flussgerinne, *Schweizerische Bauzeitung*, Jahrgang 83, Heft 5, 1965

Anhang

Anhang A Empirische Ansätze

Tab. 1 Vergleich der verschiedenen regimetheoretischen Ansätze

	Herleitung	Gerinneform	Breite	Variablen	Sohlenmaterial	Gefälle	Dimensionsgerecht	Flusssystem	Anwendungserfahrung
Gleichgewichtsbreite	Parker (1979)	gerade	Wasserspiegelbreite	Q, D_{50}	Deckschicht	k.A.	ja	k.A.	k.A.
	Ike da et al. (1988)	gerade	Gerinnebreite	$Q, D_{50}, D_{90}, h_{max}$	Deckschicht	k.A.	nein	k.A.	k.A.
Grenzbreite	Yalin (1992)	gerade	Wasserspiegelbreite	Q, D_{50}	Deckschicht ²	k.A.	nein	k.A.	plausible Werte für Gleichgewichtsbreite
	Fahnestock (1963)	verzweigt	Gerinnebreite eines einzelnen Gerinnearms	k.A.	k.A.	k.A.	nein	k.A.	k.A.
	Henderson (1966)	verzweigt ¹	Wasserspiegelbreite	Q, D_{50}, J	Deckschicht ²	abhängige Variable	nein	Gleichgewicht	mittlere Werte
	Griffiths (1981)	verzweigt ¹	unklar	Q, D_{50}, J	Deckschicht	abhängige Variable	nein	k.A.	grosse Werte
	Bray (1982)	verzweigt ¹	unklar	Q, D_{50}	Deckschicht	0.022 - 1.5 %	ja	k.A.	k.A.
	Mosley (1983)	verzweigt	Wasserspiegelbreite	Q	Gleichung unabhängig von Korndurchmesser	0.6 und 0.42 %	nein	k.A.	grosse Werte
	Hey, Thorne (1986)	verzweigt ¹	Wasserspiegelbreite	Q, Q_v, D_{50} Vegetation	Gleichung unabhängig von Korndurchmesser	k.A.	nein	Gleichgewicht	k.A.
	Ashmore (2001)	verzweigt	Wasserspiegelbreite, Summe der Gerinnebreiten aller Seitenarme	Q, D_{50}, J	Deckschicht ²	1 und 1.5 %	nein	Gleichgewicht	mittlere Werte
	Millar (2005)	mathematische Herleitung	Wasserspiegelbreite	Q, D_{50}, J, μ'	Deckschicht ²	abhängige Variable	ja	Gleichgewicht	kleine Werte

¹Die Regimeformeln sind nicht explizit für verzweigte Gerinne entwickelt worden. Jedoch wurden sie für die Abschätzung der Grenzbreite in Kiesflüssen hergeleitet und daher kann gemäss Marti [14] davon ausgegangen werden, dass verzweigte Gerinne mitberücksichtigt wurden.

²In der Literatur wurde keine Angaben zum Sohlenmaterial gefunden. Diese regimetheoretischen Ansätze stammen jedoch aus dem englischsprachigen Raum und es ist gemäss Marti [14] davon auszugehen, dass es sich um den Korndurchmesser der Deckschicht handelt.