

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
DEPARTEMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN

Renaturierung Saane zwischen dem Schiffenensee und der Mündung in die Aare

Zertifikatsarbeit
CAS Gewässerrenaturierung

von
Pahud Claude
Zertifikatslehrgang 2019/20
Abgabetermin: 31.08.2020
Version 2: 31.10.2020

FachkorrektorIn:

Dr., Döring, Michael ZHAW, Forschungsgruppe Ökohydrologie, Grüentalstrasse 14, Postfach, 8820
Wädenswil



Zitiervorschlag

Pahud, C. (2020). Renaturierung Saane zwischen dem Schiffenensee und der Mündung in die Aare. Zertifikatsarbeit CAS Gewässerrenaturierung. ZHAW, Wädenswil. S. 38.

Adresse Institut

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, Departement Life Sciences und Facility Management, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen UNR, Grüental, 8820 Wädenswil, Schweiz.

Schlagworte

Saane, Schiffenensee, Renaturierung

Zusammenfassung

Natürliche und naturnahe Gewässer weisen eine räumliche und zeitliche Dynamik auf. Diese Dynamik bildet den Grundstein für die Entwicklung autotypischer Habitats und Landschaften. Durch die Verbauung der Saane im 19. Jahrhundert wurde diese Dynamik räumlich stark eingeschränkt. Im 20. Jahrhundert folgte dann der Bau der Wasserkraftanlagen. Durch die Schiffenstaumauer und das Kraftwerk wurde die zeitliche Dynamik durch den Rückhalt von Geschiebe und die Dämpfung von Hochwasser reduziert.

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, welchen Raumbedarf die Saane für die Erfüllung ihrer natürlichen Funktionen hat und wie der Erfüllungsgrad dieser Funktionen durch Aufweitungen trotz Schwall- und Sunkregime verbessert werden kann. Zudem wird die Beurteilungsmethodik für den Gewässerraum von grossen Fließgewässern in der Schweiz untersucht.

Die Resultate zeigen, dass durch den Rückbau der Uferverbauungen der Mobilitätsraum vergrößert werden kann und dadurch der erforderliche Platz für die Erfüllung der aquatischen, amphibischen Funktionen und der terrestrischen Strukturvielfalt erhöht werden. Mit der Beurteilungsmethode werden jedoch weitere wichtige Aspekte wie die Hochwasserdynamik, Geschiebehaushalt, Gewässertemperatur nicht beurteilt. Diese Aspekte bilden nebst der räumlichen Dynamik eine zentrale Rolle für die Erfüllung der natürlichen Funktionen eines Gewässers.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Danksagung	1
Inhaltsverzeichnis	1
1 Einleitung	1
2 Daten und Methoden	2
2.1 Untersuchungsgebiet Saane.....	2
2.2 Grundlagen	2
2.2.1 Geografische Lage.....	2
2.2.2 Hydrologie	3
2.2.3 Morphologie, Geschiebehaushalt	3
2.2.4 Gewässerraum.....	4
2.3 Schutzgebiete	4
2.4 Begriffsdefinitionen	4
2.5 Naturnahe Sohlenbreite	5
2.5.1 Gleichgewichtsbreite.....	5
2.5.2 Historische Karten.....	6
2.5.3 Ökomorphologische Kartierung	7
2.6 Minimale Uferbereichsbreite	7
2.6.1 Schlüsselkurve.....	7
2.6.2 Historische Karten.....	8
2.7 Gerinneform	8
2.8 Raumbedarf nach Service Conseil Zone Alluviales.....	8
2.8.1 Gewässereigenschaften und Räume.....	9
2.8.2 natürliche Funktionen.....	10
2.9 Erfüllungsgrad in vorhandenem Gewässerraum	11
2.10 Erfüllungsgrad der Varianten	12
3 Resultate.....	13
3.1 Naturnahe Sohlenbreite	13
3.1.1 Regimebreite.....	13
3.1.2 Historische Karten.....	14
3.1.3 Ökomorphologische Kartierung	15
3.2 Minimale natürliche Uferbreite	16
3.2.1 Schlüsselkurve.....	16
3.2.2 Historische Karten.....	16
3.3 Gerinneform	16
3.4 Raumbedarf nach SCZA.....	16
3.5 Erfüllung ökologischer Funktionen im IST-Zustand.....	18
3.5.1 Auswertung Gewässerabschnitte	18

3.5.2	Erfüllung natürliche Funktionen	19
3.6	Erfüllung ökologischer Funktionen im Projektzustand	20
3.6.1	V1 – Vergrößerter Gewässerraum innerhalb Dämme	20
3.6.2	V2 – Rückbau der Ufersicherungen auf gesamter Länge	21
3.6.3	V3 – partieller Rückbau der Ufersicherung	22
3.6.4	V4 – partieller Rückbau der Ufersicherung mit optimierter Nutzung	23
4	Diskussion.....	24
4.1	Gewässerraum	24
4.1.1	Natürliche Sohlen- und Uferbereichsbreite	24
4.1.2	Raumbedarf nach SCZA.....	26
4.1.3	Erforderlicher Mobilitätsraum	26
4.1.4	Aktuell vorhandener Gewässerraum	27
4.2	Erfüllungsgrad ökologischer Funktionen im vorhandenen Gewässerraum	27
4.3	Erfüllung ökologischer Funktionen im Projektzustand	29
4.4	Massnahmen im Kontext mit Schwall- und Sunkregime	30
4.5	Erfüllung der Funktionen mit Schwall- und Sunkregime	33
4.6	Fazit	33
4.7	Ausblick.....	34
5	Literaturverzeichnis.....	35
	Anhangsverzeichnis	38

1 Einleitung

Die Saane fliesst zwischen dem Schiffenensee und der Mündung in die Aare auf einer Strecke von ca. 14 km in einem begradigten Gerinne. Unterhalb Schiffenensees wurde die Saane eingetieft und ab Laupen wurden die Ufer ab dem 19. Jahrhundert sukzessive verbaut und beidseitig ein Hochwasserschutzdamm erstellt (Dufourkarte 1860, Siegfried 1880, 1900). Durch diese Massnahmen wurde die Saane von den Auen getrennt und gleichzeitig wurden die Auen trockengelegt. Im 20. Jahrhundert wurden die beiden verbliebenen Auen Laupenau und Niederried-Oltigenmatt in den Bundesinventar der Auengebiete von nationaler Bedeutung aufgenommen. Durch das obenliegende Kraftwerk Schiffenen wird das Abflussregime des Gewässerabschnittes und der Geschiebehalt stark beeinflusst. Das Niederwasser unterliegt dem Schwall- und Sunkregime und die Hochwasserspitzen werden durch die Retention gedämpft (Hunzinger et al. 2014). Der Geschiebetransport ist durch die Staumauer gänzlich unterbrochen (GEKOB, 2014). Aus diesen Gründen fehlt dem Gewässerabschnitt der Saane die räumliche als auch zeitliche Dynamik, welche die charakteristische Eigenschaft naturnaher Gewässer und Auen sind (Fink et al. 2017). Die Dynamik eines Gewässers manifestiert sich in räumlichen Veränderungen der Fließstrukturen wie Kiesbänke, Kolke über die Zeit. Diese Umlagerung der Gewässersohle führt zu einer laufenden Neubildung und Zerstörung von Lebensräumen, welche für viele Lebenswesen unabdingbar sind. Bei fehlender Dynamik wird die laterale, longitudinale sowie die vertikale Vernetzung vermindert (Allan et al. 2007). Die Kantone Bern und Freiburg haben in ihren strategischen Planungen (GEKOB, 2014 und DAEC, 2014) den Handlungsbedarf erkannt und verschiedene Massnahmen vorgesehen.

Ein ausreichender Gewässerraum ist die Grundlage für die räumliche Dynamik. In der Gewässerschutzverordnung GSchV ist für Fließgewässer mit einer Gerinnesohle grösser als 15 m der minimal erforderliche Gewässerraum nicht explizit vorgegeben (Art. 41 a GSchV). Die Schweizerische Bau-, Planungs- und Umweltdirektorenkonferenz (BPUK et al., 2019) gibt vor, dass der erforderliche Gewässerraum bei diesen Gewässern mit der Methode von Paccaud et al. (2016) zu ermitteln ist. Diese Methode untersucht sieben verschiedene natürliche Funktionen von Fließgewässern. Der Erfüllungsgrad der einzelnen Funktionen wird anhand der vorhandenen Platzverhältnisse für diese Funktion und der morphologischen Eigenschaften beurteilt. Mit der Methode kann der Erfüllungsgrad eines bestehenden Gewässerraumes beurteilt und der erforderliche Gewässerraum eines Gewässers bestimmt werden.

Diese Zertifikatsarbeit hat zum Ziel die Auswirkungen von Aufweitungen auf die Erfüllung der natürlichen Funktionen des Gewässers zu untersuchen. Die Beurteilung der natürlichen Funktionen im IST-Zustand und mit den Aufweitungen basiert auf der Methode nach Paccaud et al. (2016).

In der Arbeit werden folgende Hypothesen untersucht:

- Der Rückbau der Uferverbauungen verbessert durch die mögliche Verbreiterung des Gerinnes die natürlichen Funktionen des Gewässers.
- Der Umfang der Aufweitungen und die Art der sich einstellenden Gerinneform werden unter dem Aspekt von Fischfallen (Schwall-Sunkregime) beurteilt.

Den Projektideen liegen die Annahmen zugrunde, dass der Schwall-Sunkbetrieb weiterhin besteht und Geschiebehalt noch nicht saniert ist. Restriktionen durch Brücken und Siedlungen werden berücksichtigt, Einschränkungen durch Werkleitungen und Grundwassernutzungen jedoch nicht.

2 Daten und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet Saane

In der vorliegenden Arbeit wird der Gewässerabschnitt der Saane zwischen dem Schiffenensee und der Mündung in die Aare untersucht. Der Gewässerabschnitt erstreckt sich über eine Länge von 14.1 km. Der Schiffenensee wird durch die Staumauer Schiffenen gebildet und der Abfluss der Saane wird turbiniert. In Laupen liegt die Mündung der Sense.



Abbildung 1 Übersichtsplan (1:100'000) swisstopo.

2.2 Grundlagen

2.2.1 Geografische Lage

Die Saane entspringt im Gebiet Sanetschhorn auf einer Höhe 2'500 m ü. M. und mündet nach 126 km bei Mühleberg auf einer Höhe von 462 m in die Aare. Sie entwässert ein Einzugsgebiet von 1'893 km². Die Saane weist auf ihrer Fließstrecke 6 Staueen auf. Im Einzugsgebiet der Saane liegen zwei weitere Staueen. Unterhalb der letzten Staustufe dem Schiffenensee mündet in Laupen der grösste seitliche Zufluss Sense in die Saane. Die Sense weist keine Staustufe auf.

2.2.2 Hydrologie

Das Abflussregime der Saane ist im Betrachtungsperimeter durch die obenliegenden Stauseen und den Zufluss der Sense beeinflusst. Gemäss Hunzinger (2014) werden vor allem die Niederwasserabflüsse und kleineren Hochwasser (< HQ₂₀) durch die Stauseen gedämpft. Die charakteristischen Hochwasser werden im grossen Einzugsgebiet insbesondere durch die Schneeschmelze und lang andauernde Niederschlagsereignisse ausgelöst. Die Hochwasserspitzen werden gemäss Hunzinger (2014) durch die Retention im Schifflensee gedämpft. Bei grösseren Hochwasserereignissen ist der Einfluss der Speicher gering. In der Tabelle 1 sind die Hochwasserwahrscheinlichkeiten gemäss der Messstelle in Laupen abgebildet.

Tabelle 1: Hochwasserwahrscheinlichkeiten (Jahreshochwasser) Saane Laupen, EDV 2215 BAFU (2019)

	Abfluss [m ³ /s]	Vertrauensintervall [m ³ /s]
HQ ₂	342	303-381
HQ ₅	480	414-549
HQ ₁₀	592	485-699
HQ ₃₀	784	557-1'011
HQ ₁₀₀	1'032	572-1'492
HQ ₃₀₀	1'303	509-2'097

Die Konzession des Wasserkraftwerks Schifflensee definiert die Dottierwassermenge auf 5 m³/s bei einem Q₃₄₇ von 16.3 m³/s. Gemäss Kummer et. al (2007) wurde die Bewilligung nach Inkrafttreten des Gewässerschutzgesetzes GSchG mit einem Restwasser nach Art. 31 ff GSchG erteilt.

2.2.3 Morphologie, Geschiebehaushalt

Kornverteilung

Im Rahmen der Studie über den Geschiebehaushalt der Sense und Saane (Hunzinger, 2014) wurde die Kornverteilung der Saane anhand von Linienproben bestimmt und analysiert. Für die vorliegende Arbeit werden die charakteristischen Korngrössen bei km 122 gemäss der Tabelle 2 aus dieser Geschiebestudie verwendet. Die mittleren Korndurchmesser der Deckschicht liegen zwischen 4.5 und 5 cm. Das Laufende Geschiebe weist mittlere Korndurchmesser von 3 bis 3.5 cm grösse auf.

Tabelle 2 Charakteristische Korndurchmesser Hunzinger (2014)

Gewäss Km	Sohle (Deckschicht)		Geschiebe	
	d_m [cm]	d₉₀ [cm]	d_m [cm]	d₉₀ [cm]
Km 122	5.0	11.5	3.5	8.3
Km 128	4.5	10.0	3.0	7.3

Geschiebeaufkommen Saane

Der Geschiebetransport der Saane ist im Zulauf des Betrachtungsperimeters durch den Schifflensee vollständig unterbunden. Die Sense weist keine Staustufen auf. Das Geschiebe wird nach Hunzinger (2014) beinahe ablagerungsfrei in die Saane transportiert. Der Eintrag an Geschiebe beträgt ca. 8'000 m³/a.

2.2.4 Gewässerraum

Der Gewässerraum ist in den umliegenden Gemeinden meist mit einem Bauabstand von der Mittelwasserlinie festgelegt (siehe Kap. 0: Bau- und Zonenreglemente). Falls nicht weiter definiert (Kriechenwil und Kleinbösing) wird der Uferraum mit 15 m angenommen. Der ausgeschiedene Gewässerraum ist in der Tabelle 3 dargestellt. Grün markiert sind die Gewässerabschnitte, welche in Schutzgebieten liegen oder an solche angrenzen. Bei der Mündung in die Aare (Gewäss. Adr. 0 m) ist der Gewässerraum weit grösser als 60 m und erstreckt sich über beinahe das gesamte Delta.

Tabelle 3 Gewässerraum im Betrachtungsperimeter (grün markiert sind Abschnitte in Schutzgebieten)

Gewäss. Adr. [m] (von – bis)	Linkes Ufer		Rechtes Ufer		Gewässerraum [m]	Bemerkung
	Gemeinde	Bauabstand [m]	Gemeinde	Bauabstand [m]		
0-397	Golaten	> 60	Mühleberg	60	> 400	
397-763	Wileroltigen	> 60	Mühleberg	> 60	> 400	
763-2'922	Wileroltigen	15	Mühleberg	15	75-80	
2'922-4'375	Ferenbalm	ca. 40	Mühleberg	15	102-130	
4'375-4'986	Ferenbalm	ca. 70	Mühleberg	15	140	
4'986-5'330	Ferenbalm	ca. 18	Mühleberg	15	100	
5'330-6'282	Ferenbalm	66-136	Mühleberg	15	130-180	
6'282-6'796	Ferenbalm	ca. 65	Mühleberg	> 15	138-230	rechtes Ufer: GWR inkl.
6'796-8'248	Laupen	ca. 65	Mühleberg	> 15	138-230	NSG angenommen
8'248-8'884	Laupen	ca. 65	Laupen	ca. 40	ca. 140	
8'884-10'086	Laupen	30	Laupen	15	92	
10'086-11'369	Kriechenwil	15	Bösing	ca. 55	95	
11'369-14'272	Kleinbösing	15	Bösing	ca. 90	ca. 130	

2.3 Schutzgebiete

Das Schutzgebiet bei der Mündung der Saane in die Aare ist eine Auengebiete von nationaler Bedeutung. Entlang des rechten Ufers befindet sich unterhalb von Rülpisried die Laupenau. Unterhalb des Schifflensees gibt es zwei Naturschutzgebiete der pro Natura. Die grösse der Schutzgebiete sind in folgender Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 4 Schutzgebiete im Betrachtungsperimeter BAFU (2017), Pro Natura (2017)

Gebietsname	Art	Objekt-Nr.	Fläche [ha]	Gewäss. Adr. (von - bis)	Gewässer
Niederried- Oltigenmatt	Bundesinventar der Auengebiete von nationaler Bedeutung	53	171.5	0 - 766	Aare, Saane
Laupenau	Bundesinventar der Auengebiete von nationaler Bedeutung	59	29.2	6'282 - 8'247	Saane
Laupenau-Saaneau	Pro Natura Naturschutzgebiet	95	div.	div.	Saane, Teiche
Auried	Pro Natura Naturschutzgebiet	394	15.2	11'369 - 11'812	Saane

2.4 Begriffsdefinitionen

Natürliche Gerinnesohlenbreite

Die natürliche Gerinnesohlenbreite ist gemäss BPUK et. al. (2019) die Sohlenbreite des natürlichen Fliessgewässers beim bettbildenden Abfluss (mittlere Hochwasser mit einer Wiederkehrperiode von zwei bis fünf Jahren). Die Gewässersohle ist frei von höheren Wasser- und Landpflanzen.

Naturnahes Gewässer

Naturnahe Gewässer sind natürliche Gewässer, welche anthropogen beeinflusst sind aber aufgrund ihrer räumlichen und zeitlichen Dynamik eine angepasste und artenreiche Tier- und Pflanzenwelt ermöglichen (Zeh et. al. 2009).

Minimale Gewässerraumbreite

Die in Art. 41a der Gewässerschutzverordnung (GSchV) vorgegebene Breite des Gewässerraumes definiert die Mindestanforderungen. Sofern keine Voraussetzungen für Ausnahme und Anpassungsmöglichkeiten gegeben sind, müssen diese Mindestbreiten eingehalten werden.

Erhöhter Gewässerraum

Sofern Flussabschnitte innerhalb von gewissen Objekten des natur- und Landschaftsschutzes liegen, ist der Gewässerraum zu erhöhen (Art. 41a GSchV). Der erhöhte Gewässerraum soll dem Erhalt von wertvollen Arten und als Artenhotspot dienen (BPUK et. al. 2019).

Regimebreite

Die Regimebreite ist jene Breite des Flussbettes, welche sich einstellt, wenn sich das Gewässer frei verbreitern kann. Der durch die Regimebreite definierte Flussschlauch ist frei von Bewuchs und dient dem Abfluss und dem Geschiebetransport. Weist das Gewässer keine Uferverbauungen gegen Seitenerosion auf, so kann sich dieser Flussschlauch verlagern, wobei jedoch die Breite gleichbleibt. Die Regimebreite ist abhängig von der Morphologie und Hydrologie und kann sich daher über die Zeit verändern (Raquena, 2008).

Gleichgewichtsbreite und Grenzbreite

Die natürliche Gerinnebildung wurde durch Anderson et al. (1975) mit der primären und der sekundären Ufererosion beschrieben. Bei der primären Ufererosion weitet sich der Fluss auf seiner gesamten Länge soweit auf, bis die Gleichgewichtsbreite erreicht ist. In diesem Gleichgewicht ist das Gerinne immer noch gestreckt und weist eine ebene Sohle auf. In Abhängigkeit der hydraulischen Bedingungen setzt die sekundäre Ufererosion ein. Mit dieser Erosion verändert sich die Linienführung des Gerinnes und es bilden sich Mäander, verzweigte Gerinne sowie deren Mischformen. Die Gleichgewichtsbreite b_{gr} nach der sekundären Ufererosion bezeichnet Requena (2008) auch als Grenzbreite. Dies weil sich ein Fluss nicht über diese Breite hinaus vergrößern kann.

2.5 Naturnahe Sohlenbreite

Die naturnahe Sohlenbreite der Saane wird mittels verschiedener empirischer Ansätze für die Regimebreite, der Auswertung historischer Karten als auch mittels der ökomorphologischen Kartierung hergeleitet.

2.5.1 Gleichgewichtsbreite

Die **Gleichgewichtsbreite** b_{gg} nach der primären Ufererosion wurden durch Yalin (1991) und Parker (1979) beschreiben.

$$\text{Yalin (1992)} \quad b_{gg} = 1.5 \times \frac{Q^{0.5}}{d_{mS}^{0.25}}$$

$$\text{Parker (1979)} \quad b_{gg} = 4.4 \times \frac{Q^{0.5}}{\sqrt{(s-1) \cdot g \cdot d_{50D}}}$$

mit:

- d_{mS} massgebender Korndurchmesser des Sohlenmaterials
- d_{50D} charakteristischer Korndurchmesser der Deckschicht, 50 Gewichtsprozent der Körner sind feiner
- g Erdbeschleunigung
- Q Abfluss
- s relative Feststoffdichte

Die Gleichgewichtsbreite nach der sekundären Ufererosion werden durch empirische Ansätze meist durch die Wasserspiegelbreite $b_{w,gr}$ beschrieben. Diese **Grenzbreite** wurde unter anderem durch Ashmore (2001), Henderson (1966), Griffiths (1981), Millar (2005) und Mosley (1983) untersucht.

Ashmore (2001) $b_{w,gr} = 0.0098 \cdot (\rho \cdot g \cdot Q \cdot J)^{0.777} \cdot d_{50}^{-0.7}$

Griffiths (1981) $b_{w,gr} = 5.28 \cdot Q \cdot J^{1.26} \cdot d_{50D}^{-1.5}$

Henderson (1966) $b_{w,gr} = 2.07 \cdot Q \cdot J^{1.162} \cdot d_{50D}^{-1.5}$

Millar (2005) $b_{w,gr} = 16.5 \cdot \left(\frac{Q}{\sqrt{(s-1) \cdot g \cdot d_{50D} \cdot d_{50D}^2}} \right)^{0.7} \cdot J^{0.6} \cdot \mu'^{-1.1} \cdot d_{90}$

Mosley (1983) $b_{w,gr} = 18.4 \cdot Q^{0.57}$

mit:

- J Sohlengefälle
- d_x charakteristischer Korndurchmesser des Sohlenmaterials, x Gewichtsprozent der Körner sind feiner
- $\mu' = 1 - 1.2$ Beschreibt den Erosionswiderstand des Böschungsmaterials und der Vegetation im Vergleich zum Sohlenmaterial.

Ein weiterer Ansatz zur Bestimmung der Gleichgewichtsbreite nach der sekundären Ufererosion orientiert sich an der **Schleppspannungstheorie**. Die Gleichgewichtsbreite ist demnach erreicht, wenn die Schleppspannung beim bettbildenden Abfluss (HQ₂-HQ₅) unter der Grenzsleppspannung für das Aufreißen der Deckschicht θ_{crD} an den Böschungen liegt.

Günter (1971) $\theta_{cr,D} = \theta_{cr} \cdot \left(\frac{d_{mD}}{d_m} \right)^{2/3}$

falls $\theta = \theta_{crD}$ gilt: $\frac{h_D \cdot J}{(s-1) \cdot d_m} = \theta_{cr} \cdot \left(\frac{d_{mD}}{d_m} \right)^{2/3}$

mit:

- θ dimensionslose Schubspannung
- θ_{cr} kritische dimensionslose Schubspannung beim Trapsportbeginn
- h_D Grenzabflusstiefe beim Aufreißen der Deckschicht

Für das Trapezprofil wird die Schleppspannung an den Ufern aus der Schleppspannung an der Sohle mit $\theta_{Ufer} = 0.77 \cdot \theta$ berechnet. Diese Betrachtung am Trapezprofil bildet die primäre Ufererosion ab und vernachlässigt damit die Sekundärströmungen. Damit unterschätzt diese Betrachtung die Schleppspannung an den Ufern und in Natura ist daher tendenziell eine grössere Regimebreite zu erwarten.

2.5.2 Historische Karten

Die naturnahe Sohlenbreite kann auch anhand historischer Karten abgeschätzt werden. Hierfür wird aus den Karten von Dufour (1860), die Siegfriedkarte (1880 und 1900) und die Landeskarten die Sohlenbreite

gemessen. Die Vergleichbarkeit des dargestellten Zustandes des Gewässers mit dem natürlichen bzw. dem naturnahen Zustand wird anhand der erkennbaren Verbauungen abgeschätzt.

2.5.3 Ökomorphologische Kartierung

Die ökomorphologische Kartierung des Kantons Bern zeigt den Natürlichkeitsgrad der Fliessgewässer auf. Das BAFU schlägt in der Wegleitung «Hochwasserschutz an Fliessgewässern» (BWG, 2001) basierend auf dem Art. 41a der GSchV eine Raumbedarfsberechnung der Gewässer vor. In diesem Dokument werden Multiplikatoren für die Abschätzung der natürlichen Gerinnesohlenbreite in Abhängigkeit der gemessenen Sohlenbreite und der vorhandenen Breitenvariabilität (beurteilt in der ökomorphologischen Kartierung) angegeben.

eingeschränkte Breitenvariabilität	nat. Sohlenbreite = gemessene Sohlenbreite x 1.5
fehlende Breitenvariabilität	nat. Sohlenbreite = gemessene Sohlenbreite x 2.0

2.6 Minimale Uferbereichsbreite

Die minimale Uferbereichsbreite der Saane wird mittels der Schlüsselkurve und der Auswertung historischer Karten hergeleitet.

2.6.1 Schlüsselkurve

Die Schlüsselkurve dient der Ermittlung des Raumbedarfs bei Fliessgewässern (BWG, 2001). Sie legt den erforderlichen Gewässerraum in Abhängigkeit der natürlichen Gerinnesohlenbreite fest. Dabei wird unterschieden zwischen der Erfüllung der Funktion des Gewässerraumes für den Hochwasserschutz sowie für die ökologischen Funktionen (Raumbedarf Minimal) und der Förderung der Biodiversität (Biodiversitätskurve). Diese Schlüsselkurve ist in Abbildung 2 dargestellt.

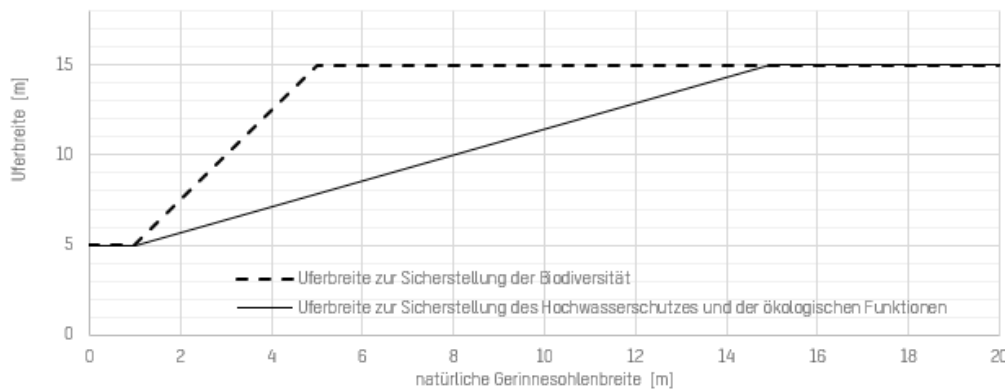


Abbildung 2 Schlüsselkurve, Grundlage BWG (2001)

Im Artikel 41a GSchV wird der Gewässerraum gemäss dieser Schlüsselkurve festgelegt. Die Gewässerraumbreite GRB bei Fliessgewässern in Schutzgebieten (Biodiversitätskurve) wird bei Gewässern mit einer natürlichen Gerinnesohlenbreite (nGSB) von mehr als 15 m wie folgt festgelegt: $GRB = nGSB + 30$ Meter. Die Gewässerraumbreite GRB bei Fliessgewässern ausserhalb von Gebieten mit Schutzbestimmungen und einer natürlichen Gerinnesohlenbreite von mehr als 15 m ist der Raumbedarf gemäss der «modularen Arbeitshilfe zur Festlegung und Nutzung des Gewässerraumes in der Schweiz» BPUK et al. (2019) im Einzelfall zu prüfen. An dieser Stelle wird für diese Gewässer die Anwendung der Methode «Espace

nécessaire aux grands cours d'eau de Suisse» Paccaud et al. (2016) empfohlen. Diese Methode wird in Kapitel 2.8 beschrieben.

2.6.2 Historische Karten

Wie die naturnahe Sohlenbreite kann auch die Uferbreite anhand historischer Karten abgeschätzt werden. Wiederum werden die Karten von Dufour (1860), die Siegfriedkarte (1880 und 1900) und die aktuellen Landeskarten (2018) die Uferbreite (Alluvionen) ausgewertet.

2.7 Gerinneform

Die Gerinneform wird anhand der Abgrenzungskriterien von Ahmari und Da Silva (2011) beurteilt. Hierfür werden folgende dimensionslosen Grössen berechnet und im Diagramm mit den Abgrenzungskriterien dargestellt.

$$Y = b/h \quad \text{und} \quad Z = h/d_m$$

Mit:

b Breite des Flussbettes

h Abflusstiefe

2.8 Raumbedarf nach Service Conseil Zone Alluviales

Für Fließgewässer mit einer natürlichen Sohlenbreite grösser als 15 m wird gemäss BPUK et al. (2019) die Methode nach Paccaud et al. (2016) empfohlen. Zur vereinfachten Anwendung wurde diese Methode im Auftrag des BAFU durch den Service Conseil Zones alluviales (SCZA) in einem Onlinetool Paccaud et. al. (2016) implementiert.

Die Methode beurteilt den Erfüllungsgrad verschiedener natürlichen Funktionen des Gewässers in Abhängigkeit des dem Gewässer zur Verfügung stehenden Raumes und gewichtet die Funktionen in Abhängigkeit der Gerinneform. In der Abbildung 3 sind die Räume und Funktionen dargestellt und werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

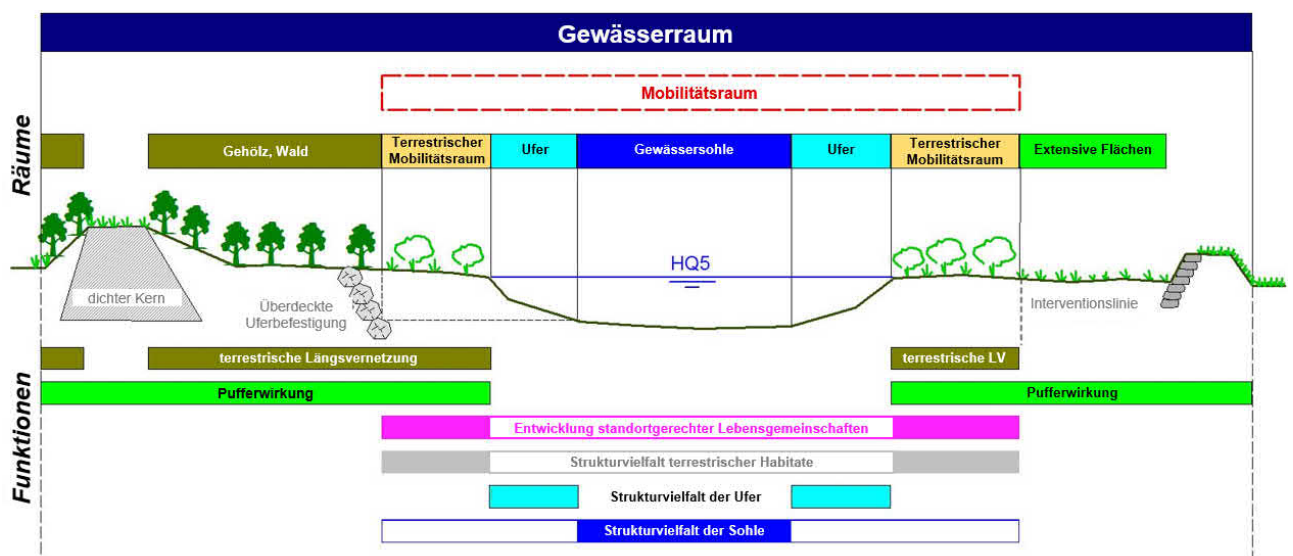


Abbildung 3 Schematischer Gewässerquerschnitt mit dem Gewässerraum den einzelnen Räumen und den Funktionen, Paccaud et al. (2016), Übersetzung Pahud.

2.8.1 Gewässereigenschaften und Räume

Gerinneform

Folgende Gerinneformen werden mit der Methode unterschieden: Verzweigte Gerinne, schwach gewundene Gerinne, stark gewundene Gerinne, gerade Gerinne und eingetiefte Gerinne. Die letzten beiden Formen werden als gestrecktes Gerinne zusammengefasst. Die Gerinneform wird mittels Auswertung historischer Daten und nach den Abgrenzungskriterien von Ahmari und Da Silva (2011) bestimmt.

Wasserspiegelbreite beim bettbildenden Abfluss

Zur Bestimmung der Wasserspiegelbreite beim bettbildenden Abfluss $b_{w,gr}$ (gem. Paccaud et al. 2016) als L_{pb} bezeichnet) empfiehlt Paccaud et al. (2016) zum einen die Auswertung historischer Daten und zum anderen zwei rechnerische Ansätze. Die Wasserspiegelbreite $b_{w,gr}$ entspricht der im Kapitel 2.5.1 beschriebenen Grenzbreite.

Mit dem ersten rechnerischen Ansatz wird die Manning-Strickler-Formel auf ein trapezförmiges Profil angewendet, wobei die Parameter wie folgt bestimmt werden.

$$L_{pb} = \left(K \cdot J^{0.5} \cdot Q^{-1} \cdot \left(1 - \frac{2}{r \cdot m} + \frac{2}{r} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{m^2}} \right)^{-2/3} \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r^2 \cdot m} \right)^{5/3} \right)^{-3/8}$$

mit:

Q bettbildender Abfluss (HQ₂-HQ₅) [m^3/s]

K Rauigkeitskoeffizient nach Strickler [$m^{1/3}/s$] Tabellenwerte nach Degoutte (2007)

J Energiegefälle [m/m] (bei Normalabfluss = Sohlenfälle)

m Neigung der Ufer [m/m] Mittelwert für Beide Ufer: gem. Paccaud et al. (2016) meist 1:3

r Verhältnis Breite/Tiefe [m/m] Abschätzung anhand der Gerinneform nach Rosgen (1994)

Bei verzweigten Gerinnen sind in der Formel die Parameter Q durch Q/n und r durch r/n zu ersetzen und die erhaltene Wasserspiegelbreite mit n zu multiplizieren. Damit wird die Wasserspiegelbreite der n Gerinne zuerst einzeln berechnet und dann auf das Fließgewässer hochgerechnet.

Als zweiter Ansatz wird die Berechnung nach Yalin (1992) empfohlen.

Natürliche Gerinnesohlenbreite

Die Bestimmung der natürlichen Gerinnesohlenbreite b (gem. Paccaud et al. (2016) als L_{fl} bezeichnet) empfiehlt Paccaud et al. (2016) dieselben Methoden wie für die Wasserspiegelbreiten, wobei die rechnerischen Ansätze wie folgt ergänzt werden:

Ansatz 1: $L_{fl} = L_{pb} \cdot \left(1 - \frac{2}{r \cdot m} \right)$

Ansatz 2: $L_{fl} = b_{gg} - L_b$

mit:

L_b Uferbreite wobei $L_b = 6 \cdot h_{2-5}$ und $h = L_{pb}/r$

h_{2-5} Abflusstiefe beim bettbildenden Abfluss

Uferbreite

Die Ufer sind jene Bereiche, welche frei von langjähriger Vegetation sind. Diese Flächen werden beim bettbildenden Abfluss überflutet. Gemäss obigen Formeln kann die Uferbreite als Differenz zwischen der Wasserspiegelbreite beim bettbildenden Abfluss und der Gerinnesohlenbreite verstanden werden.

Mobilitätsraum

Der Mobilitätsraum ist jener Raum, in welchem sich ein Gewässer frei bewegen kann. Er kann durch Ufersicherungen, Felswände oder Interventionslinien begrenzt sein.

Terrestrischer Mobilitätsraum

Der terrestrische Mobilitätsraum liegt im Mobilitätsraum wird aber nicht alle paar Jahre überflutet. Dieser Raum kann durch grössere Hochwasser umgestaltet werden und bietet spezifischen Lebendgemeinschaften durch diese Dynamik den geeigneten Lebensraum. Dieser Raum ist dann vorhanden, wenn der Mobilitätsraum grösser als die Wasserspiegelbreite beim bettbildenden Abfluss L_{pb} ist.

Gehölz, Wald

Bestockte Flächen und Wald können innerhalb und ausserhalb des Mobilitätsraumes liegen.

Extensive Flächen

Innerhalb des Gewässerraumes können extensiv genutzte Flächen liegen.

2.8.2 natürliche Funktionen

Die Methode nach Paccaud et al. (2016) basiert auf der Multikriterienanalyse, welche von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) entwickelt wurde. Diese Methode ermöglicht es verschiedene Indikatoren miteinander zu vergleichen und zu gewichten. In der vorliegenden Anwendung werden sieben natürlichen Funktionen des Gewässerraumes beurteilt, wobei der Erfüllungsgrad von 0% (Funktion nicht vorhanden) bis 100% natürliche Funktion vollständig erfüllt) reichen kann. Die unterschiedlichen Bereiche (Räume) im Gewässerraum werden den verschiedenen Funktionen zugeteilt (Anhang D). Die Funktionen wiederum können wie in der Tabelle 5 auf die drei Milieus aquatisch, amphibisch und terrestrisch aufgeteilt werden.

Tabelle 5 Natürliche Funktionen nach Paccaud et al. (2016)

Milieu	Funktionen	Relevanter Raum
aquatisch	Abfluss und Sedimenttransport, Strukturvielfalt der Sohle, aquatische vertikale und longitudinale Vernetzung	Mobilitätsbreite
amphibisch	Strukturvielfalt der Ufer	Uferbreite
	laterale und vertikale Vernetzung	(Mobilitätsbreite)
terrestrisch	Längsvernetzung terrestrischer Habitate	Breite des Vorlandes (pro Seite)
	Pufferwirkung	Breite der Pufferzone (pro Seite)
	Strukturvielfalt der terrestrischen Habitate	Mobilitätsbreite
	Überflutungsdynamik	Überflutbarer Bereich
	Entwicklung standortgerechter Lebensgemeinschaften	Mobilitätsbreite

Nach der Bewertung der einzelnen Funktionen wird die Bewertung über den gesamten Abflussquerschnitt vorgenommen. Die Funktionen werden dabei in Abhängigkeit der Gerinneform gewichtet. Damit wird den verschiedenen natürlichen Habitaten der unterschiedlichen Gerinneformen (Morphologie, Dynamik) Rechnung

getragen. In der Tabelle 6 sind die gemäss Paccaud et al. (2016) empfohlenen Gewichtungen in Abhängigkeit von den Gerinneformen aufgelistet. Diese Gewichtungen werden für diese Arbeit nicht verändert.

Tabelle 6 Gewichtung der natürlichen Funktionen

	Verzweigte Gerinne	Migrierende Mäander	Entwickelte Mäander	gerade Gerinne und eingetieftete Gerinne
Aquatisch (Strukturvielfalt der Sohle)	20	20	20	40
Amphibisch (Strukturvielfalt der Ufer)	10	10	10	20
Terrestrisch	70	70	70	40
<i>Längsvernetzung terrestrischer Habitate</i>	10	10	10	20
<i>Pufferwirkung</i>	10	10	10	20
<i>Strukturvielfalt der terrestrischen Habitate</i>	25	25	20	0
<i>Überflutungsdynamik</i>	0	0	10	0
<i>Entwicklung standortgerechter Lebensgemeinschaften</i>	25	25	20	0

2.9 Erfüllungsgrad in vorhandenem Gewässerraum

Die Erfüllung der Gewässerfunktionen im aktuellen Zustand wird anhand des Onlinetools (Paccaud et al. 2016) beurteilt. Dazu sind die Räume gemäss Kapitel 2.8.2 zu erfassen. Hierbei wird wie folgt vorgegangen:

a) Einteilung in homogene Abschnitte

Die Saane weist im Betrachtungsperimeter verschiedenartige Gewässerräume, Schutzgebiete und Restriktionen (Uferverbauungen, Gerinneform angrenzenden Nutzungen) auf. Um diese zu berücksichtigen wird die Saane im Betrachtungsperimeter in 18 gleichartige Abschnitte unterteilt. Die Abschnittsunterteilung ist im Anhang E dargestellt.

b) Flächige Beurteilung der vorhandenen Nutzungen

Zur Kartierung und Beurteilung der vorhandenen Nutzung wird die vereinfachte Amtliche Vermessung des Kantons Bern mit den Bodenbedeckungen (AGI, 2017) als Grundlage verwendet. Die effektiven Nutzungen werden vor Ort und unter Beizug der Orthofotos beurteilt und angepasst. Die Auswertung wird mit ArcGIS vorgenommen. Weiter werden die erfassten Flächentypen den Räumen gemäss Abbildung 3 zugewiesen.

c) Auswertung der Flächen je Abschnitt – Umrechnung in repräsentatives Querprofil

Damit die ökologischen Funktionen für jeden Abschnitt ausgewertet werden können, wird für jeden Abschnitt ein repräsentatives Querprofil berechnet. Dazu werden die Flächen jedes Abschnittes aufgeteilt nach Gewässer und den beiden Ufern über die Abschnittslänge auf ein Querprofil zurückgerechnet. Für die Auswertung des IST-Zustandes wurden die Flächen im heute gültigen Gewässerraum (gemäss Kapitel 2.2.4) ausgewertet. Diese Berechnung wird mit Excel ausgeführt.

d) Auswertung

Anstelle der Auswertung mit dem Onlinetool wurde die Beurteilung der natürlichen Funktionen anhand der Schlüsselkurven für natürliche Gewässerfunktionen an der Saane (Anhang F) in einem Excelsheet vorgenommen. Die Funktionen wurden anschliessend nach mit den Faktoren in Tabelle 6 gewichtet.

2.10 Erfüllungsgrad der Varianten

Zur Ermittlung der Auswirkung des Rückbaus von Ufersicherungen auf die Funktionen des Gewässers werden die Gewässerfunktionen verschiedener Varianten beurteilt.

Das Vorgehen umfasst folgende Schritte:

a) Festlegung der Gewässerraubbreite

Der Gewässerraum wird bei allen Varianten auf die Breite zwischen den äusseren Dammfüssen festgelegt. Wenn sich das Gewässer am Talrand befindet, endet der Gewässerraum am Fuss der Felswand/Böschung. Sofern der vorhandene Gewässerraum bereits grösser ist, wird dieser beibehalten.

b) Ufersicherung

Der Rückbau der Ufersicherungen entspricht nach Paccaud et al. (2016) der Vergrösserung der Mobilitätsbreite. Da sich das Gewässer durch den Rückbau der Ufersicherungen frei verbreitern kann.

c) Nutzung der Räume

Für die Auswertung der Funktionen wird gemäss der Tabelle 7 die aktuelle Nutzung (IST-Zustand) als Basis verwendet. Die Optimierung der nach den Gewässerfunktionen in der Variante 4 wird an den repräsentativen Querprofilen vorgenommen.

Tabelle 7 Eigenschaften der betrachteten Varianten

Nr.	Bezeichnung	GWR	Ufersicherung	Nutzung	Beschreibung
V1	Vergrösserter Gewässerraum	Zwischen äusseren Dammfüssen oder Fuss von Felswänden	wie IST-Zustand	wie IST-Zustand	
V2	Rückbau der Ufersicherungen auf gesamter Länge	Zwischen äusseren Dammfüssen oder Fuss von Felswänden	kompletter Rückbau innerhalb Betrachtungsperimeter	ausserhalb Mobilitätsraum wie IST-Zustand	Mobilitätsraum zwischen den inneren Dammfüssen angenommen
V3	Partieller Rückbau der Ufersicherung	Zwischen äusseren Dammfüssen oder Fuss von Felswänden	Rückbau in Aussenkurven und in Auenschutzgebieten falls dadurch keine Siedlung gefährdet	Ausserhalb Mobilitätsraum wie IST-Zustand	
V4	Partieller Rückbau der Ufersicherung, Nutzung optimiert	Zwischen äusseren Dammfüssen oder Fuss von Felswänden	Rückbau in Aussenkurven und in Auenschutzgebieten falls dadurch keine Siedlung gefährdet	Für Erfüllung der Gewässerfunktionen optimiert	

3 Resultate

3.1 Naturnahe Sohlenbreite

3.1.1 Regimebreite

Zur Ermittlung der Regimebreite wurde für den betrachteten Abschnitt zwischen dem Schiffenensee und der Aare mit den empirischen Ansätzen die Gleichgewichtsbreite und die Grenzbreite berechnet. Die Resultate sind in der Tabelle 8 dargestellt. Die Breiten wurden für die die Abflüsse HQ₂ und HQ₅ berechnet. Die Mittelwerte dieser Breiten liegen für die Gleichgewichtsbreite zwischen 70 und 100 m und für die Grenzbreite zwischen 63 und 566 m.

Tabelle 8 Bereich der Regimebreite in [m] nach verschiedenen Ansätzen für die primäre und sekundäre Ufererosion in Abhängigkeit der massgebenden bettbildenden Abflüsse HQ₂ und HQ₅

	Ansatz	HQ ₂ = 342 m ³ /s	HQ ₅ = 480 m ³ /s	Mittel HQ ₂₋₅
Gleichgewichtsbreite b _{gg} (primäre Ufererosion)	Yalin (1992)	64	76	70
	Parker (1979)	90	107	99
Grenzbreite b _{w,gr} (sekundäre Ufererosion)	Ashmore (2001)	107	140	123
	Griffiths (1981)	76	107	92
	Henderson (1966)	52	74	63
	Millar (2005)	136	173	155
	Mosley (1983)	510	621	566

Weiter wurde die Regimebreite auch mit dem Ansatz der Schleppspannungstheorie berechnet. In der Abbildung 4 sind die Schleppspannungen bei den massgebenden Abflüssen in Abhängigkeit der Gerinnesohlenbreite B dargestellt. Die kritische Schleppspannung $\Theta_{crit,DS}$ wird bis zu einer Gleichgewichtsbreite zwischen 65 und 90 m überschritten. Ist die Gewässerbreite kleiner, kann das Ufer erodieren.

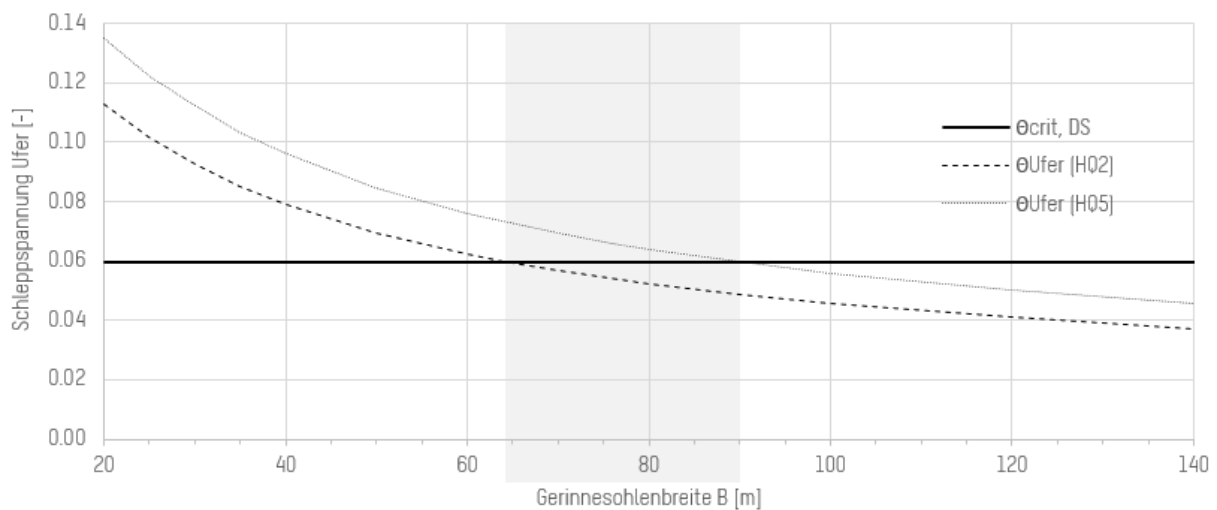


Abbildung 4 Schleppspannung an den Ufern in Abhängigkeit der Gerinnesohlenbreite B.

3.1.2 Historische Karten

Die historischen Karten zeigen die Gewässerentwicklung seit Mitte des 19. Jahrhunderts. Anhand der Dufourkarte (1860) und den ersten Siegfriedkarten (1880, 1900) lässt sich die ursprüngliche Morphologie der Saane erkennen. Bereits bei der Siegfriedkarte von 1880 sind südlich von Gümminen erste Verbauungen erkennbar (Abbildung 5: Kartenausschnitte unten). Die Siegfriedkarte der folgenden Jahrzehnte zeigen die Begradigung der Saane im gesamten Perimeter.

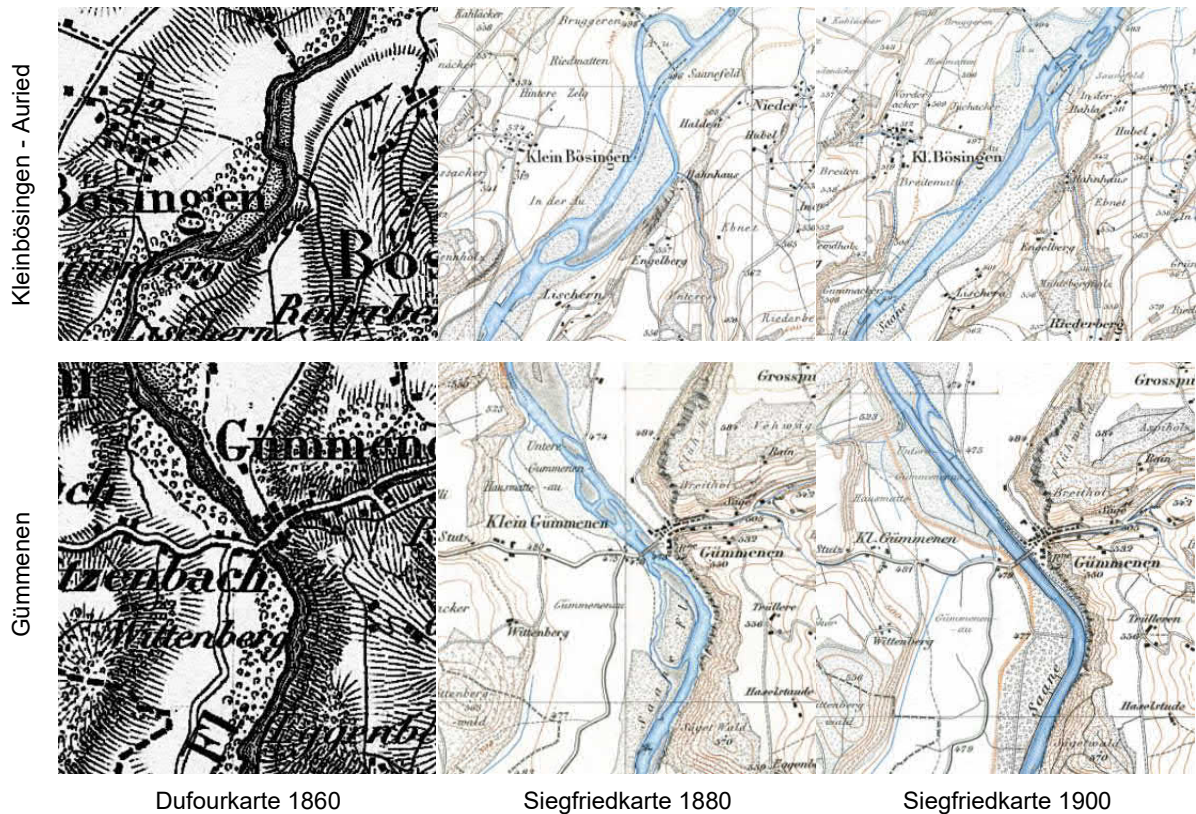


Abbildung 5 Vergleich zweier Gewässerabschnitte auf verschiedenen Historischen Karten (ca. 1:36'000), swisstopo.

Aus der Siegfriedkarte 1880 wurde die Breite des Wasserlaufes, die Breite der Alluvionen und die Breite des Auenwaldes gemessen (Abbildungen 6 und 7). Die Gerinnesohlenbreite (Alluvionen und Wasserlauf) variiert zwischen 70 und 260 m. Ausserhalb des Mündungsbereiches in die Aare liegt sie im Mittel bei 140 m. Die Breite des Gewässerraumes liegt in der Grössenordnung zwischen 200 und 420 m.

In der Abbildung 6 ist der historische Flussraum (aus Siegfriedkarte 1880 abdigitalisiert) mit der aktuellen Landeskarte hinterlegt. Die Abbildung zeigt den Rückgang der alluvialen Flächen, der Auenwälder sowie der Rückgang der Strukturvielfalt des Gewässerlaufes zwischen 1880 und 2020. Die Auenwälder sind grösstenteils der landwirtschaftlichen Nutzung gewichen. Die freien Kiesflächen sind heute mehrheitlich überwachsen und bewaldet.



Abbildung 6 Flussraum aus Siegfriedkarte 1880 mit aktueller Landkarte als Hintergrund (1:18'000): Bereich Gümmenen (Gewiss Adr. 3'400-6'700 m, Abschnitte 6-9): Gewässerbreite (blau), Alluvionen (gelb), Auenwald (grün), Verbauungen (rot), befestigte Flächen (grau), Wiesen (lila), siehe auch Anhang B.

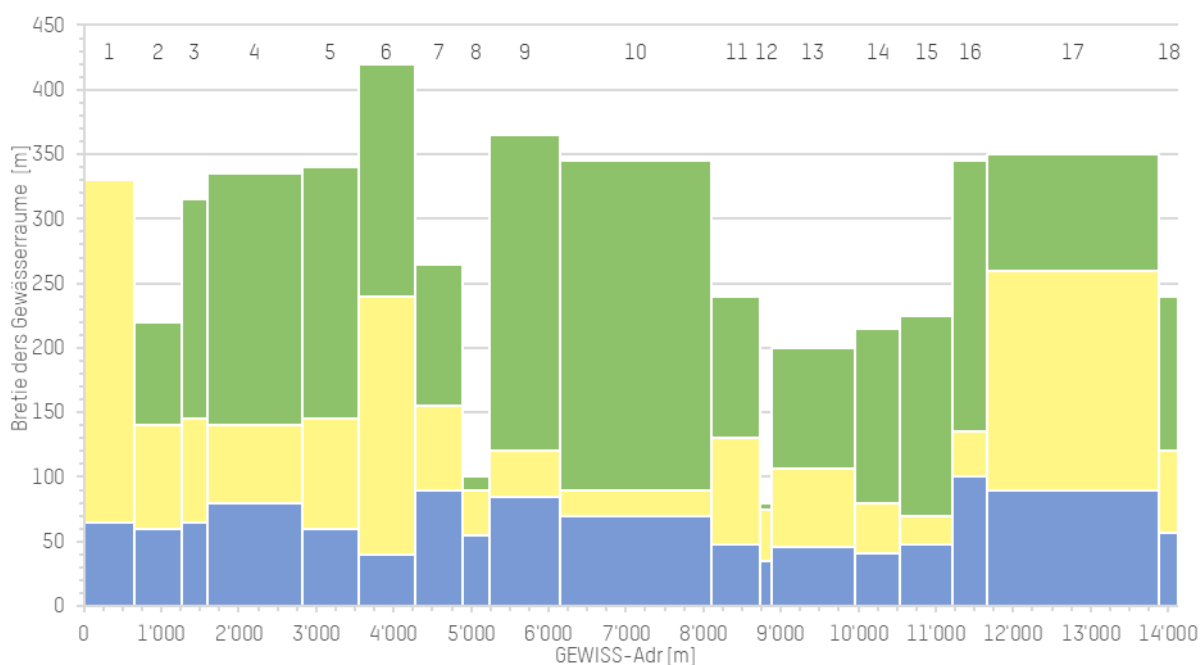


Abbildung 7 Breite des Flussraumes: aus Siegfriedkarte 1880 an bestimmten Querprofilen der 18 Abschnitte (vgl. Kapitel 2.9) gemessene Gewässerbreite (blau), Alluvionen (gelb), Auenwald (grün)

3.1.3 Ökomorphologische Kartierung

Die ökomorphologische Kartierung der Saane des Kantons Bern (AWA, 2019) zeigt, dass der Natürlichkeitsgrad der Saane «wenig beeinträchtigt» und «stark beeinträchtigt» und die Variabilität der Wasserspiegelbreite mehrheitlich als «eingeschränkt» beurteilt. Der ökomorphologische Zustand des eingetieften Abschnitts unterhalb des Schiffenensees wurde als «natürlich» beurteilt.

Abgesehen vom eingetieften Abschnitt unterhalb des Schiffenensees misst die Gewässersohlenbreite zwischen 35 bis 55 m. Die natürliche Gerinnesohlenbreite beträgt nach diesem Ansatz demnach 52 bis 83 m.

3.2 Minimale natürliche Uferbreite

3.2.1 Schlüsselkurve

Die Saane weist eine natürliche Gerinnesohlenbreite von über 15 m auf. Daher ist gemäss BPUK et al. (2019) in Schutzgebieten eine minimale Uferbreite von ja 15 m erforderlich. Ausserhalb der Schutzgebiete ist der minimale Uferraum situativ festzulegen.

3.2.2 Historische Karten

Die Uferbereichsbreite wurde aus der Siegfriedkarte von 1880 gemessen. Gemäss Abbildung 7 liegt sie zwischen 45 und 360 m.

3.3 Gerinneform

Die Saane weist gemäss den historischen Karten ohne Verbauungen alternierende Bänke und teilweise 2 Teilgerinne auf (Abbildung 5). Diese Gerinneform lässt sich im Diagramm nach Ahmari und daSilva (2011) bestätigen (Abbildung 8). In der folgenden Abbildung sind die Gerinneformen für Gerinnesohlenbreiten von 80, 100 und 120 m bei den für die Bereiche der zwischen HQ₂ und HQ₅ dargestellt. In Abhängigkeit der Gerinnesohlenbreite B weist das Gerinne bei den gerinnebildenden Abflüssen Übergangsformen zwischen alternierenden Bänken und einem verzweigten Gerinne auf.

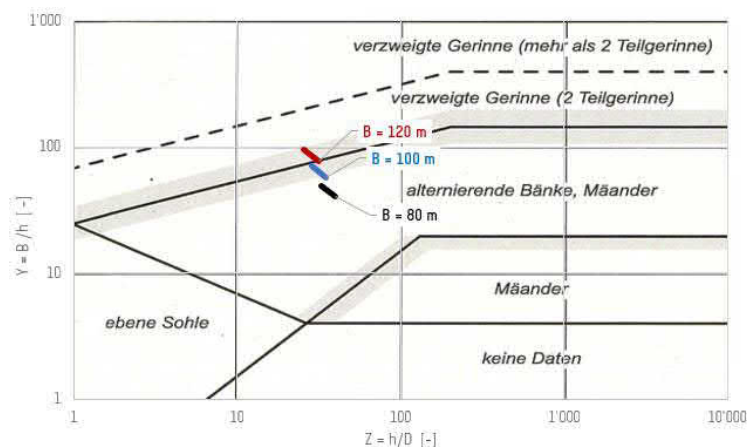


Abbildung 8 Gerinneform der Saane nach Ahmari und daSilva (2011) bei Gerinnebreiten von 80 m, 100 m und 120 m und Abflüssen von HQ₂₋₅. Diagramm aus Bezzola (2015).

3.4 Raumbedarf nach SCZA

Mit dem Onlinetool des Paccaud et. al. (2016) kann basierend auf den Gewässereigenschaften (Tabelle 9) im natürlichen bzw. naturnahen Zustand ein Funktionsdiagramm erstellt werden. Als bettbildender Abfluss wird der Abfluss des HQ₂ herangezogen. Die Rauigkeit nach Strickler wurde aufgrund der Korngrössen berechnet ($34-38 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$). Diese Werte sind für ein natürliches Gerinne mit geschiebeführung zu hoch (Lange et al, 1986). Die Rauigkeit wurde auf $28 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ festgelegt. Gemäss Paccaud et. al. (2016) kann eine mittlere natürliche Böschungsneigung mit 0.33 (18.3°) angenommen werden. Die Energielinie des natürlichen Gerinnes wird parallel zum Längsgefälle des Gerinnes

Resultate

angenommen. Weiter ist das Verhältnis Breite/Tiefe iterativ für ein Trapezgerinne mit den festgelegten Gerinneigenschaften berechnet.

Tabelle 9 Eingabewerte für ökologisches Funktionsdiagramm

Eigenschaft	Abk	Einheit	Abschnitte 1-13	Abschnitte 14-18
bettbildender Abfluss	Q	[m ³ /s]	340	340
Rauigkeit	K	[m ^{1/3} /s]	28	28
Böschungsneigung	m	[m/m]	0.33	0.33
Gefälle der Energielinie	l	[m/m]	0.0023	0.0023
Anzahl Abflusserinnen	n	[Stk]	1	1
Verhältnis Breite/Tiefe	r	[m/m]	47	37
Gerinneform			Verzweigtes Gerinne	Gerade Gerinne
Aue	-	[-]	Ja / Nein	Nein

Die Resultate für die massgebenden Breiten sind in der **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** dargestellt. Die Wasserspiegelbreiten liegen zwischen 82 und 92 m und natürlichen Gerinnesohlenbreiten zwischen 70 und 80 m. Die Mäanderamplitude ist für verzweigte Gerinne nicht massgebend.

Tabelle 10 Resultate für massgebende Breiten

Eigenschaft	Abk.	Einheit	Abschnitte 1-13	Abschnitte 14-18
Wasserspiegelbreite b. bettbildenden Abfluss	L _{pb}	[m]	92.3	82
nat. Gerinnesohlenbreite	L _{fl}	[m]	80.4	69.5
Mäanderamplitude	A _{nat}	[m]	nicht massgebend	nicht massgebend

Die Abbildung 9 und die Abbildung 10 zeigen die Funktionsdiagramme der Saane der Abschnitte 1-13 ausser- und innerhalb von Schutzgebieten. Wie in der Tabelle 6 erklärt, wird die Überflutungsdynamik nur bei stark mäandrierenden Gewässern beurteilt.

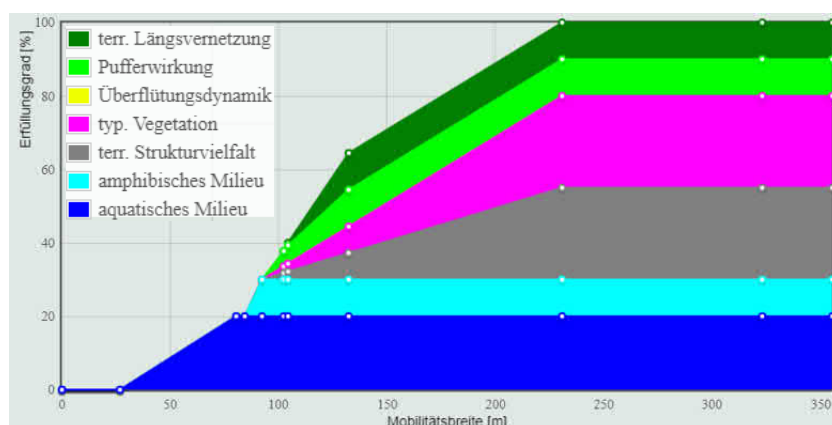


Abbildung 9 Funktionsdiagramm der Saane ausserhalb von Schutzgebieten (Auen)

Aus dem Funktionsdiagramm (Abbildung 9) kann abgeleitet werden, dass ausserhalb von Schutzgebieten 50% der natürlichen Funktionen mit einer Mobilitätsbreite von 116 m und 100% mit einer Mobilitätsbreite von 230 m. erreicht werden können. Die Abbildung zeigt weiter, dass bis zur einer Mobilitätsbreite, welche der Wasserspiegelbreite beim bettbildenden Abfluss entspricht, nur die Funktionen des aquatischen und amphibischen Milieus erfüllt werden. Erst wenn die Mobilitätsbreite diese Breite überschreitet, können sukzessive die weiteren natürlichen Funktionen erfüllt werden. Nach

der Methode Paccaud et. al (2016) werden dann zuerst die Pufferfunktion und die terrestrische Längsvernetzung vollständig erfüllt. Die Entwicklung einer typischen Vegetation und die Ausbildung einer terrestrischen Strukturvielfalt benötigen einen grösseren Mobilitätsraum.

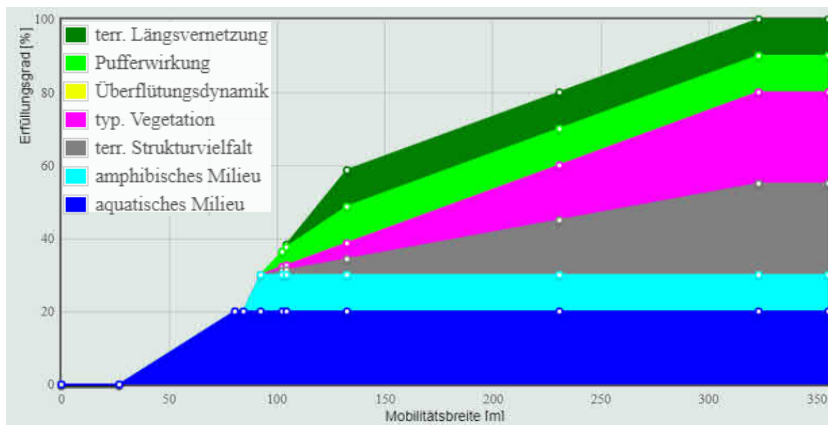


Abbildung 10 Funktionsdiagramm der Saane innerhalb von Schutzgebieten (Auen)

Aus dem Funktionsdiagramm (Abbildung 10) kann abgeleitet werden, dass innerhalb von Schutzgebieten 50% der natürlichen Funktionen mit einer Mobilitätsbreite von 120 m und 100% mit einer Mobilitätsbreite von 323 m. erreicht werden können. Ab einer Mobilitätsbreite von 130 m dient die Vergrößerung des Mobilitätsraumes insbesondere der vollständige Entwicklung einer typischen Vegetation und die Ausbildung einer terrestrischen Strukturvielfalt.

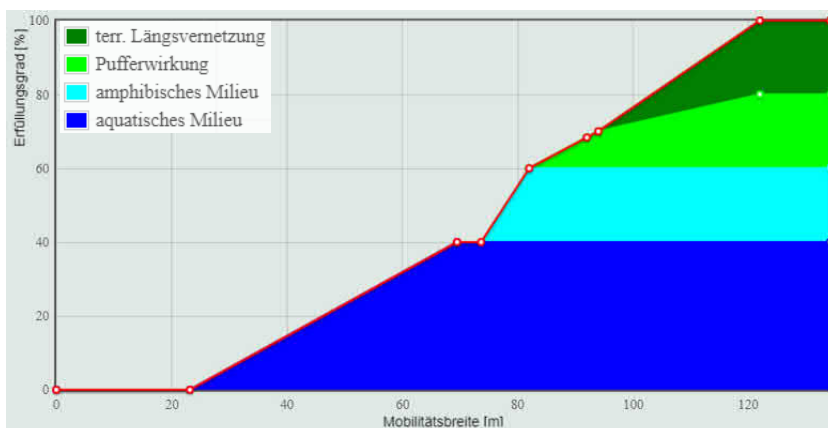


Abbildung 11 Funktionsdiagramm der Saane Abschnitte 14-18, ausserhalb von Schutzgebieten (Auen)

Das Funktionsdiagramm (Abbildung 11) zeigt, dass auf den Abschnitten 14 bis 18 (eingetieftes Gerinne) die natürlichen Funktionen (ter. Längsvernetzung, Pufferwirkung, amphibisches und aquatisches Milieu) erfüllt werden können. 50% der natürlichen Funktionen können mit einer Mobilitätsbreite von 80 m und 100% mit einer Mobilitätsbreite von 122 m. erreicht werden können.

3.5 Erfüllung ökologischer Funktionen im IST-Zustand

3.5.1 Auswertung Gewässerabschnitte

Die Saane wurde im Betrachtungsperimeter in 18 homogene Abschnitte unterteilt (Anhang F). Die Unterteilung in die Abschnitte erfolgte anhand der aktuellen Abflussprofilform, der Lage in einer Aue von

nationaler Bedeutung und der Art des Uferbewuchses. Für die Auswertung des IST-Zustandes wurden die Flächen im heute gültigen Gewässerraum (gemäss Kapitel 2.2.4) ausgewertet.

Anstelle der Auswertung mit dem Onlinetool wurde die Beurteilung der natürlichen Funktionen anhand der Schlüsselkurven für natürliche Gewässerfunktionen an der Saane (Anhang F) in einem Excelsheet vorgenommen. Die Funktionen wurden anschliessend nach mit den Faktoren in Tabelle 6 gewichtet.

3.5.2 Erfüllung natürliche Funktionen

In der Abbildung 12 ist die Auswertung des Erfüllungsgrads der natürlichen Funktionen (vertikale Achse) je Gewässerabschnitt (horizontale Achse) dargestellt. Der Erfüllungsgrad ist nach den Uferseiten dargestellt (oben/unten). Bei der GEWISS Adr. 0 m liegt die Mündung in die Aare. Ab dem der GEWISS Adr. 10'000 m befindet sich die Saane in einem eingetieften Gerinne. Die Eingabegrössen sind im Anhang F festgehalten.

Der Erfüllungsgrad der natürlichen Funktionen liegt im Betrachtungsperimeter zwischen 18 und 45%. Auf den Abschnitten 1 bis 14 können die aquatischen, amphibischen Funktionen, die Pufferwirkung und teilweise die terrestrische Längsvernetzung erfüllt werden. Die Mobilitätsbreiten reichen für die Erfüllung der terrestrischen Strukturvielfalt sowie zur Ausbildung einer typischen Vegetation nicht aus. Bei den eingetieften Abschnitten 15 bis 18 können die Längsvernetzung und die Pufferwirkung beinahe vollständig erfüllt werden. Die Funktionen, welche einen grossen Mobilitätsraum erfordern (vgl. Tabelle 5), werden nicht erfüllt.

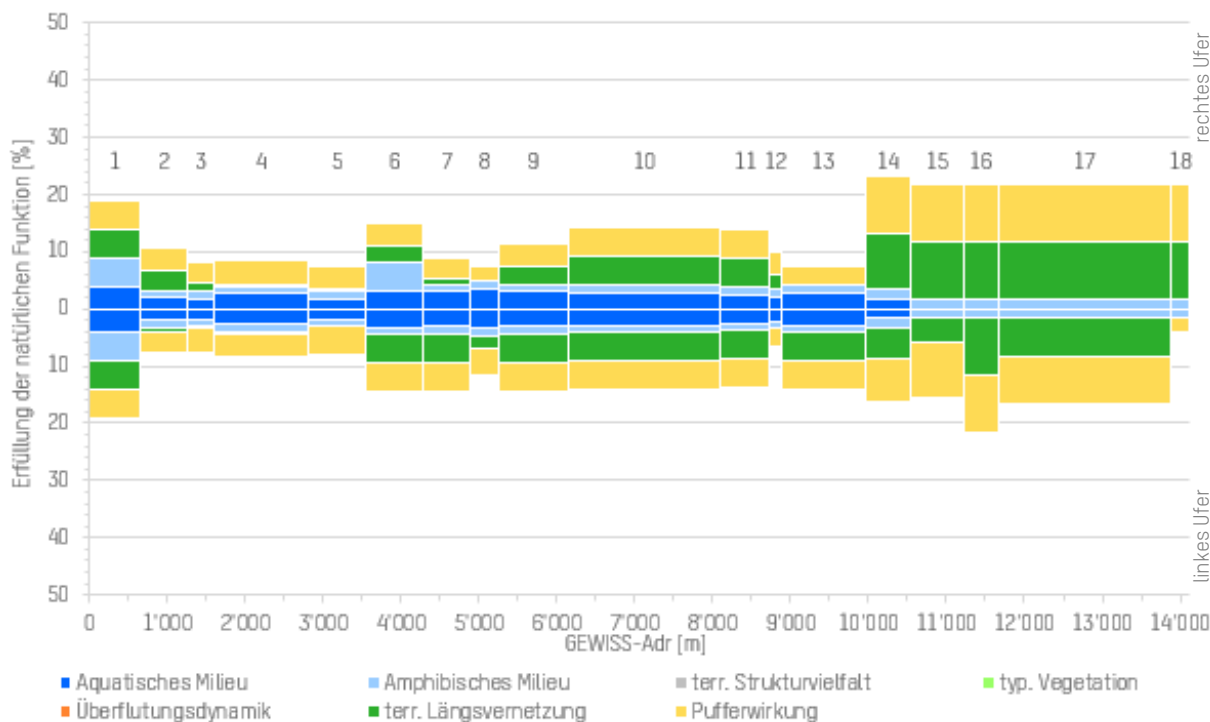


Abbildung 12 Erfüllungsgrad der natürlichen Funktionen im IST-Zustand der Abschnitte 1-18.

3.6 Erfüllung ökologischer Funktionen im Projektzustand

3.6.1 V1 – Vergrößerter Gewässerraum innerhalb Dämme

Bei der Variante 1 wurde der Gewässerraum bis zum äusseren Dammfuss bzw. zu Felswänden erweitert und die Funktionen anhand der aktuellen Nutzung der Flächen bestimmt (Anhang E).

Die Abbildung 13 zeigt das repräsentative Querprofil im Abschnitt 4 und die Gliederung der verschiedenen Nutzungen des Gewässerraumes. Die Vorländer werden grösstenteils extensiv bewirtschaftet. Schmale Streifen mit Ufergehölz bilden zusammen mit den Uferverbauungen die inneren Böschungen des Doppeltrapezprofils.

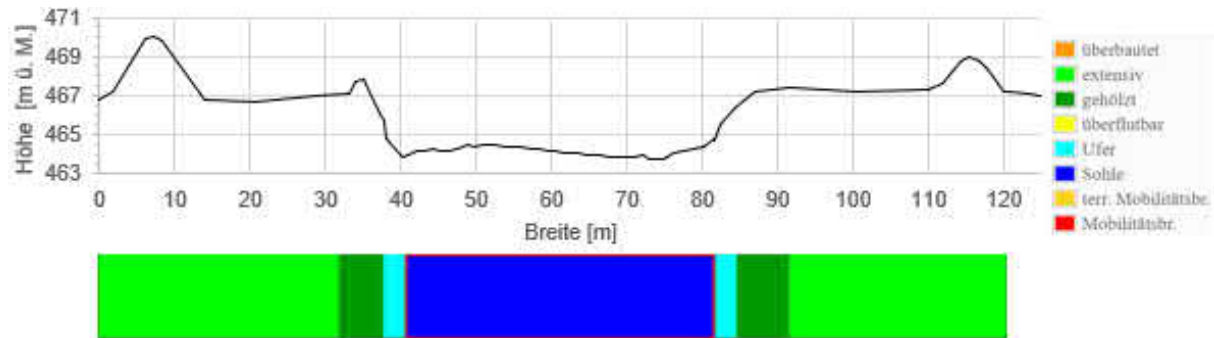


Abbildung 13 Vergrößerter Gewässerraum innerhalb der Dämme und dessen Nutzung im Abschnitt 4 (Querprofil Gewäss. Adr. 2'460 m)

In der Abbildung 14 sind die Erfüllungsgrade beim vergrösserten Gewässerraum dargestellt. Der Erfüllungsgrad der natürlichen Funktionen der nimmt im Schnitt um 2% gegenüber dem IST Zustand zu. Auf dem vorgestellten Abschnitt 4 können nebst den aquatischen und amphibischen Milieus nur die Pufferfunktion teilweise erfüllt werden.

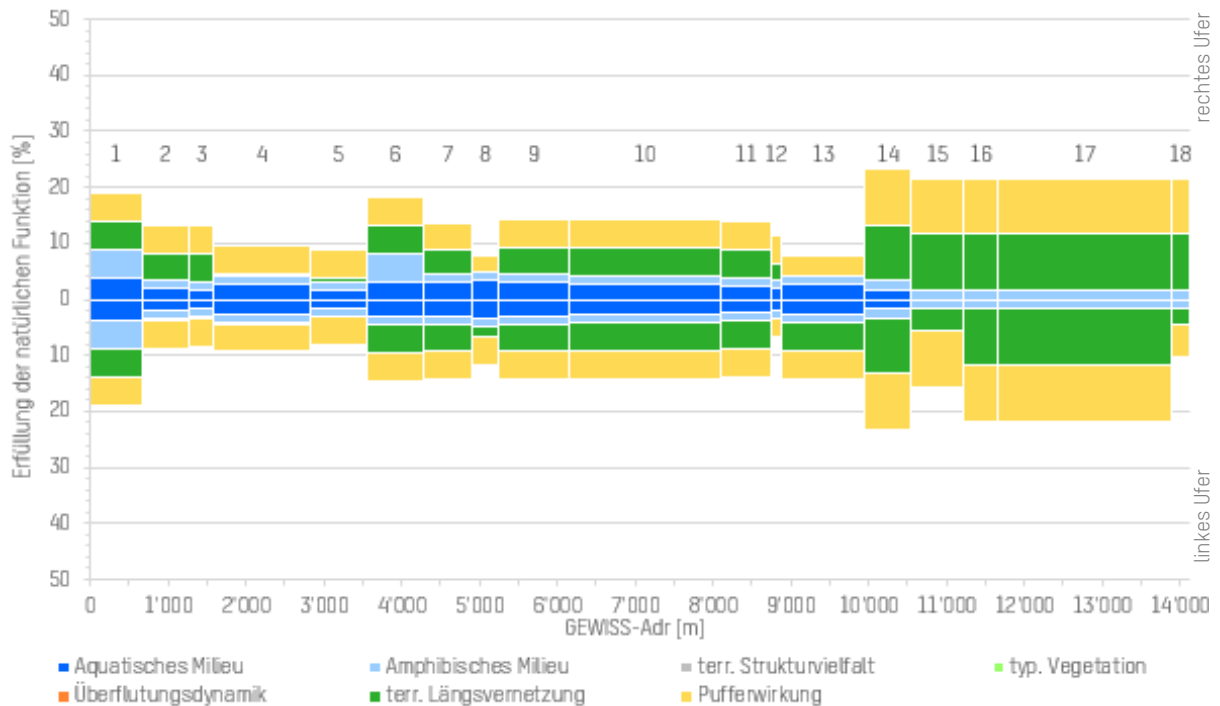


Abbildung 14 Erfüllungsgrad der natürlichen Funktionen bei vergrössertem Gewässerraum, Abschnitte 1-18.

3.6.2 V2 – Rückbau der Ufersicherungen auf gesamter Länge

Bei der Variante 2 wurde der Uferverbau beidseitig zurückgebaut und bei den inneren Dammfüssen Interventionslinien definiert. Damit wurde der Mobilitätsraum auf den Bereich zwischen den Dämmen ausgeweitet. Die bisherigen Nutzungen verschwinden und es wurde angenommen, dass entlang der Uferlinien sich Ufergehölze entwickeln. Die Gliederung des Gewässerraumes ist in der (Abbildung 15) dargestellt. Wie die Abbildung zeigt, wird mit der Methode nach Paccaud et. al (2016) bei einer Vergrößerung des Mobilitätsraumes der Raum zuerst der Sohle, dem Ufer und dann der terrestrischen Mobilitätsraum zugewiesen.

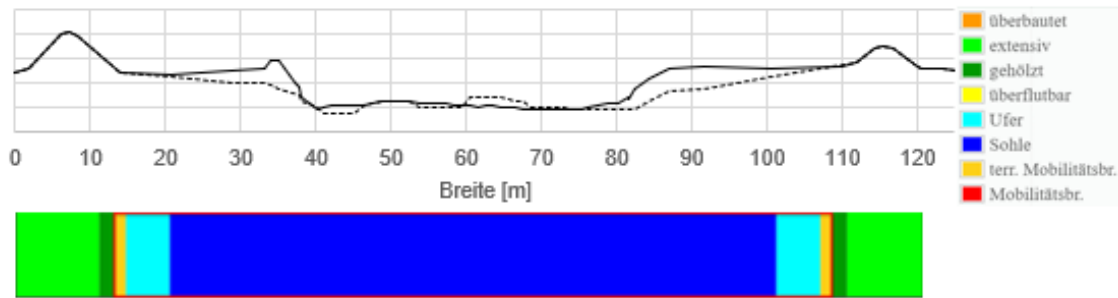


Abbildung 15 Nutzung des Gewässerraumes im Abschnitt 4 bei vollständigem Rückbau der Uferverbauungen und der Festlegung von Interventionslinien an den inneren Dammfüssen, hypothetisches Querprofil (gestrichelt)

Die Abbildung 16 zeigt die Erfüllungsgrade dieser Variante. Der Erfüllungsgrad der natürlichen Funktionen der nimmt im Schnitt um 19% gegenüber dem IST Zustand zu.

Die Reihenfolge der Raumzuweisung zeigt sich auch beim erfüllungsgrad der natürlichen Funktionen. Zuerst werden die aquatische und amphibische Funktionen erfüllt. Dann folgen jene der terrestrischen Strukturvielfalt und der typischen Vegetation.

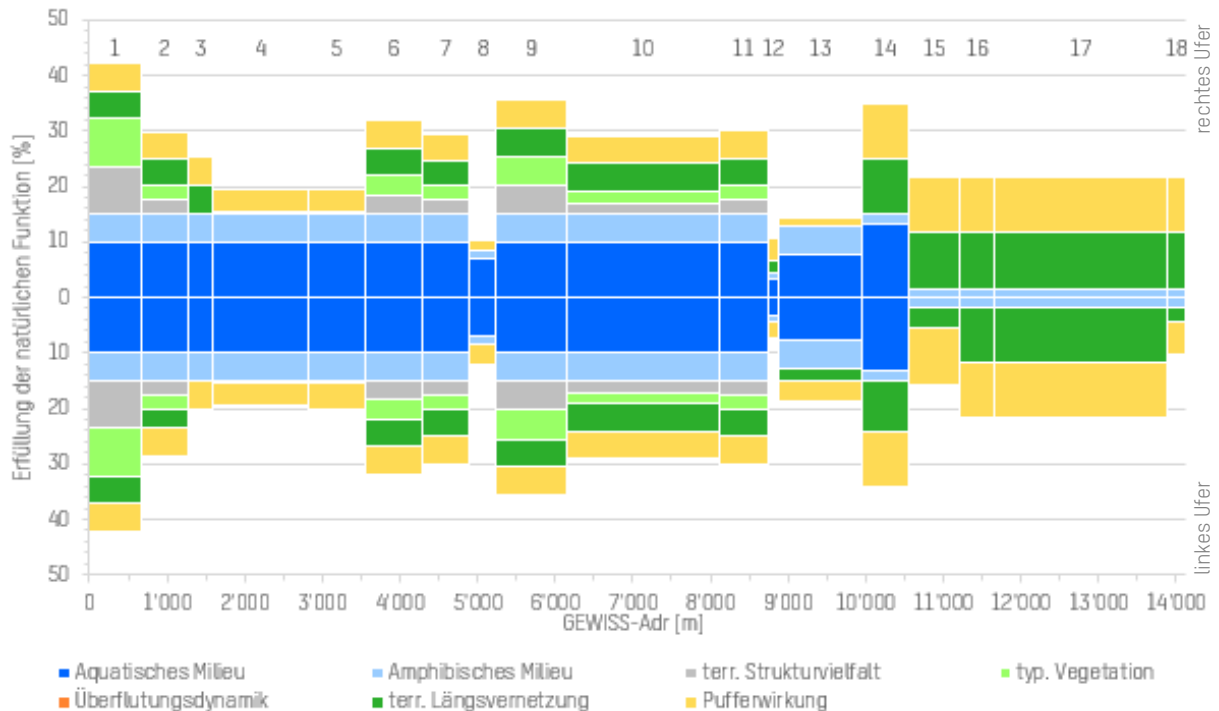


Abbildung 16 Erfüllungsgrad der natürlichen Funktionen beim kompletten Rückbau der Ufersicherungen Abschnitte 1-15.

3.6.3 V3 – partieller Rückbau der Ufersicherung

In dieser Variante wurde der Uferverbau wo möglich zurückgebaut. Das heisst, wenn vorhandene Dämme zum Schutz von Siedlungen und Landwirtschaftsland durch den Rückbau der Ufersicherungen akut (Aussenkurve oder eingeeengte Abschnitte) gefährdet würden, wurde der Uferschutz belassen. Ehemalige Auen und Prallwände an Hängen und Felsen wurden wieder aktiviert.

Die Abbildung 17 zeigt das repräsentative Querprofil im Abschnitt 4 und die Gliederung der verschiedenen Nutzungen des Gewässerraumes.

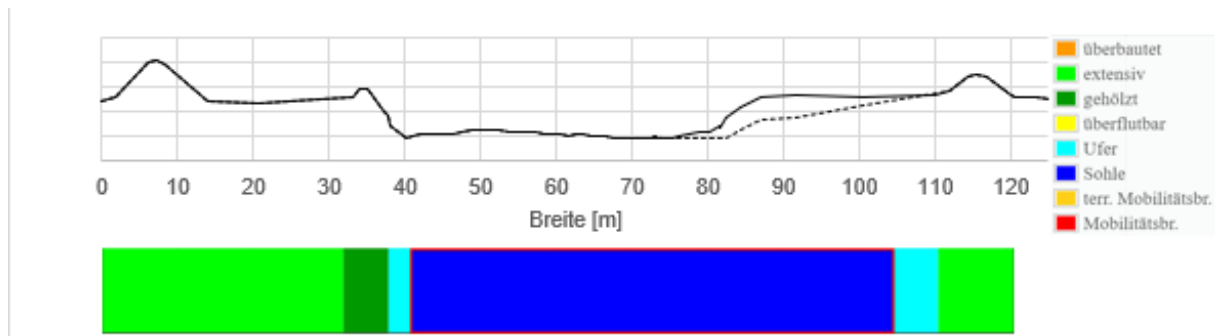


Abbildung 17 Nutzung des Gewässerraumes im Abschnitt 4 bei einseitigem Rückbau der Uferverbauungen und Festlegung einer Interventionslinie am inneren Dammfuss, hypothetisches Querprofil (gestrichelt)

Die Abbildung 16 zeigt die Erfüllungsgrade dieser Variante. Der Erfüllungsgrad der natürlichen Funktionen der nimmt im Schnitt um 16% gegenüber dem IST Zustand zu.

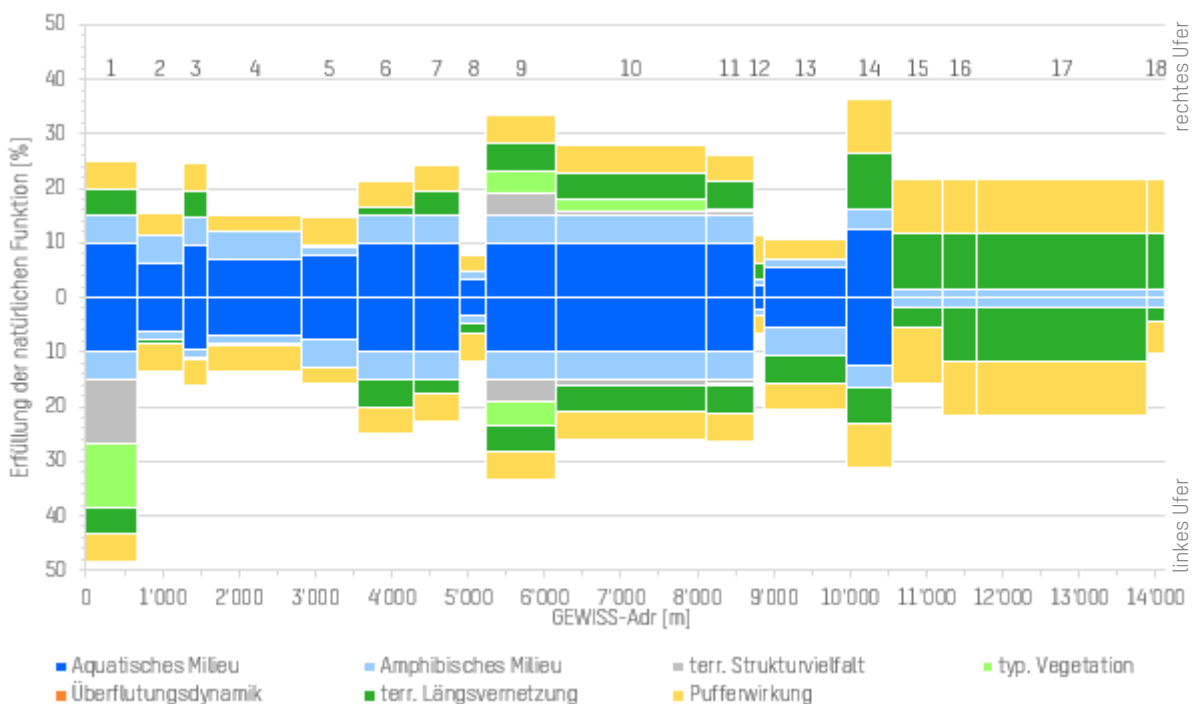


Abbildung 18 Erfüllungsgrad der natürlichen Funktionen bei partiellem Rückbau der Ufersicherungen auf den Abschnitten 1-15.

3.6.4 V4 – partieller Rückbau der Ufersicherung mit optimierter Nutzung

Diese Variante basiert auf der Variante 3 wobei die Nutzung des Gewässerraumes für die Erfüllung der natürlichen Funktionen des Gewässers optimiert wurde. Dabei wurde angenommen, dass Bereiche innerhalb des Gewässerraumes, welche nicht auf einem Damm liegen bewaldet sind.

Die Abbildung 19 zeigt das repräsentative Querprofil im Abschnitt 4 und die Gliederung der verschiedenen Nutzungen des Gewässerraumes.

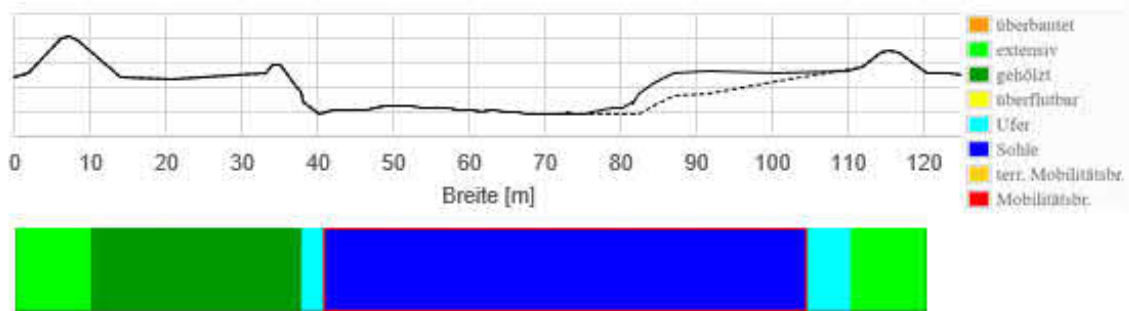


Abbildung 19 Optimierte Nutzung des Gewässerraumes im Abschnitt 4 bei einseitigem Rückbau der Uferverbauungen und Festlegung einer Interventionslinie am inneren Dammfuss, hypothetisches Querprofil (gestrichelt)

Die Abbildung 20 zeigt die Erfüllungsgrade dieser Variante. Der Erfüllungsgrad der natürlichen Funktionen der nimmt im Schnitt um 17% gegenüber dem IST Zustand zu.

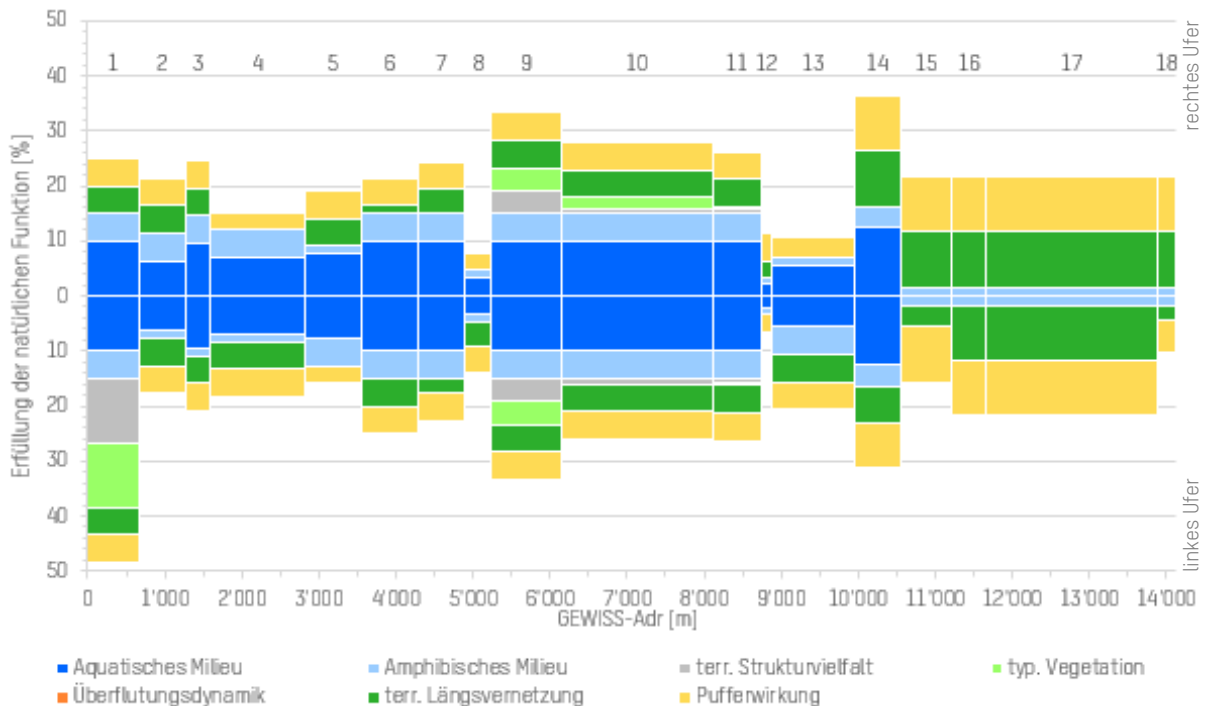


Abbildung 20 Erfüllungsgrad der natürlichen Funktionen bei partiellem Rückbau der Ufersicherungen und optimierter Nutzung auf den Abschnitten 1-15.

4 Diskussion

4.1 Gewässerraum

4.1.1 Natürliche Sohlen- und Uferbereichsbreite

Die Berechnung der Gleichgewichtsbreiten und der Grenzbreiten mit den verschiedenen vorgestellten Ansätzen, der Analyse der historischen Karten und der ökologischen Kartierung ergeben eine grosse Bandbreite für die natürliche Gerinnesohlenbreite. In der folgenden Tabelle sind die Werte zusammengetragen.

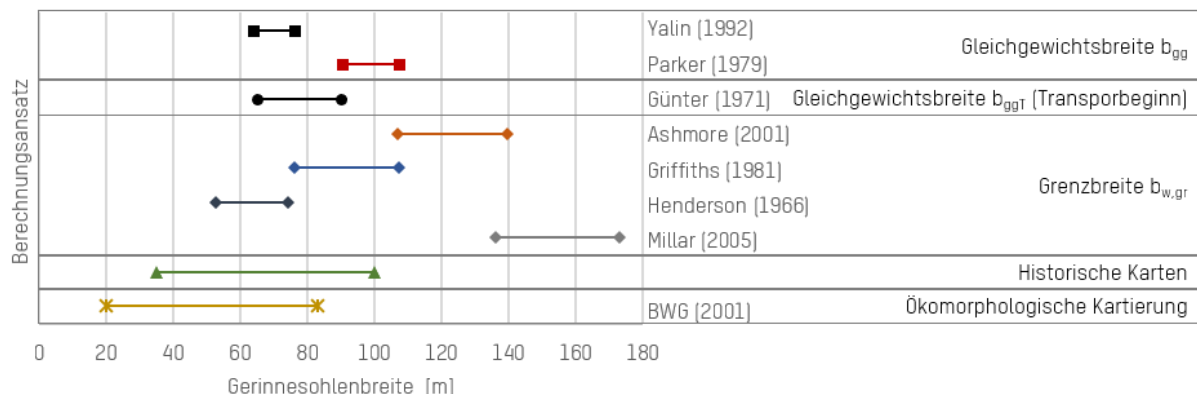


Abbildung 21 Gleichgewichts- und Grenzbreiten

Die Streuung der Gleichgewichts- und Grenzbreiten reichen von 20 m bis zu 173 m. Für die Uferbereichsbreiten wurden in den Historischen Karten breiten zwischen 20 und 200 m gemessen. Gemäss BWG (2001) beträgt die minimale Uferbereichsbreite 30 m.

Gleichgewichts und Grenzbreiten

Die Gleichgewichtsbreiten b_{gg} nach der primären Ufererosion sind im Mittel geringfügig kleiner als die berechnete Grenzbreiten $b_{w,gr}$. Der Ansatz für die Gleichgewichtsbreite beim Transportbeginn b_{ggT} unterschätzt die Gleichgewichtsbreite, da die Sekundärströmungen im Ansatz nicht berücksichtigt werden. Weiter zeigt die Sensitivitätsanalyse der Gleichgewichts- und der Grenzbreite, dass die Ansätze in Abhängigkeit des Abflusses, des Gefälles und der Korngrößen teilweise markant unterschiedliche Werte liefern. In der Tabelle 11 sind die verschiedenen Breiten in Abhängigkeit der Abflüsse HQ_2 und HQ_5 sowie des Längsgefälles dargestellt.

Tabelle 11 Sensitivitätsanalyse Gleichgewichts- und Grenzbreite in Abhängigkeit von Abfluss und Gefälle

variierende Parameter	Gleichgewichtsbreite b_{eq} [m]		Grenzbreite $b_{w,gr}$ [m]				
	Yalin 1992	Parker 1979	Ashmore 2001	Griffiths 1981	Henderson 1966	Millar 2005	Mosley 1983
Abfluss Q [m ³ /s]	340	90	107	76	52	136	510
	480	107	140	107	74	173	621
Gefälle J [m/m]	0.0020	90	96	64	45	126	512
	0.0023	90	107	77	53	137	512
	0.0026	90	118	89	61	147	512

Gegenüber dem HQ₂ sind die Gleichgewichtsbreiten beim HQ₅ im Mittel um 14 m grösser. Die Grenzbreite nimmt vom HQ₂ zum HQ₅ im Mittel (exkl. Mosley) um 31 m zu. Bei einem grösseren Gefälle nimmt die Grenzbreite (ausser bei Mosley) zu.

Die Berechnungsansätze basieren gemäss Requena (2008) auf unterschiedlichen Modellversuchen der Autoren. Aufgrund der unterschiedlichen Versuchskonfigurationen ist bei der Anwendung der Ansätze Vorsicht geboten. Er empfiehlt daher zur Beurteilung der Grenzbreite weitere Informationen wie historische Karten oder Pläne der ursprünglichen Gewässerkorrektion beizuziehen.

Mit der Berechnung der Breiten nach Paccaud et al. (2016) ergeben eine natürliche Gerinnesohlenbreite von 80 m und eine Wasserspiegelbreite von 92 m für die Abschnitte unterhalb der Sensemündung. Zwischen dem Schifensee und der Sensemündung wurde das Gerinne nach dem Bau des Kraftwerkes eingetieft. Die Saane fliesst auf diesem Abschnitt in einem ca. 5 m tiefen Couloir, welches links und rechts durch die anstehende Molasse begrenzt ist (BAFU, 2016). Aus diesem Grund wurden für die Abschnitte 14-18 die Breiten für ein gerades Gerinne gemäss Empfehlung Paccaud et. al. (2016) berechnet. Dieser Ansatz ergibt eine natürliche Gerinnesohlenbreite von rund 70 m und eine Wasserspiegelbreite von 82 m.

Historische Karten

Auch die Auswertung der historischen Karten ergibt mit 35-100 m natürliche Sohlenbreite eine grosse Bandbreite. Bei der genaueren Betrachtung der historischen Karten kann jedoch die natürliche Sohlenbreite weiter präzisiert werden:

- Die minimale Abflussbreite von 35 m liegt bei der Saanebrücke (Gewiss Adr. 8898 m). Auch in Gümmenen ist der Abflussquerschnitt wegen der Gümmenenbrücke (Gewiss Adr. 5178 m) auf ca. 55 m reduziert.
- Im Abschnitt 10 sind am linken Flussufer bereits Uferverbauungen sichtbar. Es ist davon auszugehen, dass mit den Uferverbauungen die Sohlenbreite gegenüber dem natürlichen Zustand auf 70 m reduziert wurde.
- Es ist nicht bekannt bei welchem Abfluss die Breite der Wasserfläche eingemessen wurde, daher wird die Breite der Wasserfläche plus die Breite der Alluvionen als Wasserspiegelbreite beim bettbildenden Abfluss approximiert. Die Fläche entspricht jenem Bereich, welcher frei von langjährigen Gehölzen ist.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte ergibt ausserhalb der Brückenbereiche eine Wasserspiegelbreite (Gleichgewichtsbreite) zwischen 70 und 260 m. Auf diesen Abschnitten liegt die eingezeichnete Gewässerbreite zwischen 40 und 100 m.

Ökomorphologische Kartierung

Der Ansatz nach BWG (2001) basiert auf der ökomorphologischen Beurteilung der Breitenvariabilität (BUWAL, 1998). Die Breitenvariabilität wird im eingetieften Abschnitt unterhalb des Schifensees als «ausgeprägt» (Faktor 1) und im restlichen Betrachtungsperimeter als «eingeschränkt» (Faktor 1.5) beurteilt. Der Abschnitt oberhalb der Sensemündung weist demnach eine natürliche Sohlenbreite von

20 – 52 m auf. Für die restlichen Abschnitte ergibt die Auswertung eine natürliche Gerinnesohlenbreite von 52 – 83 m.

Die Einstufung der Breitenvariabilität im eingetieften Abschnitt als «ausgeprägt» entspricht nicht dem zu erwartenden Einstufung, wenn die ursprüngliche Gewässerform aus den historischen Karten beigezogen wird. Eine Ursache für diese Einstufung könnte die Irreversibilität der Eintiefung sein. Sowohl stellt eine anhebung der Sohle als auch eine verbreiterung des gerinnes einen immensen baulichen Aufwand dar.

Zusammenfassung

Die natürliche Sohlenbreiten des Abschnittes unterhalb der Sensemündung liegen bei allen Betrachtungen zwischen 40 und 83 m. Der obere Wert kann gemäss den historischen Karten und den Berechnungsansätzen auch im Bereich von 90-100 m liegen. Die Uferbereichsbreiten liegen zwischen 30 bis 200 m.

4.1.2 Raumbedarf nach SCZA

Die Funktionsdiagramme im Kapitel 3.4 basieren auf der berechneten natürlichen Gerinnesohlenbreite von 80.4 m und der Wasserspiegelbreite beim gerinnebildenden Abfluss von 92 m. Die Abbildung 22 zeigt die Sensitivität des Erfüllungsgrades in Abhängigkeit der Gerinnesohlenbreite auf. Mit einer Differenz der Sohlenbreite um 10 m weicht der Erfüllungsgrad im Fall der Saane ca. um 10 % ab.

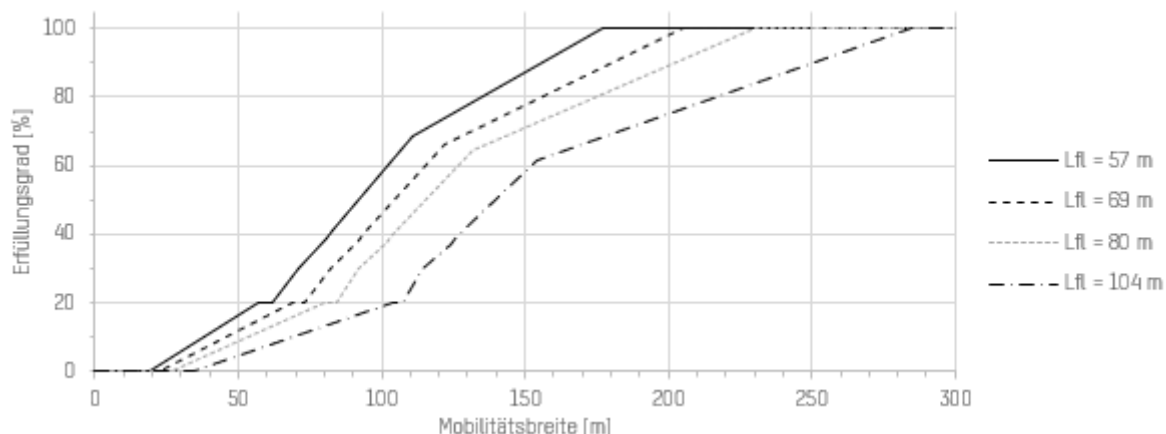


Abbildung 22 Funktionsdiagramm in Abhängigkeit der Gerinnesohlenbreite Lfl für die Saane, Abschnitte 1-13 ausserhalb Auenperimeter

Die Abbildung zeigt, dass für die vollständige Erfüllung der natürlichen Funktionen des Gewässers ein Mobilitätsraum über 175 m erforderlich ist. Dieser Raum liegt im Bereich der historisch dokumentierten Gleichgewichtsbreite. Der heutige Mobilitätsraum ist durch die Uferverbauungen sehr eingeschränkt. Die Breite beträgt im Mittel 46 m. Die natürlichen Funktionen können damit zu maximal 20% erfüllt werden.

4.1.3 Erforderlicher Mobilitätsraum

Damit die natürlichen Funktionen 100% erfüllt werden können, ist ein Mobilitätsraum von ca. 200 m erforderlich. In diesem Raum darf das Gewässer in seiner seitlichen Ausbreitung nicht eingeschränkt sein.

4.1.4 Aktuell vorhandener Gewässerraum

Die aktuell ausgeschiedenen Gewässerräume sind ausser in der Gemeinde Bösinggen als Uferbereichsbreiten ausgeschieden und werden demnach ab der Uferlinie gemessen. In Bösinggen wird der Gewässerraum ab der Gewässerachse gemessen. Die aktuellen Gewässerräume (Uferbereichsbreiten) betragen zwischen 15 bis 136 m. Das ergibt Gewässerräume von zwischen 75 bis 230 m (sofern angenommen wird, dass das Naturschutzgebiet Laupenau zum Gewässerraum hinzugezählt werden kann). Im Mittel ist der Gewässerraum ca. 100 m breit. Im Bereich der Mündung in die Aare ist der Gewässerraum breiter als 400 m.

Würden die vorhandenen Gewässerräume keine Uferverbauungen aufweisen und könnten daher der Mobilitätsbreite gleichgesetzt werden, so könnten gemäss der Abbildung 22 mit einer Gewässersohlenbreite die natürlichen Funktionen ca. zu 40% erfüllt werden.

Der Grundlagenbericht Flussmorphologie und Wasserbau (Hunzinger, 2014) hat für die Sense eine natürliche Sohlenbreite von 60 m und einen Gewässerraum von 135 m bei einer Erfüllung von 90% der natürlichen Funktionen bzw. einen Gewässerraum von 300 m für 100% Erfüllung ermittelt. Dies unter der Voraussetzung, dass der Mobilitätsraum nicht eingeschränkt wird. Trotz den leicht abgeänderten Erfüllungsfunktionen dieser Studie, dienen diese Werte einer Einordnung der vorliegenden Resultate. Gemäss der Abbildung 22 würde in unserer Betrachtung bei einer Gerinnesohlenbreite von ca. 60 m (57 m) 90% der Funktionen mit einer Mobilitätsbreite von 155 m erreicht. Dies zeigt, dass die Relationen der Studie Hunzinger (2014) und die vorliegende Betrachtung an ähnlichen Gewässern ähnlich ausfällt. Die Gewässer können bei dieser Methode verglichen werden, weil die massgebenden Unterschiede dieser Gewässer (Schwall-, Sunkregime, fehlende Hochwasserereignisse durch Stauhaltungen, fehlender Geschiebetransport) nicht berücksichtigt wird.

4.2 Erfüllungsgrad ökologischer Funktionen im vorhandenen Gewässerraum

Die Beurteilung der ökologischen Funktionen der Saane im vorhandenen Gewässerraum ergibt einen Erfüllungsgrad zwischen 18 und 45%. Für die Detailbetrachtung sind die Abschnitte 1-13 und die Abschnitte 14-18 separat zu betrachten, da der Bewertung nach Paccaud et al. (2016) unterschiedliche Gewichtungen der Funktionen für die beiden Gerinnetypen (verzweigtes Gerinne und gerades/eingetieftes Gerinne) zugrunde liegen. Paccaud et al. (2016) sieht gemäss der Tabelle 6 unterschiedliche Gewichtungen der natürlichen Funktionen vor. Sowohl bei den verzweigten als auch bei eingetieften Gerinnen wird die Überflutungsdynamik nicht beurteilt. Gemäss Paccaud et al. (2016) trägt der Wassereintrag durch die Überflutungen insbesondere bei stark mäandrierenden Gewässern zur Entwicklung typischer Vegetation im flachen, wenig durchlässigen Gelände bei. Die Funktion der Überflutungsdynamik ist nicht mit der Dynamik des Gewässers im aquatischen und amphibischen Raum zu verwechseln. Gegenüber den verzweigten Gerinnen werden bei eingetieften Gerinnen (Wildbächen) auch die Funktionen der «Entwicklung standortgerechter Lebensgemeinschaften» und «Strukturvielfalt der terrestrischen Habitats» nicht bewertet. Entsprechend werden die übrigen Funktionen höher gewichtet.

Abschnitte 14 bis 18

Die Abschnitte 14 bis 18 wurden als eingetieftes Gerinne bewertet, da die Saane in diesem Bereich wie ein Wildbach in einer Schlucht eingetieft, ohne seitliche Ausbruchsmöglichkeiten fliesst. Auch wenn der Abschnitt künstlich eingetieft wurde, kann das verzweigte Gerinne nicht als Referenzsystem beigezogen werden, da eine derartige Veränderung in Zukunft unwahrscheinlich ist. Aufgrund des grossen Gewässerraumes können sowohl die Pufferfunktion als auch die terrestrische Längsvernetzung beinahe vollständig erfüllt werden. Das sehr schmale Gerinne mit einer Breite zwischen 14 und 33 m erfüllt weder die aquatischen noch die amphibischen Funktionen.

Abschnitte 1 bis 13

Die Abschnitte 1 bis 13 weisen durchgehend eine Mobilitätsbreite von 42 bis 48 m auf. Die beidseitigen Uferverbauungen zwischen dem Kanal und den Vorländern verhindert eine seitliche Dynamik. Damit können weder die aquatischen noch die amphibischen Funktionen vollständig erfüllt werden. Die Funktion der terrestrischen Strukturvielfalt beinhaltet erodierbare Bereiche, welche Totarme, Feuchtmulden und alluviale Trassen umfasst. Diese Funktion kann gemäss Paccaud et al. (2016) erst erfüllt werden, wenn die Mobilitätsbreite grösser als die Wasserspiegelbreite beim gerinnebildenden Abfluss ist. Aufgrund dieser Prämisse kann diese Funktion auf den Abschnitten 1-13 durch den stark eingeschränkten Mobilitätsraum gar nicht erfüllt werden. Die Abbildung 12 zeigt weiter, dass durch die teilweise bewaldeten oder extensiv genutzten Vorländer die Pufferfunktion beinahe vollständig und die terrestrische Längsvernetzung teilweise erfüllt werden kann.

Beim Abschnitt 6 (Gümmenenau) fällt auf, welchen Einfluss die vorhandene Kiesbank am rechten Ufer der Kurveninnenseite auf die Erfüllung der amphibischen Funktion nach Paccaud et al. (2016) hat. Die Begehung vor Ort (Abbildung 23) zeigt jedoch, dass dieser Bereich teilweise mehrjährige Bäume aufweist, was gegen die Einstufung als amphibischer Bereich spricht. Zudem ist erkennbar, dass die Grasnarbe vor kurzer Zeit überspült wurde. Teile der Kiesbank werden beinahe täglich (Anhang A) mehrmals überflutet. Gemäss den kantonalen Gewässerbeurteilungen (BE: GEKOB, 2014), FR: DAEC 2014) resultiert durch diesen Schwall-Sunk (Schwall-Sunkverhältnis bis zu 37) eine grosse Belastung der Biosphäre. Die im Bericht DAEC (2014) erfassten Indikatoren (u.a. Poisson, Reproduction, Biomasse, Makrozoobentos) wurden allesamt als schlecht beurteilt.



Abbildung 23 Kiesbank Abschnitt 6 – Gümmenenau, Karte swisstopo, rechts ausgeprägter Bewuchs innerhalb Uferverbauung trotz beinahe täglicher Überflutung durch Schwall vom WKW Schiffenen.

Trotz des Schiffenenstausees weist der Abschnitt eine mobile Kiessohle auf. Das Geschiebe stammt nach Hunzinger (2014) primär von der Sense.

4.3 Erfüllung ökologischer Funktionen im Projektzustand

Als Projektzustand wurden vier Varianten auf ihren ökologischen Mehrwert gegenüber dem IST-Zustand geprüft. Die Varianten sind in der Tabelle 7 detailliert beschrieben.

Variante 1 – Vergrößerter Gewässerraum innerhalb der Dämme

Die Verbreiterung des Gewässerraumes auf den gesamten Bereich zwischen den äusseren Dammfüssen bei derselben Nutzung (extensive Wiese) führt zu einer geringfügigen Verbesserung (+0 bis 7.2%) der Erfüllung der Funktionen gegenüber dem IST-Zustand. Insbesondere in den Gemeinden, welche einen Gewässerraum von 15 m ausgeschieden haben, könnte der Gewässerraum innerhalb der Dämme vergrössert werden. Dies betrifft die Gemeinden Wileroltigen, Mühleberg sowie Kriechenwil. In Laupen ist unterhalb der Sensenmündung am rechten Flussufer auch ein Gewässerraum von 15 m ausgeschieden. Eine Verbreiterung ist aufgrund der vorhandenen Industrie nicht zweckmässig. Die Verbreiterung des Gewässerraumes führt vorwiegend zur Verbesserung der Pufferwirkung und der terrestrischen Längsvernetzung. Aufgrund der weiterhin verbauten Ufer ist keine Verbesserung der anderen Funktionen zu erwarten.

Variante 2 – Rückbau der Ufersicherungen auf gesamter Länge

Die maximale Ausnutzung des vorhandenen Flussraumes unter Berücksichtigung der vorhandenen Hochwasserschutzdämmen wurde in der Variante 2 untersucht. Die Maximierung der Mobilitätsbreite führt zu einer massiven Verbesserung der aquatischen, amphibischen Milieus und der terrestrischen Strukturvielfalt auf den Abschnitten 1 bis 14 (um 22 - 46%). Auf den eingetieften Abschnitten ist die räumliche Vergrösserung des Mobilitätsraumes durch die anstehende Molasse begrenzt. Damit ist eine Verbesserung der Funktionen nach der Bewertung des SZCA nicht möglich. Die Abbildung 16 zeigt, dass bei den Abschnitten in den Siedlungsgebieten (8, 12 und 13) der Mobilitätsraum aufgrund der vorhandenen Bebauung und Infrastruktur (Brücken) nicht verbreitert werden kann. Die ökologischen Funktionen können auf diesen Abschnitten räumlich nicht verbessert werden. Die Vergrösserung des Mobilitätsraumes bedingt den Rückbau der Uferverbauungen. Damit kann sich das Gewässer eine räumliche Dynamik entwickeln. Diese Dynamik ist hauptverantwortlich für die Aufwertung der aquatischen und amphibischen Lebensräume sowie der terrestrischen Strukturvielfalt. Die Massnahme ist jedoch auch sehr aufwändig und führt durch die mögliche Querschnittsvergrösserung zu einer Veränderung der Morphologie (Geschiebemobilisation und Transport) und damit könnten langfristig auch die Hochwasserschutzdämme durch Ufererosion gefährdet werden.

Variante 3 – partieller Rückbau der Ufersicherung

Der abschnittsweise Rückbau der Ufersicherung hat zum Ziel den Mobilitätsraum wo möglich zu vergrössern und wo nötig den Uferverbau zu belassen. Dadurch kann der Erfüllungsgrad der ökologischen Funktionen gegenüber dem IST-Zustand im Mittel um 15.6% gesteigert werden. Die Mobilitätsbreite wird durch den Uferverbau abschnittsweise stark eingeschränkt. Dadurch können wie im Kapitel 4.2 erklärt die aquatischen Funktionen gemäss Paccaud et al. (2016) nur eingeschränkt erfüllt werden. Ist die Mobilitätsbreite grösser als die Wasserspiegelbreite beim bettbildenden Abfluss, so können die amphibischen Funktionen trotz Uferverbau vollständig erfüllt werden, da dem Gewässer genügend Raum zur Verfügung steht, um einseitig ein flaches Ufer auszubilden (Paccaud et al. 2016).

Der Vergleich der Abbildung 16 und der Abbildung 18 zeigt, dass durch die Reduktion der Mobilitätsbreite auf den Abschnitten 2-7 der Erfüllungsgrad der terrestrischen Längsvernetzung und terrestrischen Strukturvielfalt vermindert wird. Gemäss Paccaud et al. (2016) dient sowohl der terrestrische Mobilitätsraum als auch Gehölze der Längsvernetzung. Die Nutzung der Vorländer als extensive Flächen erfüllt ausschliesslich die Funktion des Pufferstreifens.

Variante 4 – partieller Rückbau der Ufersicherung mit optimierter Nutzung

Nebst dem zur Verfügung gestellten Raum spielt auch die Nutzung eine zentrale Rolle für die Erfüllung der natürlichen Funktionen. In der Variante 4 wird geprüft, inwiefern die ökologischen Funktionen durch die Umnutzung von extensiven Wiesen zu Gehölz/Wald verbessert werden kann. Die Variante 3 dient als Basis.

Wird auf den Vorländern die Entwicklung von Gehölz ermöglicht und die Dämme werden weiterhin als extensive Wiesen bewirtschaftet, so kann der Erfüllungsgrad der ökologischen Funktionen gegenüber der Variante 3 gemäss Abbildung 24 auf den Abschnitten 2 bis 8 leicht gesteigert werden. Bei den Abschnitten 15 bis 18 kann keine Verbesserung erreicht werden, da das aquatische und amphibische Milieu nicht vergrössert wird.

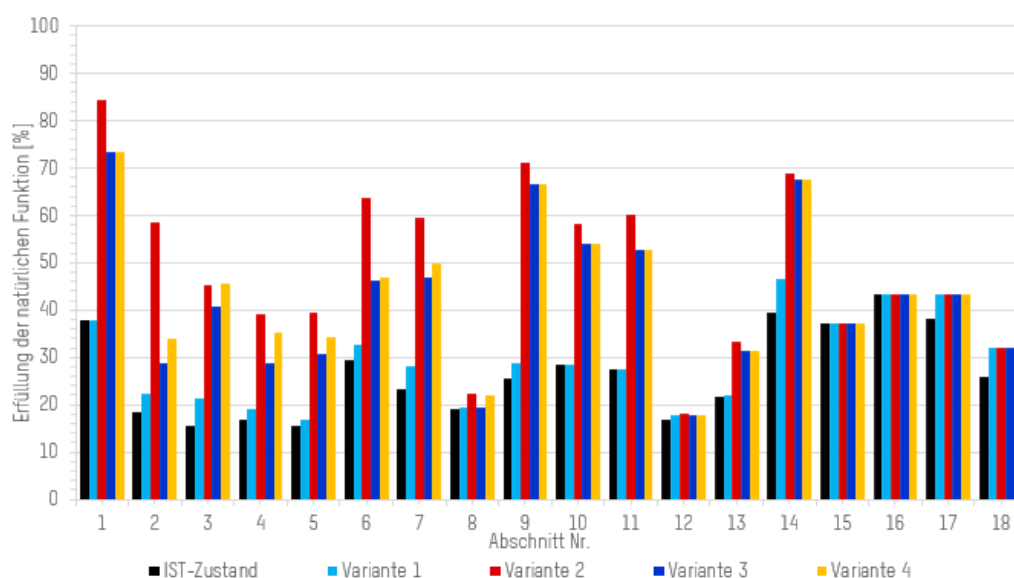


Abbildung 24 Vergleich des Erfüllungsgrads der natürlichen Funktionen für den IST- und den Projektzustand

4.4 Massnahmen im Kontext mit Schwall- und Sunkregime

Die vorgestellten Varianten umfassen die folgenden Massnahmen:

- Vergrösserung des Gewässerraumes
- partieller Rückbau der Ufersicherungen
- Umnutzung des Vorlandes

Die Vergrösserung des Gewässerraumes und die Umnutzung des Vorlandes sind planerische, unterhaltstechnische Massnahmen, welche unabhängig vom Schwall- und Sunkregime des Schifensees umgesetzt werden können. Der Rückbau der Uferverbauungen ist eine bauliche Massnahme, welche den Schwall- und Sunkbereich betrifft. Daher wird diese Massnahme genauer betrachtet.

Im IST-Zustand besteht das Ufer der Saane grösstenteils aus Betonquadern oder grossen Blöcken. Der Uferbereich der Saane ist in der Systemskizze (Abbildung 25) dargestellt. Durch lokale Sohlenerosion und Auswaschen der Kiesschicht unter den Quadern, rutschen diese teilweise ab. Dadurch rutschen die oberliegenden Blöcke nach. Das System funktioniert grundsätzlich weiter im Verbund.

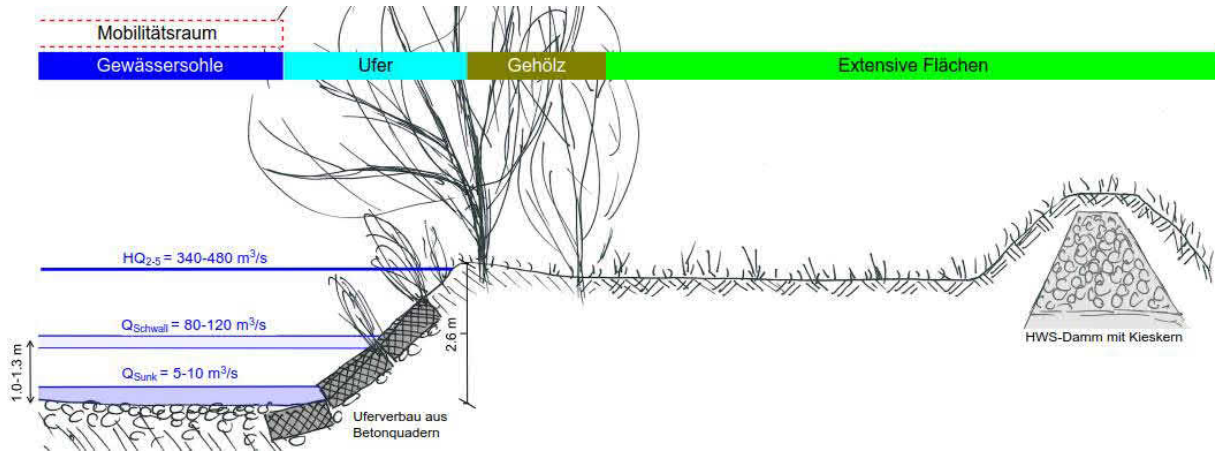


Abbildung 25 Systemskizze IST-Zustand: Sohle, Ufer, Vorland und Damm mit Räumen gem. SZCA

Wird der Uferverbau nun vollständig zurückgebaut, können die Ufer erodiert werden. Die Seitenerosion ist insbesondere in den Kurvenaussenseiten aufgrund von Sekundärströmungen zu erwarten (Requena, 2008). Diese Seitenaufweitung stellt dort kein Problem dar, wo die Erosion durch Felswände langfristig begrenzt wird und damit kein Hochwasserschutzproblem entsteht. In der Abbildung 26 ist der Abschnitt 9 oberhalb von Gümmenen in der Siegfriedkarte (ursprünglicher Zustand), dem Luftbild von 1931 und dem Luftbild von heute dargestellt. Das Luftbild 1931 zeigt, die Verbauung der Saane an diesem Prallhang. In diesem Abschnitt könnte am rechten Ufer die Uferverbauung aus sicht Hochwasserschutz rückgebaut werden. Damit könnte sich der Prallhang bis an die Felswand ausdehnen. Diese Massnahme könnte jedoch zu einer Mobilisierung einer Ruschtung (gemäss Naturgefahrenkarte mittlere Gefährdung) beitragen und müsste daher geotechnisch überprüft werden.



Abbildung 26 Abschnitt 9: Links Auszug Siegfriedkarte 1880, Mitte Luftbild 1931, Luftbild 2018, Swisstopo (2020)

Wie in der Abbildung 25 dargestellt, beträgt die Wasserwechselzone im Betrachtungsperimeter bis zu 1 m. Durch Aufweitungen würde diese Wechselzone in der horizontalen Ausdehnung vergrössert. In Zusammenhang mit der Pegelrückgangsrate könnte diese vergrösserte Zone zum Stranden von Fischen führen (Tonolla, 2017).

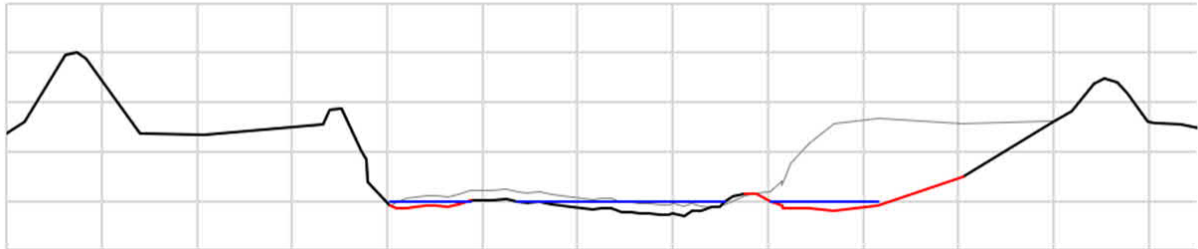


Abbildung 27 Strandungsgefahr in verbleibenden Gerinnen bei Sunk bei einem einseitigen Rückbau der Uferverbauungen: hypothetisches Querprofil im Abschnitt 4: blau Wasserspiegel bei Sunk, rot mögliche verbleibende Tümpel

Gemäss Bruder et. al (2012) entstehen Fischfallen unter anderem durch rasche Abflussabnahme (Abnahme der benetzten Fläche) und einen tiefen Abfluss. Im Betrachtungsperimeter treten beide Situationen auf.

Der Rückbau der Uferverbauungen oberhalb der Wasserwechselzone (Abbildung 28) könnte eine Möglichkeit bieten, das Stranden von Fischen zu Verhindern und gleichzeitig bei grösseren Abflüssen eine gewisse räumliche Dynamik zu ermöglichen.

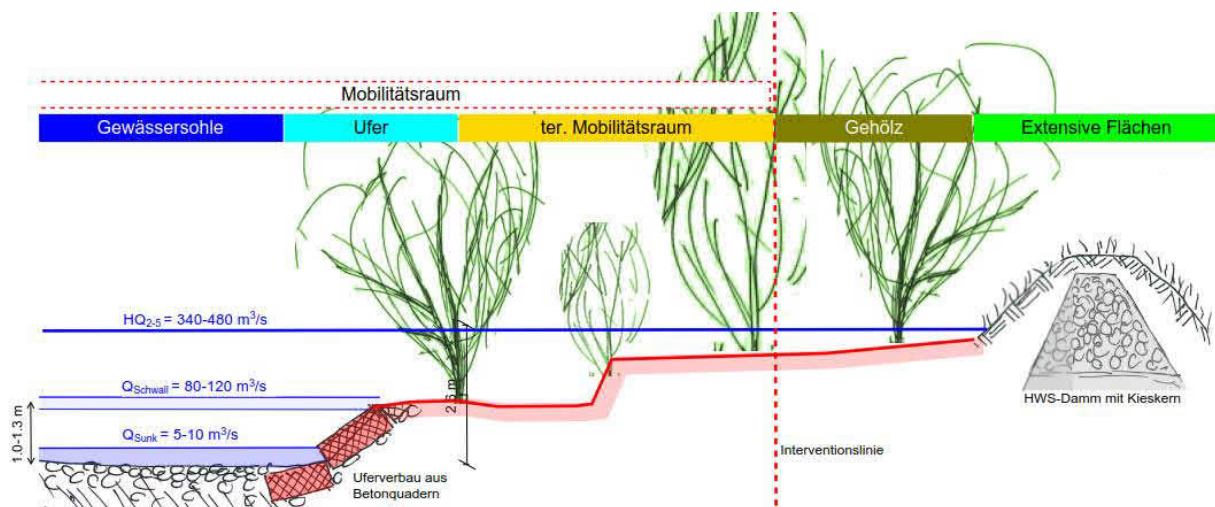


Abbildung 28 Systemskizze Projektzustand: Sohle, Ufer, Vorland und Damm mit Räumen gem. SZCA

Die Gefahr des Strandes von Fischen ist jedoch im Gesamtkontext zu betrachten, denn eine Vergrösserung des Mobilitätsraumes führt zu einer Strukturierung des Gewässers. Kolke, Bänke, Stellen mit Ufererosion und im besten Fall entstehen natürliche Fischunterstände. Diese bieten auch neue Habitate. Durch zusätzliche Strukturierungen mittels Instreammassnahmen bspw. Engineered Log Jam, (Widmer et. al 2019) könnte die Strukturierung der Sohle initialisiert werden. Weiter führt die verbesserte Anbindung von Seitengewässern zu neuen Rückzugsmöglichkeiten trotz Schwall- und Sunk.

4.5 Erfüllung der Funktionen mit Schwall- und Sunkregime

Die Methode nach Paccaud et. al (2016) beurteilt die Erfüllung der natürlichen Funktionen in erster Linie mit dem vorhandenen Gewässer- bzw. Mobilitätsraum. Die Methode setzt faktisch voraus, dass die weiteren Voraussetzung für die erforderliche Dynamik gegeben sind. Das heisst beispielsweise, dass die räumliche Dynamik durch seitliche Erosion im Mobilitätsraum zur Bildung einer terrestrischen Strukturvielfalt und der Ausbildung einer Typischen Vegetation vorausgesetzt wird. Diese räumliche Dynamik kann aber nur mit einer ausreichenden Abflussdynamik erreicht werden. Diese Abflussdynamik ist mit dem vorhandenen Abflussregime des Kraftwerks Schiffenen nicht gegeben. Weiter führt der Schwall-/Sunkbetrieb zu einer ausgeprägten Abpflasterung und Kolmation der Sohle. Die Erfüllung der natürlichen Funktionen kann daher mit dieser methode für eine Schwall- Sunkregime nicht abschliessend beurteilt werden und muss mit Spezialisten für die einzelnen Habitate beurteilt werden.

4.6 Fazit

Der lokale Rückbau der Uferverbauungen vergrössert den Mobilitätsraum. Dadurch wird der Platz für eine räumliche Dynamik geschaffen. Zusammen mit der Vergrösserung des Gewässerraumes auf den gesamten Bereich zwischen den luftseitigen Dammfüssen wird dem Gewässer mehr Platz zur Erfüllung seiner natürlichen Funktionen nach der Definition des SCZA gegeben. Der Erfüllungsgrad der Funktionen wird durch den Rückbau der Ufersicherungen insgesamt von 28% auf 46% erhöht (IST-Zustand zu Variante 4, längengewichtet). Auf den einzelnen Abschnitten kann der Erfüllungsgrad um bis zu 41% verbessert werden.

Die Beurteilungsmethode SCZA basiert auf den morphologischen Kenngrössen: natürliche Gerinnesohlenbreite und Wasserspiegelbreite beim Gerinnebildenden Abfluss. Diese Kenngrössen wurden anhand verschiedener Ansätze hergeleitet und verglichen. Die Diskussion zeigt, dass die Kenngrössen sehr grosse Bandbreiten aufweisen und dass der Einfluss dieser Kenngrössen auf die Bewertung im zweistelligen Prozentbereich liegen kann und daher beträchtlich ist. Die Auseinandersetzung mit den der Methode zugrunde gelegten Annahmen zeigt zudem, dass die korrekte Zuweisung der Flächen zu den Räumen (Sohle, Ufer, Gehölz, usw.) zentral ist für eine repräsentative Auswertung. Kleine Justierungen und Anpassungen der Flächen (Variante 3 zu Variante 4) haben einen Einfluss von mehreren Prozenten auf den Erfüllungsgrad der natürlichen Funktionen. Die Methode nach Paccaud et al. (2016) erfordert aus diesen Gründen eine differenzierte Analyse der morphologischen Kenngrössen und der Raumnutzung. Zudem müssen die zugrunde gelegten Annahmen dieser Methode und insbesondere der Auswertung verstanden werden.

Die Beurteilung der Erfüllungsgrades der natürlichen Funktionen nach Paccaud et al. (2016) betrachtet die räumliche Gliederung und die Dynamik HQ₂₋₅. Die natürlichen Funktionen können jedoch nicht nur mit dem zur Verfügung stehenden Raum erfüllt werden, sondern erfordern ein gesamthaft funktionierendes System. Das heisst nebst der räumlichen Gliederung ist der Geschiebehalt, das Abflussregime und biotische Faktoren zu berücksichtigen. Die räumliche Dynamik beispielsweise kann erst durch eine ausreichend häufige hydraulische Belastung der Ufer erreicht werden. Ist diese

vorhanden wird sich die Saane mit dem Rückbau der Uferverbauungen ihrer ursprünglichen Morphologie des verzweigten Gerinnes annähern.

Mit dem vorhandenen Schwall-Sunkregime besteht unter anderem die Gefahr vom Stranden von Fischen in Seitengrinnen oder den Bänken. Dieser Effekt könnte durch einen teilweisen Rückbau der Uferverbauungen ausserhalb der Wasserwechselzone verhindert werden. Damit bliebe der Schwall-Sunkbereich in einem kanalisiertem Gerinne, die räumliche Dynamik des Gewässers würde dadurch wieder teilweise eingeschränkt. Mögliche neu Fischfallen sind jedoch immer unter im Gesamtkontext der ökologischen Mehrwerte einer Aufweitung zu betrachten.

4.7 Ausblick

In einem weiteren Schritt sind die Aufweitungen hinsichtlich der Eigendynamik und dem Geschiebetransport in der Saane zu untersuchen. Für die weitere Planung der Revitalisierungsmassnahmen sind nebst den Aufweitungen jedoch auch weitere Massnahmen zu prüfen. Beispielsweise ist die Anbindung der Seitengewässer in der Wasserwechselzone der Saane zu prüfen und optimieren. Weiter können durch Instreammassnahmen innerhalb des verbauten Gerinnes Strukturen geschaffen werden, welche allenfalls auch im Schwall-Sunkregime als Habitate funktionieren. Die Funktionsweise solcher Massnahmen wurde bisher nicht untersucht.

Trotz der vereinfachten Methodik zur Beurteilung der Erfüllung der natürlichen Funktionen der Gewässer ist auch künftig der Einbezug von Spezialisten erforderlich. Gemeinsam sollte bereits zu Beginn des Projektes die ökologischen Ziele entwickelt werden. Damit können abschnittsweise die optimalen Massnahmen gefunden werden, um diese Ziele zu erreichen. Zudem können Zielkonflikte in den Auen (Erhalt der heutigen Auen vs. Schaffung von dynamischen Auen) frühzeitig erkannt und diskutiert werden.

5 Literaturverzeichnis

Literatur

- Allan, J. D., Castillo M. M. (2007). Stream Ecology Structure and Function of Running Waters. Second Edition. Springer
- Ahmari, H., Da Silva A. M. F. (2011). Regions of bars, meandering and braiding in da Silva and Yalin's plan. MHR, J. Hydr. Res, 49(6), 718-727. In: Bezzola G. R. (2015)
- Anderson, A. G., Parker, G., Wodd A. (1975). The Flow and Stability Characteristics of Alluvial River Channels. St. Anthony Falls Hydr. Lab. Rep. No.161. In: Requena (2008).
- Ashmore, P. E. (2001). Braiding phenomena: statics and kinetics. In: Gravel-Bed River V (Ed M.P. Mosley), pp. 95-120. New Zealand Hydrological Society, Wellington, New Zealand.
- Bezzola, G. R. (2015). Vorlesungsmanuskript Flussbau, ETH Zürich.
- Bruder et. al (2012), Schwall und Sunk: Auswirkungen auf die Gewässerökologie und mögliche Sanierungsmassnahmen. In Wasser Energie Luft – 104. Jahrgang, Heft 4, Baden.
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (1998): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung von Fliessgewässern in der Schweiz: Ökomorphologie Stufe F, in Mitteilungen zum Gewässerschutz Nr. 27. 51 S.
- Bundesamt für Wasser und Geologie, BWG (2001). Hochwasserschutz an Fliessgewässer. Wegleitung. 72 S.
- BPUK, LDK, BAFU, ARE, BLW (2019). Gewässerraum. Modulare Arbeitshilfe zur Festlegung und Nutzung des Gewässerraums in der Schweiz. 96 S.
- Direction de l'aménagement, de l'environnement et des constructions DAEC (2014), Planifications stratégiques de l'assainissement des cours d'eau. Rapport final, Sarine – Grande Installations. SPC, Fribourg. 89 S.
- Degoutte, G. (2007). Aide mémoire d'hydraulique à surface libre, chapitre 1. Agroparistech. Paris. 32 S.
- Fink, S., Döring, M., Franca, M. J., Martín Sanz, E., Nadyeina, O., Robinson, Ch., Schleiss, A., Scheidegger, Ch. (2017). Dynamik und Biodiversität in Auen. In: Geschiebe- und Habitatsdynamik. Merkblatt-Sammlung Wasserbau und Ökologie. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Merkblatt 5.
- Gewässerentwicklungskonzept Bern – GEKOB (2014). Strategische Planungen nach GSchG/GSchV Revitalisierungsplanung 2016 – 2035. 55 S.
- Regionalübersicht: Sense – Saane- Aare. 13 S.
- Sanierung des Geschiebehaushaltes – Schlussbericht – Gewässersystem Sense-Saane-Aare. 19 S.
- Planung Wiederherstellung Fischwanderung – Schlussbericht. 60 S.
- Strategische Planung Schwall/Sunk – Schlussbericht 69 S.
- Griffiths, G. A. (1981). Stable channel design in gravel-bed rivers. Journal of Hydrology, 52, 291-305. In: Requena (2008).
- Günter, A. (1971). Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannung-

- schwankungen. Mitteilung Nr. 3, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH, Zürich. 76 S.
- Henderson, F. M. (1966). Open channel flow. MacMillan Publishing, New York, 522 pp. In Requena (2008)
- Hunzinger, L. (2014). Sense und Saane. Studie über den Geschiebehaushalt. Erweiterung und Aktualisierung 2014. Flussbau AG SAH im Auftrag von Tiefbauamt des Kantons Bern, Oberingenieurkreis.
- Hunzinger, L., Geisser, S., Stalder, S. (2014). Gewässerentwicklungskonzept Sense21. Systembeschreibung Grundlagenbericht Flussmorphologie und Wasserbau. Flussbau AG SAH im Auftrag von Tiefbauamt des Kantons Bern, Oberingenieurkreis.
- Kummer, M., Baumgartner, M., Devanthery, D. (2007): Restwasserkarte Schweiz. Wasserentnahmen und -rückgaben. Umwelt-Zustand, Nr. 0715. Bundesamt für Umwelt, Bern. 92 S.
- Lange, G., Lecher, K. (1986): Gewässerregelung, Gewässerpflege. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 288 S.
- Millar, R. G. (2005). Theoretical regime equations for mobile gravel-bed rivers with stable banks. *Geomorphology*, 64, 207-220. In: Requena (2008).
- Mosley, M. P. (1983). Response of braided rivers to changing discharge. *Journal of Hydrology*, 22(1), 18-67. In: Requena (2008).
- Paccaud, G., Ghilardi, T., Roulier, C. (2016): «Espace nécessaire aux grands cours d'eau de Suisse (SCZA). Yverdon-les-Bains. inkl. Online-Berechnungstool. 127 S.
Internet-Tool Version 3.0, <http://www.zones-alluviales.ch/OutilGCE/accueil-espace-ce-fr.html>.
Aufgerufen August 2020.
- Parker, G. (1979). Hydraulic geometry of active gravel rivers. *Journal of the Hydraulics Division*, 105(HY9), 1185-1201. in Requena (2008).
- Rosgen, D. (1994). A classification of natural rivers. Pagosa Springs, USA. 31 S.
- Requena, P. (2008): Seitenerosion in kiesführenden Flüssen. Mitteilung Nr. 210, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH, Zürich. 241 S.
- Tonolla D.; Chaix O.; Meile T.; Zurwerra A.; Büsser P.; Oppliger S.; Essyad K. (2017). Schwall-Sunk – Massnahmen. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1701: 133 S.
- Widmer et. al (2019), Planungshilfe Engineered Log Jam (ELJ), Renaturierungsfonds des Kantons Bern.
- Yalin, M. S. (1992). *River Mechanics*. Pergamon Press, Oxford, 219 pp. in: Paccaud et al (2016)
- Zeh Weissmann H., Könitzer Chr., Bertiller A. (2009): Strukturen der Fliessgewässer in der Schweiz. Zustand von Sohle, Ufer und Umland (Ökomorphologie); Ergebnisse der ökomorphologischen Kartierung. Stand: April 2009. Umwelt-Zustand Nr. 0926. Bundesamt für Umwelt, Bern. 100 S.

Gesetze und Verordnungen

- Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz GSchG) vom 24. Januar 1991 (Stand am 1. Januar 2020)
- Gewässerschutzverordnung GSchV, vom 28. Oktober 1998 (Stand am 1. April 2020)

Geodaten und Statistiken

- AGI (2017). Amtliche Vermessung vereinfacht, MOPUBE.
- AWA (2019). Ökomorphologie der Fliessgewässer, OEKOFG.
- BAFU (2016). Vermessung Saane, Aare – Schiffenensee.
- BAFU (2017). Bundesinventar der Auen von nationaler Bedeutung.
- BAFU (2019). Hochwasserwahrscheinlichkeiten (Jahreshochwasser), Saane - Laupen (EDV: 2215)
- BAUF (2020). Hydrologische Daten und Vorhersagen, Saane – Laupen (EDV: 2215)
- Pro Natura (2017). Pro Natura Naturschutzgebiete.

Historische Karten

- Topographische Karte der Schweiz 1:100'000, Dufourkarte, TK100 (1860). Blattnummer/Datenstand 12 (1860)
- Topographischer Atlas der Schweiz 1:25'000. Siegfriedkarte, TA25 (1880). Blattnummer/Datenstand 313 (1879), 315 (1878), 316 (1870), 318 (1874), 329 (1878)
- Topographischer Atlas der Schweiz 1:25'000. Siegfriedkarte, TA25 (1900). Blattnummer/Datenstand 313 (1899), 315 (1899), 316 (1889), 318 (1899), 329 (1899)

Bau und Zonenreglemente

- Gemeinde Bösinghen: Ortsplanung Gemeinbebaureglement und Zonennutzungsplan. Urbaplan Fribourg, Februar 2016
- Gemeinde Kleinbösinghen: Planungs- und Baureglement. Juni 2001
- Einwohnergemeinde Ferenbalm: Baureglement und Zonenpläne. Januar 2014
- Einwohnergemeinde Golaten: Baureglement, 2013
- Einwohnergemeinde Kriechenwil: Baureglement (BR), Mitwirkung, Februar 2020
- Einwohnergemeinde Laupen: Revision der Ortsplanung. Baureglement und Zonenpläne. August 2013
- Einwohnergemeinde Mühleberg: Revision der Ortsplanung. Baureglement (BauR) Zonen- und Schutzzonenplan, April 2008, Nachgeführt bis 2015
- Einwohnergemeinde Wileroltigen: Baureglement. 1992

Anhangsverzeichnis

Anhang A	Grundlagen	1
Anhang B	Historische Karten - Flussraum der Saane 1880	2
Anhang C	Naturnahe Sohlen- und Uferbreite	3
Anhang D	Methode nach SCZA.....	4
Anhang E	Flussraum der Saane 2020.....	5
Anhang F	Raumbedarf nach Service conseil Zone Alluviales.....	6

Anhang A Grundlagen

Charakteristische Korndurchmesser

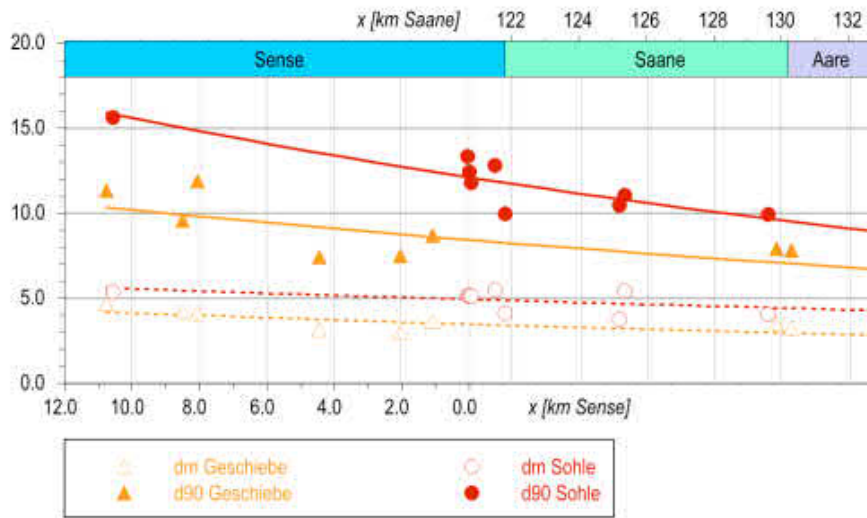


Abbildung A-1: Verlauf der charakteristischen Korndurchmesser entlang der Sense und Saane. Hunzinger (2014).

Beispiel Abflussganglinie Laupen

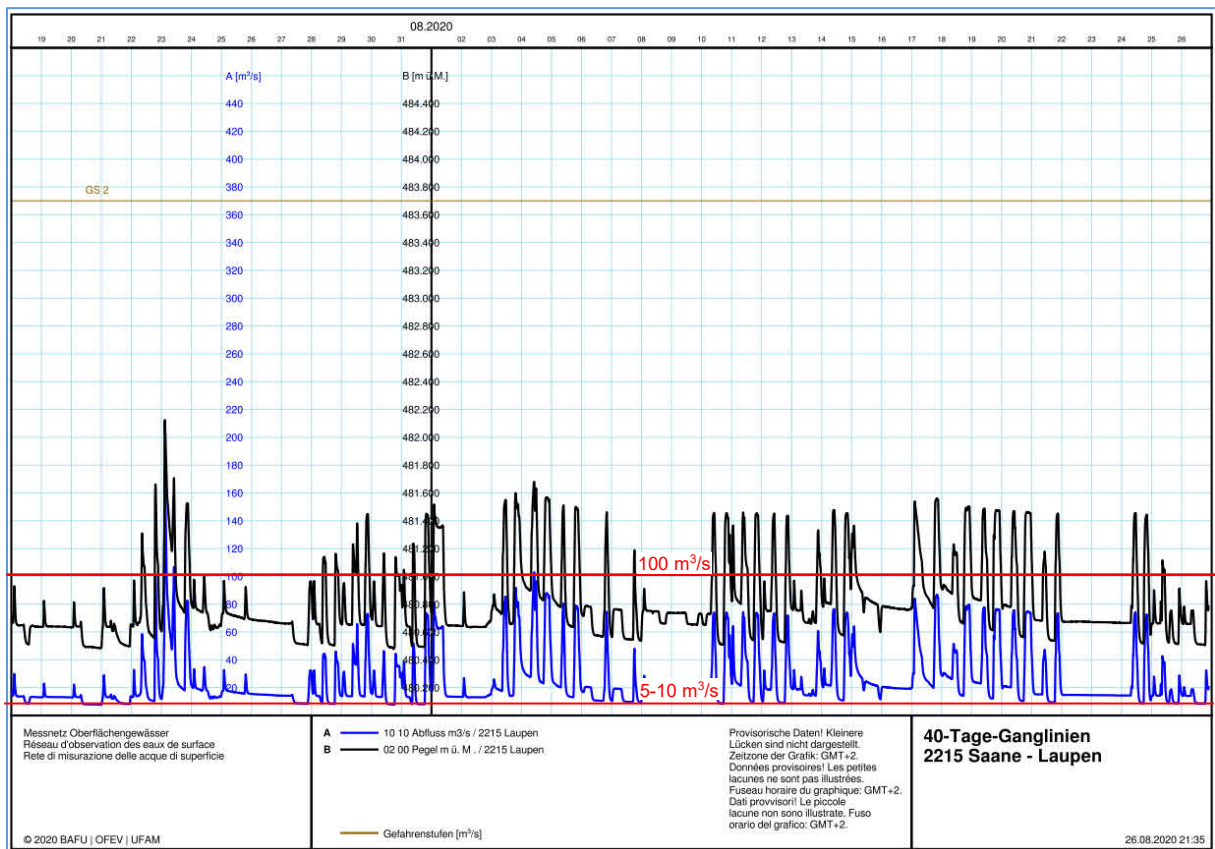


Abbildung A-2: Abflussganglinie der Saane bei BAFU-Messstelle in Laupen (BAFU 2020).

Anhang B Historische Karten - Flussraum der Saane 1880

Planbeilagen 1:20'000:

- Flussraum der Saane 1880 Abschnitte 1 bis 10
- Flussraum der Saane 1880 Abschnitte 10 bis 18

Flussraum der Saane 1880

Abschnitte 1 bis 10

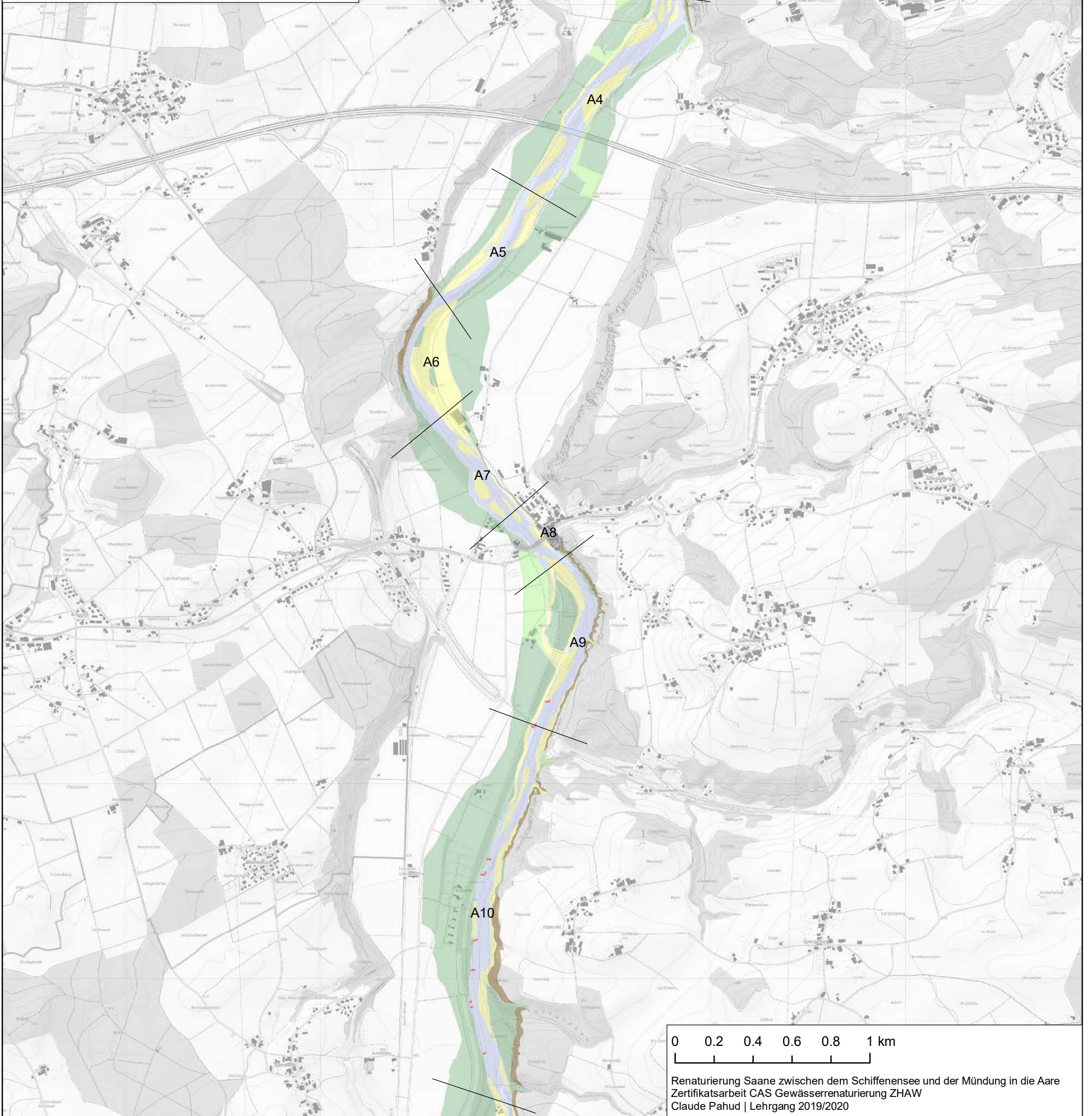
1:20'000

Legende

Flussraum_1880

- Alluvionen
- Auenwald
- Fels
- Flusslauf
- Siedlung
- Strasse
- Verbauung
- Wiese
- FR_Abschnittsgrenzen

Hintergrund Landeskarte 1:10'000
(Bundesamt für Landestopografie swisstopo)



0 0.2 0.4 0.6 0.8 1 km

Renaturierung Saane zwischen dem Schiffenensee und der Mündung in die Aare
Zertifikatsarbeit CAS Gewässerrenaturierung ZHAW
Claude Pahud | Lehrgang 2019/2020

Flussraum der Saane 1880

Abschnitte 10 bis 18

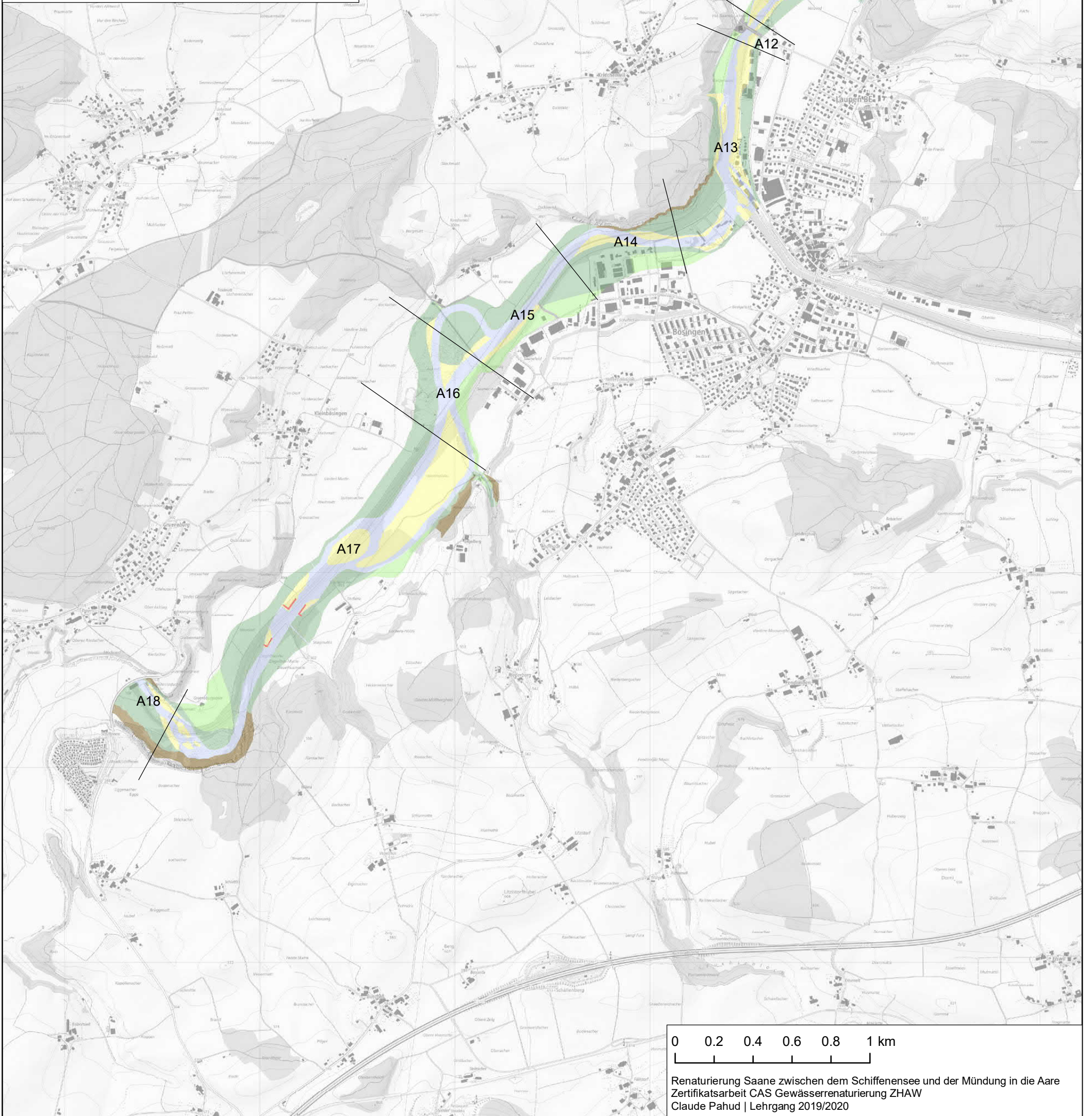
1:20'000

Legende

Flussraum_1880

- Alluvionen
- Auenwald
- Fels
- Flusslauf
- Siedlung
- Strasse
- Verbauung
- Wiese
- FR_Abschnittsgrenzen

Hintergrund Landeskarte 1:10'000
(Bundesamt für Landestopografie swisstopo)



0 0.2 0.4 0.6 0.8 1 km

Renaturierung Saane zwischen dem Schiffensee und der Mündung in die Aare
Zertifikatsarbeit CAS Gewässerrenaturierung ZHAW
Claude Pahud | Lehrgang 2019/2020

Anhang C Naturnahe Sohlen- und Uferbreite

Tabelle C-1 Sensitivitätsanalyse Abfluss, Sohlengefälle und Korngrößen (variierte Werte grau, verwendete Werte blau)

Abfluss Q m^3/s	Eingabeparameter				Gleichgewichtsweite		Grenzweite				
	Sohlengefälle J m/m	mittlere Korngrösse d_{ms} m	mittlere Korngrösse d_{90s} m	mittlere Korngrösse Deckschicht d_{mD} m	Yalin 1992	Parker 1979	Ashmore 2001	Griffiths 1981	Henderson 1966	Millar 2005	Mosley 1983
					b_{eq} m	b_{eq} m	$b_{w,gr}$ m	$b_{w,gr}$ m	$b_{w,gr}$ m	$b_{w,gr}$ m	$b_{w,gr}$ m
342	0.0020	0.035	0.083	0.05	64	90	96	64	45	126	512
342	0.0023	0.035	0.083	0.05	64	90	107	77	53	137	512
342	0.0026	0.035	0.083	0.05	64	90	118	89	61	147	512
300	0.0023	0.035	0.083	0.05	60	85	97	67	46	125	475
340	0.0023	0.035	0.083	0.05	64	90	107	76	52	136	510
400	0.0023	0.035	0.083	0.05	69	98	121	90	62	152	560
480	0.0023	0.035	0.083	0.05	76	107	140	107	74	173	621
500	0.0023	0.035	0.083	0.05	78	109	144	112	77	178	636
342	0.0023	0.020	0.083	0.05	74	90	159	77	53	137	512
342	0.0023	0.025	0.083	0.05	70	90	136	77	53	137	512
342	0.0023	0.035	0.083	0.05	64	90	107	77	53	137	512
342	0.0023	0.040	0.083	0.05	62	90	98	77	53	137	512
342	0.0023	0.045	0.083	0.05	60	90	90	77	53	137	512
342	0.0023	0.035	0.070	0.05	64	90	107	77	53	115	512
342	0.0023	0.035	0.080	0.05	64	90	107	77	53	132	512
342	0.0023	0.035	0.083	0.05	64	90	107	77	53	137	512
342	0.0023	0.035	0.090	0.05	64	90	107	77	53	148	512
342	0.0023	0.035	0.100	0.05	64	90	107	77	53	165	512
342	0.0023	0.035	0.083	0.03	64	117	107	165	114	334	512
342	0.0023	0.035	0.083	0.04	64	101	107	107	74	202	512
342	0.0023	0.035	0.083	0.05	64	90	107	77	53	137	512
342	0.0023	0.035	0.083	0.06	64	83	107	58	40	99	512
342	0.0023	0.035	0.083	0.07	64	76	107	46	32	76	512

Tabelle C-2 Sensitivitätsanalyse natürliche Wasserspiegelbreite und Sohlenbreite nach Paccaud et al. (2016)

Bettbildender Abfluss	Rauhigkeitskoeffizient	Böschungsneigung	Längsgefälle	Anzahl der Abflussrinnen	Breite	Abflusstiefe	Verhältnis b/h	nat. Wasserspiegelbreite	nat. Gerinne-sohlenbreite
Q_{morph} m^3/s	$K_{str,m}$ $m^{1/3}/s$	m	i	n	b m	h m	r	L_{pb} m	L_{fi} m
340	28	0.33	0.0023	1	60	2.03	30	71	57
340	28	0.33	0.0023	1	64	1.95	33	75	61
340	28	0.33	0.0023	1	70	1.85	38	82	69
340	28	0.33	0.0023	1	80	1.70	47	92	80
340	28	0.33	0.0023	1	90	1.59	57	103	92
340	28	0.33	0.0023	1	100	1.49	67	114	104
340	28	0.33	0.0023	1	120	1.33	90	136	127

Abschätzung:

- Böschungsneigung $m = 1/3$ (mittlere natürliche Böschungsneigung)
- Abflussbreite und Abflusstiefe mit Normalabflussberechnung
- Überprüfung der natürlichen Sohlenbreite und der Gerinneform mit Ahmari und DaSilva (2011)

Anhang D Methode nach SCZA

Tabelle D-1: Natürliche Funktionen und deren Gewichtung nach Paccaud et al. (2016)

Milieu	Funktion	relevanter Raum	Grösse	Erfüllungsgrad	Annahme/Bemerkungen
aquatisch	Abfluss und Sedimenttransport	Mobilitätsbreite	< 1/3 L_{fl}	0%	Sobald das Gerinne genügend Raum hat, kann es sich frei entfalten und bildet eine natürliche Sohlenstruktur.
	Strukturvielfalt der Sohle aquat. vertikale und longitudinale Vernetzung		> L_{fl}	100%	
amphibisch	Strukturvielfalt der Ufer laterale und vertikale Vernetzung	Uferbreite	< 2 h_{2-5} > 6 h_{2-5}	0% 100%	Die Uferbreite umfasst die Breite beider Ufer. Diese Funktion wird nur durch den Mobilitätsraum erfüllt (Befestigte Ufer können angerechnet werden, wobei die Neigung der Böschung die Funktion einschränkt)
	Längsvernetzung terrestrischer Habitate	Breite des Vorlandes (pro Seite)	< 5 m > 20 m	0% 100%	Bereiche im und ausserhalb des Mobilitätsraums könne die Funktion der Längsvernetzung erfüllen. Falls sie ausserhalb des Gewässerraumes sind, so muss beidseitig ein Vorland vorhanden sein. Die Längsvernetzung wird durch Wanderhindernisse (Felsen, Zäune, befestigte Strassen, steile Dämme) eingeschränkt.
terrestrisch	Pufferwirkung	Breite der Pufferzone (pro Seite)	0 m 6 m > 20 m	0% 50% 100%	Die Pufferwirkung erfüllt den Schutz vor Schadstoffeintrag und kann aus Gehölzstreifen und extensiver Landwirtschaft erfüllt werden. Der Wert von 6 m wurde in Anlehnung an den Pufferstreifen festgelegt. Die Funktion des Pufferstreifens kann auch Ausserhalb der Mobilitätsbreite in Wald- und auf Extensiv Flächen erfüllt werden.
	Strukturvielfalt der terrestrischen Habitate				Die Strukturvielfalt der Terrestrischen Habitate umfasst all jene Flächen, welche alle paar Jahre durch Hochwasser umgestaltet werden (Pionierstandorte). Diese Funktion kann nur innerhalb der Mobilitätsbreite erfüllt werden
			Verzweigte Gerinne		
			L_{pb}	0%	Allg.
			2.5 L_{pb}	100%	Ausserhalb von Auengebieten
			3.5 $L_{pb}^{1)}$	100% ¹⁾	für Auen (Entwicklung von Hartholzauze)
			Mäander		
			L_{pb}	0%	Bei Mäandern wird die Strukturvielfalt bei einer
			A_{nat}	100%	Breite, welche der natürlichen Mäanderamplitude A_{nat} entspricht erreicht.
	Überflutungsdynamik	Überflutbarer Bereich	L_{pb} 5 L_{pb}	0% 100%	Die Überflutungsdynamik wird nur bei Mäandern berücksichtigt, da die Überflutung gem. Paccaud et al. (2016) nur bei mäandrierenden Flüssen die Vegetation wesentlich beeinflusst.
Entwicklung standortgerechter Lebensgemeinschaften	Mobilitätsbreite	L_{pb} 2.5 L_{pb} 3.5 $L_{pb}^{1)}$	0% 100% 100% ¹⁾	In Auen von nationaler Bedeutung wird die Entwicklung von Hartholzauen angestrebt, daher soll der Mobilitätsbereich dort grösser sein als ausserhalb, wo die Entwicklung von Weichholzauen angestrebt wird.	

1) in Auen von nationaler Bedeutung

Anhang E Flussraum der Saane 2020

Planbeilagen 1:20'000:

- Flussraum der Saane 2000 Abschnitte 1 bis 10
- Flussraum der Saane 2000 Abschnitte 10 bis 18

Flussraum der Saane 2020

Abschnitte 1 bis 10 1:20'000

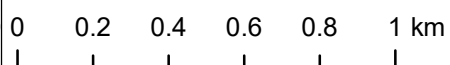
Legende

— FR_Abschnittsgrenzen

Gewässerraum und Naturschutzgebiete

- GWR
- NSG
- ProNatura
- Gebäude
- Strasse
- Trottoir
- Verkehrsinsel
- Bahn
- Wasserbecken
- übrige befestigte
- Acker, Weiher, Weide
- übrige Intensivkultur
- Gartenanlage
- Hoch-, Flachmoor
- übrige humusierte
- stehendes Gewässer
- fließendes Gewässer
- Schilfgürtel
- geschlossener Wald
- übrige bestockte
- Fels
- Geröll, Sand
- Abbau, Deponie

Hintergrund Landeskarte 1:10'000
(Bundesamt für Landestopografie swisstopo)



Renaturierung Saane zwischen dem Schiffenensee und der Mündung in die Aare
Zertifikatsarbeit CAS Gewässerrenaturierung ZHAW
Claude Pahud | Lehrgang 2019/2020

Flussraum der Saane 2020

Abschnitte 10 bis 18

1:20'000

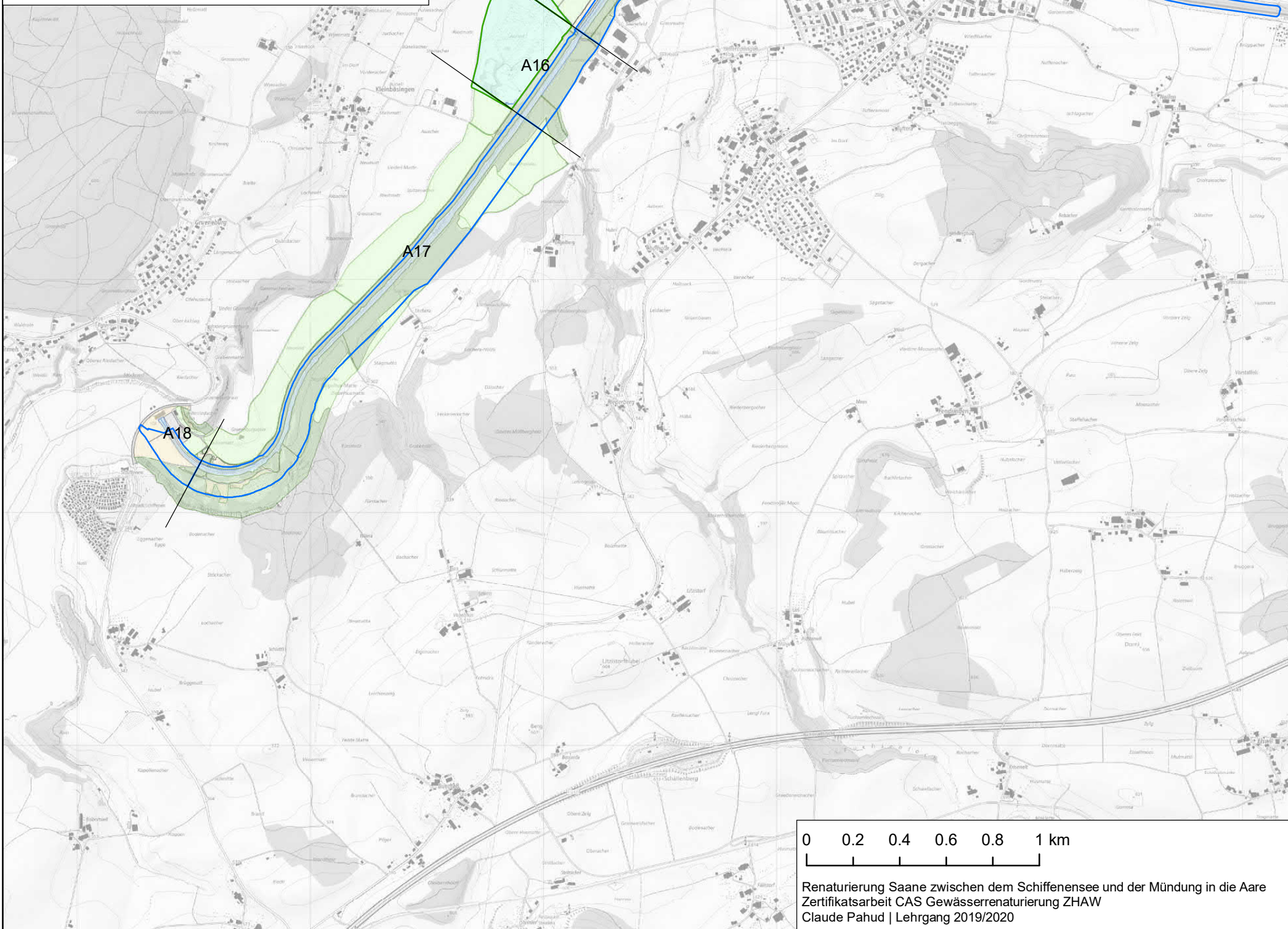
Legende

— FR_Abschnittsgrenzen

Gewässerraum und Naturschutzgebiete

- ▭ GWR
- ▭ NSG
- ▭ ProNatura
- ▭ Gebäude
- ▭ Strasse
- ▭ Trottoir
- ▭ Verkehrsinsel
- ▭ Bahn
- ▭ Wasserbecken
- ▭ übrige befestigte
- ▭ Acker, Weiher, Weide
- ▭ übrige Intensivkultur
- ▭ Gartenanlage
- ▭ Hoch-, Flachmoor
- ▭ übrige humusierte
- ▭ stehendes Gewässer
- ▭ fließendes Gewässer
- ▭ Schilfgürtel
- ▭ geschlossener Wald
- ▭ übrige bestockte
- ▭ Fels
- ▭ Geröll, Sand
- ▭ Abbau, Deponie

Hintergrund Landeskarte 1:10'000
(Bundesamt für Landestopografie swisstopo)

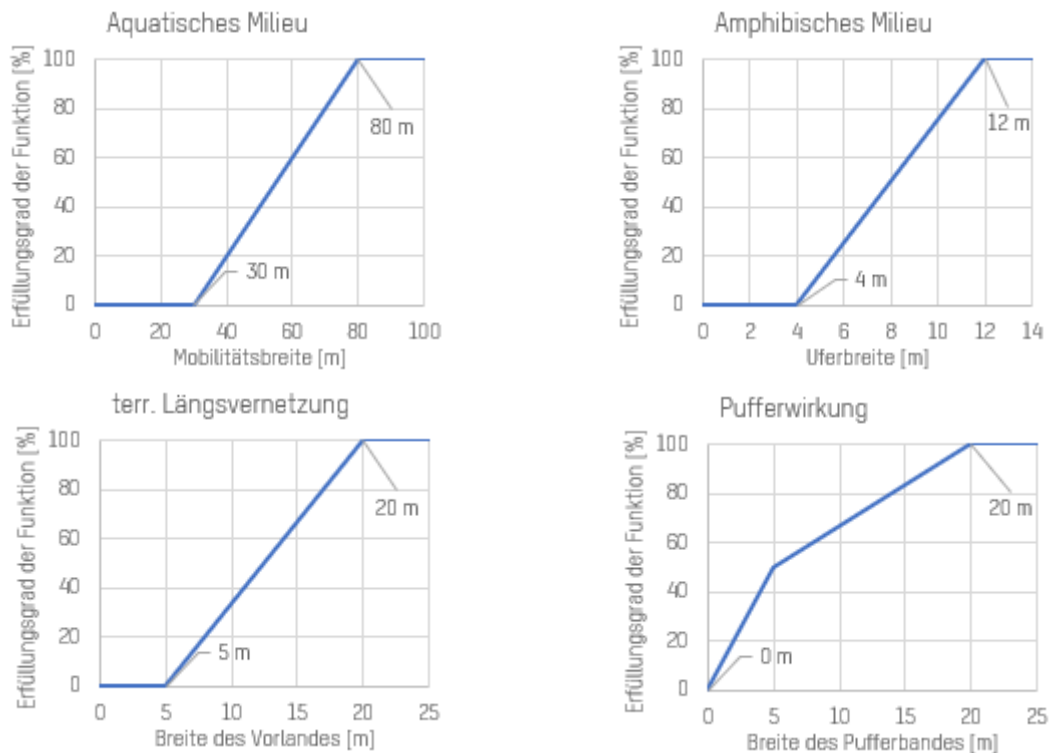


Anhang F Raumbedarf nach Service conseil Zone Alluviales

Tabelle F-1 Festlegung homogene Abschnitte

Nr.	Gewäss. Adr. [m]		Abschnitts- länge [m]	Profilform	Begrenzung Abflussquerschnitt		Gewässerumgebung		Schutzgebiet
	von	bis			links	rechts	links	rechts	
1	0	763	763		Damm	Damm	Aue	Wald, Aue	Ja, beidseitig
2	763	1'362	599		Damm	Damm	Wiese	Hecke	
3	1'362	1'692	330		Damm	Hang/Fels	Wiese	Wald	
4	1'692	2'922	1'230		Damm	Damm	Wiese	Wiese	
5	2'922	3'663	741		Damm	Damm	Wiese	Wiese	
6	3'663	4'375	712		Fels	Damm	Wald	Wald	
7	4'375	4'986	611		Damm	Damm	Wald	Wald, Wiese	
8	4'986	5'330	344		Damm	Damm	Siedlung	Siedlung	
9	5'330	6'282	952		Damm	Hang/Fels	Wald, Aue	Wald, Aue	
10	6'282	8'248	1'966		Damm	Hang/Fels	Wiese, Wald	Wald, Aue	Ja, rechts
11	8'248	8'884	636		Damm	Damm	Wiese, Wald	Wald	
12	8'884	9'020	136		Damm	Damm	Siedlung	Siedlung	
13	9'020	10'086	1'066		Damm	Damm	Wiese, Wald	Siedlung	
14	10'086	10'688	602		Hang/Fels	Damm	Wald	Wald, Siedlung	
15	10'688	11'369	681		Hang/Fels	Damm	Wald	Wald	
16	11'369	11'812	443		Fels	Fels	Wald	Wald	
17	11'812	14'031	2'219		Fels	Fels	Wald	Wald	
18	14'031	14'271	240		Fels	Fels	Wald	Wald	

Tabelle F-2 Schlüsselkurven für die natürlichen Gewässerfunktionen nach Paccaud (2016)



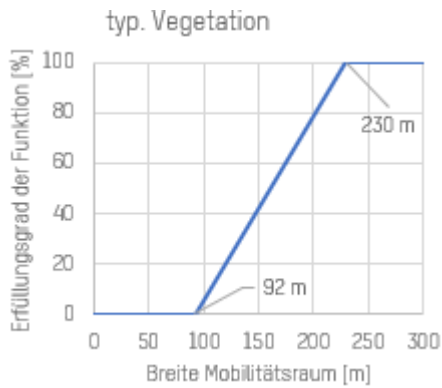
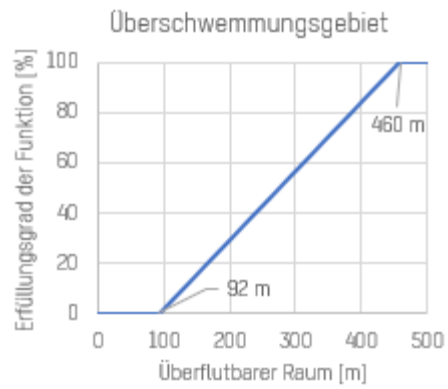
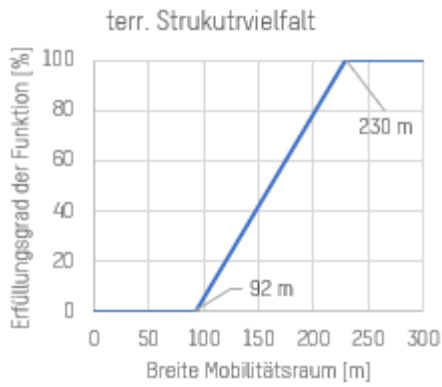


Tabelle F-3 Auswertung IST-Zustand

-	m	(Syntax)	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	ja=1 nein=0
No	Longue ur	StyleF	Lpb	Lfl	Anat	Emob	Eber G	Eber D	Einon dG	Einon dD	Ebois G	Ebois D	Eext G	Eext D	Edur G	Edur D	estZA
1	659	Tresses	92	80.3	0	48	6	67	0	0	30	69	96	21	1	2	1
2	607	Tresses	92	80.3	0	37	3	3	0	0	7	15	6	0	0	0	0
3	326	Tresses	92	80.3	0	36	3	3	0	0	6	9	9	4	0	2	0
4	1'224	Tresses	92	80.3	0	41	3	3	0	0	6	6	9	9	0	0	0
5	733	Tresses	92	80.3	0	36	3	3	0	0	4	6	41	9	0	0	0
6	736	Tresses	92	80.3	0	44	3	13	0	0	36	13	4	2	0	0	0
7	613	Tresses	92	80.3	0	43	3	3	0	0	47	8	25	3	0	0	0
8	346	Tresses	92	80.3	0	45	3	3	0	0	11	0	17	6	1	1	0
9	899	Tresses	92	80.3	0	43	3	3	0	0	50	14	39	0	0	0	0
10	1'965	Tresses	92	80.3	0	42	3	3	0	0	29	94	35	0	0	9	1
11	631	Tresses	92	80.3	0	40	3	3	0	0	31	35	27	0	0	0	0
12	139	Tresses	92	80.3	0	38	3	3	0	0	4	13	6	1	3	1	0
13	1'073	Tresses	92	80.3	0	42	3	3	0	0	21	3	4	8	0	3	0
14	592	Crec	83	69.5	0	27	3	3	0	0	13	42	0	0	0	2	0
15	677	Crec	83	69.5	0	22	3	3	0	0	11	55	23	0	0	4	0
16	443	Crec	83	69.5	0	18	3	3	0	0	39	82	298	0	3	1	1
17	2'219	Crec	83	69.5	0	17	3	3	0	0	15	69	0	0	0	1	0
18	240	Crec	83	69.5	0	8	3	3	0	0	3	24	0	0	10	59	0