

Analyse ausgewählter Objekte des Bundesinventars der Auengebiete von nationaler Bedeutung



Masterarbeit im Bereich Gewässerökologie und Flussbau

Anita Bianchi
Umweltnaturwissenschaften MSc
D-USYS, ETH Zürich

Leitung: Dr. Christine Weber, EAWAG
Betreuung: Cristina Rachelly, VAW, ETH

Abgabe: 9. April 2018

Titelbild: Die Sense ist ein Auengebiet von nationaler Bedeutung (hier: Sense bei Thörishaus, eigene Aufnahme vom 10. März 2018).

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Zusammenfassung.....	iii
Abstract.....	iv
Riassunto.....	v
1 Einleitung	1
1.1 Auen als Hotspot der Diversität.....	1
1.2 Die Bedeutung der Dynamik.....	1
1.3 Fragestellung und Ziele	3
1.4 Interdisziplinarität als Kontext	4
2 Daten und Methoden	5
2.1 Aufbau der Arbeit	5
2.2 Grundlagen.....	6
2.3 I. Phase – Auenauswahl	7
2.3.1 Erste Bereinigung (organisatorisch)	7
2.3.2 Zweite Bereinigung (projektbezogen)	7
2.3.3 Dritte Bereinigung (qualitativ)	10
2.4 II. Phase – Ökologische Untersuchung	11
2.4.1 Auswahl der zu untersuchenden Aspekte	11
2.4.2 Auswahl und Berechnung der ökologischen Indikatoren	11
2.5 III. Phase – Flussbauliche Untersuchung.....	14
2.5.1 Bestimmung des Geschiebedefizits	14
2.5.2 Feldmessung.....	19
2.6 Zusammenhang zwischen Ökologie und Geschiebedefizit	20
3 Resultate	21
3.1 I. Phase – Auenauswahl	21
3.1.1 Erste Bereinigung	21
3.1.2 Zweite Bereinigung.....	21
3.1.3 Dritte Bereinigung	21
3.2 II. Phase – Ökologische Untersuchung	23
3.3 III. Phase – Flussbauliche Untersuchung.....	25
3.3.1 Vorliegende Grundlagen und Auswahl der Auen	25
3.3.2 Hydraulische Resultate	25
3.3.3 Geschiebedefizit	26
3.3.4 Charakterisierung der Gewässer	26
3.3.5 Korngrößenverteilung	27
3.3.6 Innere Kolmation.....	27
3.3.7 Quantitative Ausprägung der Wasserspiegelnbreitenvariabilität.....	27
3.4 Zusammenhänge zwischen Ökologie und Geschiebedefizit	29
4 Diskussion	30
4.1 I. Phase – Auenauswahl	30
4.2 II. Phase – Ökologische Untersuchung	31
4.3 III. Phase – Flussbauliche Untersuchung.....	33
4.4 Zusammenhänge zwischen Ökologie und Geschiebedefizit	36
5 Schlussfolgerungen und Ausblick.....	37
6 Danksagung.....	38
Quellenverzeichnis	39
Abbildungsverzeichnis	43
Tabellenverzeichnis	44
Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole	45

Glossar	47
Verzeichnis der Anhänge	49
Anhänge	50

Zusammenfassung

Flussauen sind Hotspots der Biodiversität und wichtige Elemente der Lebensraumvernetzung. Auen in naturnahen Gewässern weisen eine grosse zeitliche und räumliche Dynamik auf, welche massgebend für die Vielfalt an Lebensräumen ist. Zwei physikalische Grössen kennzeichnen diese Dynamik: die Wasserströmung und der Feststofftransport.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die fehlende Dynamik des Geschiebetransportes als Einflussgrösse auf die Auenökologie untersucht. An ausgewählten Flussauen des Bundesinventars der Auengebiete von nationaler Bedeutung wird folgende Hypothese getestet: Ein zunehmendes Geschiebedefizit reduziert die Vernetzung und die Lebensraumvielfalt in Auen. Zu diesem Zweck werden die ausgewählten Auen ökologisch und flussbaulich analysiert. Die ökologische Untersuchung der ausgewählten Auen erfolgt mit Hilfe von Landschaftsindikatoren und einer Habitatskartierung basierend auf Luftbildern. Untersucht werden folgende ökologischen Aspekte: Uferlänge, Wasserspiegelbreitenvariabilität, Fragmentierung der auentypischen Vegetation und Habitatdiversität innerhalb der gesamten Auenlandschaft. Für die Berechnung des Geschiebetransportes und folglich des Geschiebedefizites wird die Geschiebetransportkapazität berechnet. Dazu werden Daten aus bestehenden Quellen eingesetzt und zum Teil durch eigene Felddaten ersetzt. Zum Schluss wird untersucht, ob und wie sich ein zunehmendes Geschiebedefizit auf ausgewählte ökologische Merkmale der Auen auswirkt, indem die Resultate der ökologischen und flussbaulichen Untersuchung statistisch analysiert werden.

Die sieben ausgewählten Auen befinden sich an der Sense, Thur, Lüttschine, Töss, Glatt, Schwarzen Lüttschine und Kander und lassen sich entlang eines Geschiebedefizitgradienten anordnen. Die untersuchten ökologischen Aspekte weisen eine Variation unter den Auen auf, welche mehrheitlich nicht durch das Geschiebedefizit erklärbar ist. Einzig für die Uferlänge ergibt sich ein signifikanter Zusammenhang mit dem Geschiebedefizit – sie nimmt mit zunehmendem Defizit ab. Eine Tendenz (nicht signifikant) wird auch für die Kolmation der Gewässersohle beobachtet – sie nimmt mit zunehmendem Defizit zu. Neben dem Geschiebedefizit beeinflussen viele weitere Faktoren die räumlichen Muster der Auenökologie, darunter beispielsweise die Zeit.

Abstract

Riverine floodplains are biodiversity hotspots and important elements of habitat connectivity. Floodplains in semi-natural waters show a great temporal and spatial dynamic, which affects the habitat diversity. Two physical variables characterize these dynamics: water flow and transport of solids.

This thesis investigates how the lack of dynamics of bedload transport influences floodplain ecology. The following hypothesis was tested on selected floodplains of the Federal Inventory of Floodplains of National Importance: an increasing bedload deficit reduces connectivity and habitat diversity in floodplains. For this purpose, the selected floodplains were analysed in ecological and river engineering terms. With the aid of landscape metrics and with habitat mapping based on aerial photographs, the following ecological aspects were examined: shoreline length, variability of wetted channel width, clogging of hyporheic sediments, fragmentation of the typical floodplain vegetation, and habitat diversity within the entire floodplain landscape. The bedload transport capacity was calculated in order to determine the bedload transport and, then, the bedload deficit. These calculations were performed with data both from existing sources and from field measurements. Finally, the results of the ecological and river engineering analysis were statistically tested, in order to assess whether and how an increasing bedload deficit affects selected ecological characteristics of the floodplains.

The seven selected floodplains are located on the Sense, Thur, Lütchine, Töss, Glatt, Schwarzen Lütchine, and Kander rivers and can be arranged along a bedload deficit gradient. The floodplains investigated varied in ecological aspects, but these variations could not be explained by the bedload deficit. Only the shoreline length is significantly related to the bedload deficit - it decreases with increasing deficit. A tendency (not significant) is also observed for the clogging of riverbed - it increases with increasing deficit. In conclusion, in addition to the bedload deficit, many other factors influence the spatial patterns of floodplain ecology, including, for example, the temporal factor.

Riassunto

Le golene sono hotspots della biodiversità ed elementi cruciali di connettività tra habitat. Le golene lungo corsi d'acqua perlopiù naturali sono caratterizzate da un'elevata dinamica spaziale e temporale determinante per la ricchezza di habitat. La dinamica è influenzata da due grandezze fisiche: il flusso idrico e il trasporto di materiale solido.

Nell'ambito di questa tesi viene analizzata l'influenza della mancanza di trasporto di materiale solido di fondo sulla dinamica delle golene. L'ipotesi di base – un crescente deficit di materiale solido di fondo riduce la connettività tra gli habitat e la diversità di habitat – viene verificata su un campione di golene catalogate nell'Inventario federale delle zone golenali. A questo scopo viene condotta un'analisi di tipo ecologica e idraulica delle golene scelte. L'analisi ecologica è stata effettuata con l'aiuto di indicatori paesaggistici e di carte di habitat basate su immagini aeree. Gli aspetti ecologici considerati sono i seguenti: la lunghezza delle rive, la variabilità della larghezza della superficie dello specchio d'acqua, la colmatazione interna dell'alveo, la frammentazione della vegetazione golenale tipica e la diversità d'habitat all'interno della golena. Il trasporto del materiale solido di fondo e il deficit supposto è stato quantificato tramite il calcolo della capacità di trasporto. I dati utilizzati per il calcolo provengono da studi esistenti e in alcuni casi da dati rilevati sul terreno. Infine i risultati ecologici e idraulici sono stati analizzati statisticamente per verificare l'ipotesi di una ripercussione del deficit di trasporto di materiale solido di fondo sull'ecologia delle golene.

Le sette golene analizzate si trovano lungo i fiumi Sense, Thur, Lütschine, Töss, Glatt, Schwarze Lüschine e Kander e possono essere ordinate lungo un gradiente secondo il deficit di trasporto di materiale di fondo. Gli aspetti ecologici analizzati in questa ricerca variano da golena a golena e in generale non possono essere spiegati con il deficit del trasporto di materiale solido di fondo. Solo il criterio della lunghezza della riva presenta una relazione significativa con il deficit di materiale solido di fondo. Anche per quanto riguarda la colmatazione interna dell'alveo è stata osservata una tendenza, in maniera poco significativa, con il deficit di materiale solido di fondo: la colmatazione aumenta con l'aumentare del deficit. In conclusione il deficit di trasporto di materiale solido di fondo influenza l'ecologia delle golene solo parzialmente. La dinamica del sistema ecologico è infatti più complessa e composta da altri fattori d'influenza, come ad esempio il fattore temporale.

1 Einleitung

1.1 Auen als Hotspot der Diversität

Auen sind die natürlicherweise von der Dynamik (⇒ Glossar) der Gewässer (Überschwemmung und Grundwasser) geprägten Gebiete der Fließgewässer. Sie werden periodisch oder episodisch durch Hochwasser oder Grundwasseranstieg überschwemmt und sind daher wechselnd Trockenheit, Überflutung, Erosion und Ablagerung unterworfen (Kuhn und Amiet, 1988). Die Landschaft der Flussauen entwickelt sich ständig: Aus der dynamischen Interaktion von Wasser und Geschiebe (⇒ Glossar) werden regelmässig neue Habitatstrukturen im Ökosystem (⇒ Glossar) geschaffen. Die Auen sind ein komplexes, kontrastreiches und sich weiterentwickelndes Mosaik unterschiedlicher Lebensräume: Furt-Kolk Sequenzen (⇒ Glossar) im Gewässer, vegetationsfreie Sedimente, auentypische Vegetation und Auenwälder (vgl. Abb. 1). Aufgrund von starker Gewässerdynamik, hohem Lebensraumreichtum und enger Verzahnung von Wasser und Land gehören die Auen weltweit auch botanisch und zoologisch zu den artenreichsten Ökosystemen (Hauer et al., 2016).

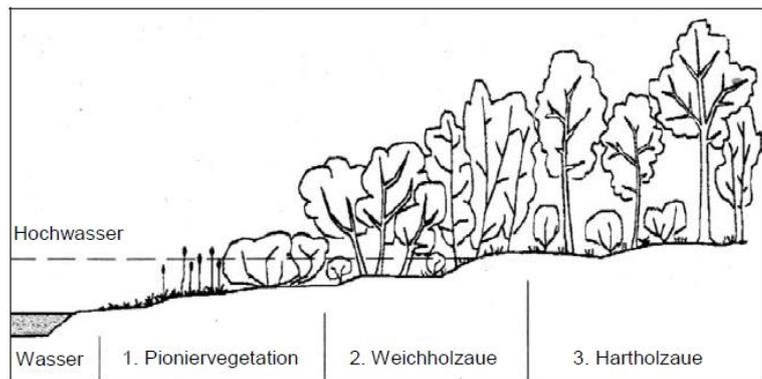


Abb. 1: Auentypische Vegetation (aus Thielen et al. (2002))

Die Auenfläche beträgt mehr als 2 Millionen Quadratkilometer auf der ganzen Welt (Tockner und Stanford, 2002). Die Auen sind die weltweit am meisten produktive Ökosysteme, aber auch die am meisten durch den Mensch veränderten Ökosysteme, demnach verschlechtert sich deren biologische Diversität mit hoher Geschwindigkeit (Tockner und Stanford, 2002; Ward et al., 1999). Viele Feuchtgebiete, zu denen auch Auengebiete gehören, sind in vielen Regionen auf der ganzen Welt zurückgegangen oder verschwunden (Finlayson, 2012; Foote et al., 1996; Jones et al., 1995). Hu et al. (2017) schätzen den globalen Verlust bis 2009 auf 33%, wobei in Europa der grösste Verlust (56%) zu verzeichnen ist. Die Fläche der Auengebiete ist auch in der Schweiz seit Jahrzehnten zurückgegangen (Lachat et al., 2010): die Flussauen hatten 2003 nahezu 63 % der ursprünglichen Ausdehnung vom Jahr 1850 (Müller-Wenk et al., 2003). Gemäss Müller-Wenk et al. (2003) sind die entscheidenden Faktoren für den massiven Auenrückgang die Flusskorrekturen mit nachfolgender Entwässerung und Urbarmachung des Umlands. Zudem wurden viele Wasserkraftwerke und Hochwasserschutzdämme an Gewässern gebaut, welche die Dynamik der Gewässer noch weiter eingeschränkt haben.

Mit der Reduktion der Auenlandschaft sind weltweit starke Bestandseinbussen der auf Auen angewiesenen Pflanzen- und Tierarten verbunden. Der Verlust und die Gefährdung von Flora und Fauna sind auf die abnehmende Qualität und Quantität deren Lebensräume zurückzuführen (Hauer et al., 2016; Lachat et al., 2010). Gemäss Müller-Wenk et al. (2003) verschwinden in der Schweiz die auentypische Pflanzengesellschaften seit dem letzten Jahrhundert aufgrund des Auenschwunds. Das gilt auch für die Tierwelt: Bei allen taxonomischen Gruppen sind die auentypischen Tierarten auf der Schweizer Roten Liste stärker vertreten als jene, die in den übrigen Gebieten der Landschaft zuhause sind (Rust-Dubié et al., 2006). Trotz der reduzierten Flächenausdehnung der Auen können heutzutage 84 % aller heimischen Arten in Auen vorkommen, wobei das Vorkommen von 10 % der einheimischen Tierarten eng an dieses Ökosystem gebunden ist (BAFU, 2017a). Daraus folgt, dass die Auen für die Erhaltung der Biodiversität (⇒ Glossar), insbesondere der auf Auen angewiesenen Arten, von grosser Bedeutung sind. Sie müssen deshalb geschützt werden.

1.2 Die Bedeutung der Dynamik

Die Dynamik ist massgebend für das Vorkommen, die Erhaltung und die Vernetzung (⇒ Glossar) der vielfältigen, naturnahen und artenreichen Lebensräume in den Auengebieten (Tockner und Stanford, 2002). Das konzeptionelle Modell in Abb. 2 stellt eine Übersicht über die vielen möglichen Einflussfaktoren und deren dynamischen Interaktionen in einer Auenlandschaft dar.

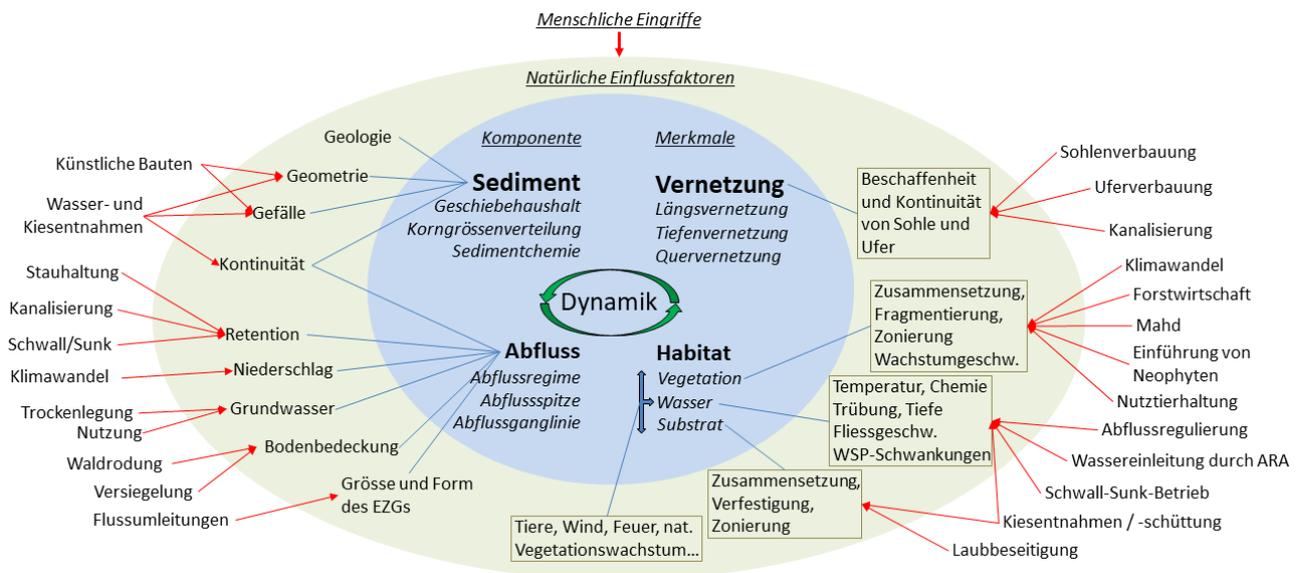


Abb. 2: Konzeptionelles Modell über mögliche Interaktionen und Einflussfaktoren zwischen Ökologie und Geschiebehauhalt welche die räumliche und zeitliche Dynamik in Flussauen ausmachen. Die Komponente Sediment und Abfluss prägen die Flussmorphologie und erzeugen eine zeitliche und räumliche Dynamik, welche die ökologischen Merkmalen Vernetzung und Habitat beeinflusst. Im Zentrum des Modells interagieren die natürlichen Einflussfaktoren, welche durch die menschlichen Eingriffe (rote Pfeile am Rand des Modells) beeinflusst werden können.

Abfluss und Sedimente tragen zusammen zur dynamischen Bildung neuer Lebensräume für spezialisierte Organismen wie Pionierpflanzen und kieslaichende Fische bei. Eine naturnahe Abfluss- und Geschiebedynamik ist generell eine Voraussetzung für ökologisch wertvolle, funktionsfähige und gut strukturierte Fließgewässer und dadurch Flussauen (Di Giulio et al., 2017; Wohl et al., 2015).

Das Wasser ist zugleich Lebensraum und Beeinflussungsfaktor für die biologische Zusammensetzung, Struktur und ökologische sowie geomorphologische Funktion des Auenökosystems, wobei die Beeinflussung vor allem durch die Wassermenge und das Abflussregime gegeben ist (Bunn und Arthington, 2002; Richter et al., 1996). Der Abfluss und das Abflussregime sind von Natur aus dynamisch und durch unregelmässig auftretenden Hochwasserspitze geprägt (Poff et al., 1997). Das Abflussregime kann im Fall von Wasserkraftwerken und Wasserentnahmen verändert werden: Die im Sommer aufgrund der Schneeschmelze natürlich hohen Abflüsse werden durch Stauhaltung gedämpft, im Winter geschieht eher das Gegenteil. Durch den Schwall-Sunk-Betrieb (\Rightarrow Glossar) entsteht eine künstliche Abfolge von Abflusszuständen mit variabler Ausprägung der Abflussspitze und des Niedrigwassers. Flussabwärts von Wasserkraftwerken und –entnahmenstellen, in der sogenannte Entnahme- oder Restwasserstrecke (\Rightarrow Glossar), beträgt der Abfluss nur einen Teil der natürlichen Abflussmenge und wird als Restwasser bezeichnet.

Aus ökologischer Sicht braucht es aus mehreren Gründen eine natürliche Abflussdynamik und ausreichend Wasser im Bett: Die aquatische Arten und deren Lebensstrategien sind an natürliche Abflussregime angepasst, der Abfluss ist verantwortlich für die Erhaltung der natürlichen Lebensraumvernetzung und die Lebensfähigkeit vieler auentypischer Arten (Bunn und Arthington, 2002). Die Abflussdynamik kann aber bei Wasserentnahmenstellen fehlen und im Fall von Schwall-Sunk-Betrieb künstlich zu ausgeprägt sein. Dabei besteht die Gefahr, dass die aquatischen Organismen bei Schwall weggespült werden, während sie bei Sunk am Ufer stranden (Bruder et al., 2012). Die Restwassermenge (\Rightarrow Glossar) entspricht oft nicht den erforderlichen Mindestrestwassermengen. Das hat zur Folge dass die laterale Vernetzung stark eingeschränkt und die Anzahl der aquatischen Organismen auf den Schotterbänken reduziert wird (Baumgartner, 2017; Martín Sanz, 2017). Neben der Wassermenge sind auch Wassertemperatur, -chemie, -trübung, -tiefen und Fließgeschwindigkeit von Bedeutung.

In ihren unterschiedlichen Lebensphasen sind viele aquatische und auentypische Organismen auf gewisse Flächengrößen und Kornverteilungen des Sohlsubstrats, im Allgemeinen auf eine zeitliche und räumliche Dynamik der Sedimente, angewiesen (Allan und Castillo, 2007; Wohl et al., 2015). Das Sedimentmaterial wird in der Regel in Schwebstoffe und Geschiebe unterteilt. Die Schwebstoffe sind die feineren Sedimente, nämlich Ton, Silt und feiner Sand, die in Suspension transportiert werden, während das Geschiebe den größeren Teil des transportierbaren Materials bezeichnet: Blöcke, Steine, Kies und Sand mit Durchmesser > 5 mm. Das Geschiebe wird gleitend, rollend oder springend über die Gewässersohle transportiert (Bezzola, 2016; Leopold et al., 1964). Die Kornverteilung des Sohlsubstrats ist sehr wichtig als Lebensraum für benthische Makroinvertebraten sowie als Laichgebiet für die kieslaichenden Fische wie die Äsche (Kondolf und Wolman, 1993). Die Geschiebeumlagerung ist ebenfalls von Bedeutung für die Entstehung von Mikrohabitaten für amphibische und terrestrische Arten sowie für das Vorkommen von Pionierarten auf Kiesbänken (Di Giulio et al., 2017).

Durch anthropogene Eingriffe in die Flusslandschaft, unter anderem die Regulierung der geschiebeführenden Flüsse und Hochwasserschutzbauten, hat sich einerseits die Feststofftransportkapazität erhöht, andererseits wurde der Geschiebetransport reduziert oder ganz unterbunden. Gemäss Schälchli et al. (2005) führt dieses unausgeglichene Verhältnis zu einem Geschiebedefizit, welches eine Ausräumung und Eintiefung der Flusssohle bewirken kann. Dadurch sinkt der Grundwasserspiegel. All dies hat auch ökologische Folgen: Flussauen, insbesondere die Auenwälder, werden durch Eintiefung der Sohle, Absenkung des Grundwasserspiegels und eventuell vorhandene Uferverbauung von der Fliessgewässerdynamik abgekoppelt (Di Giulio et al., 2017).

Bei der Abkopplung der Aue von ihrem Flussbett und bei fehlender Dynamik ist die Vernetzung der Auenlebensräume gefährdet. Es können drei Ebenen der Vernetzung unterschieden werden: longitudinal, lateral und vertikal (vgl. Glossar). Im Rahmen dieser Arbeit werden die laterale und die vertikale Vernetzung untersucht. Bei einer Beeinträchtigung der lateralen Vernetzung ist ein Verlust von Laich-, Aufwuchs-, Versteckplätzen und im Allgemeinen von Lebensräumen zu erwarten (Wohl et al., 2015). Die laterale und vertikale Vernetzung der Auenlandschaftselemente sind auch für den Austausch und für Kreisläufe von Nährstoffen, Energie und Organismen zwischen Gewässer, Land und Grundwasser von grosser Bedeutung (Allan und Castillo, 2007).

1.3 Fragestellung und Ziele

Mit dieser Masterarbeit sollen Fragen zum Geschiebehaushalt und den ökologischen Merkmalen wie Vernetzung und Habitatstrukturen der Auengebiete beantwortet werden. Folgende Fragen stehen im Vordergrund: *In welchem ökologischen und flussbaulichen Zustand liegen die Schweizer Flussauen heute vor? Beeinflusst der Geschiebehaushalt die Auenökologie? Welche Habitatstrukturen und Funktionen können Flussauen anbieten und leisten unter einem unausgeglichene Geschiebehaushalt?*

Um Antworten auf obige Fragestellungen zu finden, wurde zuerst ein Auswahlprozess für die zu untersuchenden Auenobjekte entwickelt. Anhand von Geodaten und Erhebungen im Feld wurden anschliessend einige Zusammenhänge zwischen Geschiebehaushalt und ausgewählten ökologischen Merkmalen untersucht, wobei folgenden Hypothesen formuliert wurden:

- H1: Die Wasserspiegelbreitenvariabilität nimmt mit zunehmendem Geschiebedefizit ab.
- H2: Die Länge der Uferlinie nimmt mit zunehmendem Geschiebedefizit ab.
- H3: Der Fragmentierungsgrad der Vegetation nimmt mit zunehmendem Geschiebedefizit ab.
- H4: Die Dominanz einzelner Habitatstypen nimmt mit zunehmendem Geschiebedefizit zu.
- H5: Die Kolmation der Gewässersohle nimmt mit zunehmendem Geschiebedefizit zu.

Die Hypothesen H1 und H2 lassen sich dadurch begründen, dass bei einem Geschiebedefizit das Sohlenmaterial erodiert wird und sich die Flusssohle dadurch eintieft (Schälchli et al. (2005)). Der Talweg wird zu einem Kanal mit geradlinigen Ufern und die Breite ist durchgehend homogen (Kondolf, 1997).

Die Hypothesen H3 und H4 sind ebenfalls eine Folge des Geschiebedefizites: Mit der dadurch verursachten Sohleneintiefung nimmt die Abflusskapazität des Gerinnes zu und die Häufigkeit von Überschwemmungen nimmt ab (Bezzola, 2016). Aus der Reduktion von Häufigkeit, Dauer und Fläche der Überschwemmungen von Auen folgt eine geringere Störung des Auenwaldes, wodurch er weniger fragmentiert und stabiler ist. Das führt zu einem Rückgang der auentypischen Vegetation (Kingsford, 2000).

Der Hintergrund für Hypothese H5 ist die Tatsache, dass bei einem Geschiebedefizit und folgender Sohlenerosion eine zunehmende Ausbildung der Deckschicht bis zur vollständigen Abpflasterung stattfinden kann (Kondolf, 1997). Die Sohle ist durch fast einheitlich grosse dachziegelartig gelagerte Steine abgedeckt und ist weitgehend kolmatiert. Eine Dekolmation der Sohle findet immer seltener statt und zwar nur noch bei sehr grossen Hochwasserereignissen (Schälchli, 2002).

1.4 Interdisziplinarität als Kontext

Diese Arbeit hat einen interdisziplinären Charakter: Sie untersucht sowohl ökologische als auch flussbauliche Merkmale der Auengebiete sowie ihren Zusammenhang. Sie findet im Rahmen des Forschungsprojektes „Lebensraum Gewässer – Sedimentdynamik und Vernetzung“ des Forschungsprogramms „Wasserbau und Ökologie“ des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) statt.

Das Forschungsprogramm fördert die angewandte und praxisorientierte Forschung im Bereich Wasserbau und Ökologie durch Erarbeitung wasserbaulicher und ökologischer Grundlagen für die Bewältigung aktueller Herausforderungen im Umgang mit Fließgewässern. Dadurch wird der Dialog zwischen Forschung und Praxis sowie die Planung und Umsetzung in der Praxis unterstützt. Am Programm mitbeteiligt sind vier Institutionen des ETH-Bereichs (Eawag, LCH-EPFL, VAW-ETHZ, WSL) sowie Praxispartner.

Das Programm ist in mehrjährigen Forschungsprojekten organisiert. Für den Zeitraum 2017-2021 heisst das Forschungsprojekt „Lebensraum Gewässer – Sedimentdynamik und Vernetzung“. Die zentralen Themen dieses Forschungsprojektes sind die Sedimentdynamik und die Vernetzung, welche in 13 Teilprojekten erforscht werden. Diese Masterarbeit stellt die Grundlage für weiterführende Arbeiten in den drei folgenden von Eawag und VAW koordinierten Teilprojekten dar:

- TP1: Induzierte eigendynamische Flussaufweitungen (VAW, bearbeitet von C. Rachelly als Doktorarbeit)
- TP8: Geschiebedynamik und seitliche Vernetzung in Flussauen (Eawag)
- TP9: Resilienz und Resistenz von Flussökosystemen (Eawag, betreut von Dr. C. Weber)

Genauere Informationen zum Forschungsprojekt sind im Projektantrag ans BAFU zu finden (Eawag et al., 2016).

2 Daten und Methoden

2.1 Aufbau der Arbeit

Um die formulierten Hypothesen zu testen, werden in dieser Arbeit ausgewählte Auenobjekte des Bundesinventars analysiert. Die Auenobjekte sind hinsichtlich des Geschiebehaushaltes und der ökologischen Aspekte zu untersuchen, wobei sie entlang eines Geschiebedefizitgradienten ausgewählt werden.

Die Analyse ist in drei Phasen gegliedert (Abb. 3), welche nacheinander durchgeführt werden. Das heisst, dass in einer Phase die Auenobjekte analysiert werden und dann nach gewissen Kriterien eine Anzahl davon ausgewählt wird, welche in der folgenden Phase weiter untersucht werden.

Die erste Phase dient dazu, eine gut strukturierte Übersicht über das Aueninventar zu erhalten und basierend auf Bereinigungskriterien eine Auswahl der zu untersuchenden Auen zu treffen.

In der zweiten Phase erfolgt eine vertiefte ökologische Untersuchung von 15 ausgewählten Auenobjekten. Die Auenökologie wird hinsichtlich Vernetzung und Habitatstrukturen mittels ausgewählter Indikatoren (⇒ Glossar) verglichen.

Die dritte Phase besteht aus einer flussbaulichen Untersuchung von 7 ausgewählten Auen durch Berechnung des Geschiebetransportes. Vier Auenobjekte werden zudem mittels Begehungen und Erhebungen von Messgrössen genauer charakterisiert. Das Hauptziel der Geschiebetransportberechnung ist die Bestimmung des Geschiebedefizites in den Auen.

Die Beziehungen zwischen den Resultaten der ökologischen und flussbaulichen Untersuchung werden zum Schluss mit Hilfe einer linearen Regressionsanalyse untersucht, um die Richtigkeit der Hypothesen zu testen.

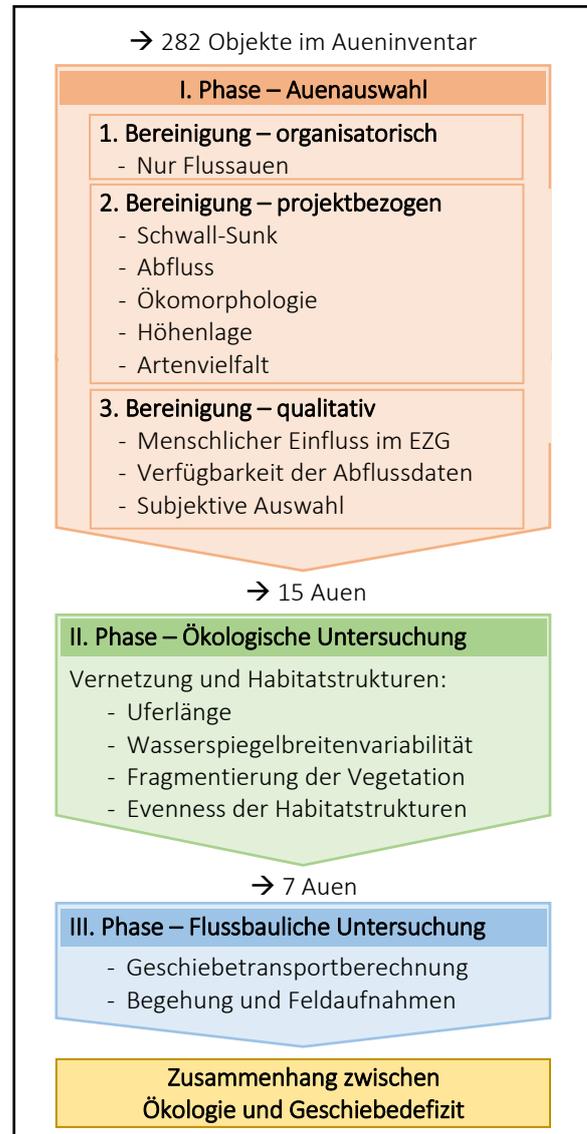


Abb. 3: Gliederung der Arbeit in drei Phasen

2.2 Grundlagen

Das Bundesinventar der Auen von nationaler Bedeutung stellt die Startgrundlage dieser Arbeit dar (mehr Info zum Inventar in Abb. 4). Vom Inventar werden alle Flussauen entnommen, einige davon ausgewählt und dann analysiert.

Die Studie von Hanus et al. (2014), welche eine Klassifizierung von 217 Auengebieten des Bundesinventars bezüglich des Geschiebedefizits, der Beeinträchtigung des natürlichen Abflusses (inkl. Schwall-/ Sunk-Betrieb) und des Bedarfs an Revitalisierung (⇒ Glossar) beinhaltet, wird in die Analyse einbezogen.

In Tab. 1 sind die Geodaten zusammengefasst, welche zusätzlich als Grundlage für die Auenauswahl und die ökologische Untersuchung (I. bzw. II. Phase der Analyse) dienen. Für die III. Phase – Flussbauliche Untersuchung wurden die in Tab. 2 zusammengefassten Grundlagen verwendet.

Geschichte und Entwicklung des Aueninventars

Mit dem Inkrafttreten der Verordnung von 1992 über den Schutz der Auengebiete von nationaler Bedeutung (SR 451.31; nachfolgend: Auenverordnung) wurden die wertvollsten Auen der Schweiz in einem Inventar festgelegt und unter Schutz gestellt. Die Auenverordnung bezweckt die Erhaltung der Auen von nationaler Bedeutung, und dadurch auch der auentypischen einheimischen Tier- und Pflanzenarten sowie der natürlichen Dynamik der Sedimente und des Abflusses (Auenverordnung (Art. 4)). Das im Anhang der Auenverordnung verankerte Inventar teilt die Schutzobjekte in 5 Haupttypen ein: Gletschervorfelder, alpine Schwemmebenen, Flussauen, Deltas und Seeauen. Bis vor kurzem gab es im Inventar 283 Schutzobjekte, welche mit einer Gesamtfläche von 226 km² ca. ein halbes Prozent der Landesfläche der Schweiz abdecken (Auenberatungsstelle, 2008). Seit der Revision vom November 2017 enthält das Inventar 326 Schutzobjekte.

Abb. 4: Exkurs zum Aueninventar

Tab. 1: Verwendete Geodaten für Phase I und II (weitere Informationen sind im Quellenverzeichnis zu finden).

Daten	Quelle/Datenherr	Beschreibung
Bundesinventar der Auengebiete nationaler Bedeutung	(BAFU, 2007)	Kartierung der 283 Auengebiete im Bundesinventar
Ökomorphologie Stufe F	(BAFU, 2013b)	Bewertung der Ökomorphologie (⇒ Glossar)
Fliessgewässerabschnitte mit hoher Artenvielfalt oder national prioritären Arten	(BAFU, 2013a; Schmidt und Fivaz, 2013)	Für jeden Abschnitt wurden die vorkommenden Arten aus den Datenzentren ermittelt und die Artenvielfalt bestimmt.
Basismessnetz Oberflächengewässer	(BAFU, 2017b)	Standorte der Stationen der hydrologischen Messstationen des BAFUs. Stand: Jahr 2017
Kantonale und private Messstationen (HADES 5.1.2)	(BAFU, 2000)	Standorte der hydrometrischen Messstationen von Kantonen und Privaten. Stand: Jahr 2000.
Einzugsgebietsgliederung Schweiz	(BAFU, 2015a)	Flächendeckendes Mosaik aus über 22'000 topographisch definierten Teileinzugsgebieten von 2 km ² , zusammen mit Angaben zu Bodennutzung, Physiogeographie und modellierten Abflüssen.
Habitatzusammensetzung	(WSL, 2017)	Habitatzusammensetzung der Auen nationaler Bedeutung basierend auf Luftbildkartierung im Rahmen der Wirkungskontrolle Biotopschutz Schweiz WBS.

Tab. 2: Vorliegenden Geschiebehaushaltsstudien und amtlichen Vermessungen (weitere Informationen sind im Quellenverzeichnis zu finden).

Geschiebehaushaltsstudien		Vermessungen	
[1]	Geschiebehaushalt Kander	[2]	Flussvermessung Kander
[3]	Geschiebehaushalt Töss	[4]	Flussvermessung Töss
[5]	Sanierung des Geschiebehaushaltes im Kanton Bern – Gewässersystem Sense-Saane-Aare	[6]	Flussvermessung Sense
[7]	Sanierung des Geschiebehaushaltes im Kanton Bern – Gewässersystem Lüttschine	[8]	Flussvermessung Vereinigte Lüttschine
[9]	Geschiebehaushalt Thur und Einzugsgebiet. Projekt 4: Glatt	[10]	Flussvermessung Schwarze Lüttschine
[11]	Geschiebehaushalt Thur und Einzugsgebiet. Synthesebericht	[12]	Flussvermessung Thur

2.3 I. Phase – Auenauswahl

Das Ziel der ersten Phase ist es, ein konzeptionelles Modell über mögliche Interaktionen und Einflussfaktoren für den Zusammenhang Geschiebehaushalt und Auenökologie zu entwickeln. Und gleichzeitig einen Überblick über das Aueninventar zu erhalten, indem die Datensätze zu den Auenobjekten strukturiert und kategorisiert werden. Mittels dieser geschaffenen Übersicht und in Abstimmung mit den Bedürfnissen des Forschungsprojektes gemäss Eawag et al. (2016) wird anschliessend eine Auswahl von 15 Auen getroffen, welche in der zweiten Phase weiter analysiert werden. Die erste Phase gliedert sich in drei Bereinigungen der Daten: eine organisatorische, eine projektbezogene und eine qualitative Bereinigung.

2.3.1 Erste Bereinigung (organisatorisch)

Diese ist eine Basisbereinigung, damit die Daten konsistent sind und der Aufgabenstellung dieser Masterarbeit entsprechen. Vom Bundesinventar¹ werden nur die Objekte vom Typ „Flussauen“ ausgewählt. Im Datensatz von Hanus et al. (2014) gibt es eine wertvolle Angabe zum aktuellen Zustand der Typologie. Die Typologie einer Aue kann sich durch eine durch den Mensch eingerichtete Stauhaltung ändern (Flussaue wird zu Seeaue). Diese wird als Ergänzung zur Typklassifikation vom Bundesinventar bei der Auenauswahl auch berücksichtigt. Zudem sind im Datensatz von Hanus et al. (2014) für einige Auen Objektunterteilungen mit unterschiedlichen Bewertungen vorhanden. Dies ist zum Beispiel der Fall bei einem eventuell nicht zusammenhängenden Auengebiet mit unterschiedlichen Merkmalen in seinen Gebietsteilen, beispielsweise wenn ein Auengebiet um einen See und das darin einmündenden Gewässer ausgeschieden wurde. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine konservative Annahme getroffen, indem die aus ökologischer Sicht schlechteste Bewertung eines Teiles für das ganze Auengebiet übernommen wird.

2.3.2 Zweite Bereinigung (projektbezogen)

An dieser Stelle wird versucht, den Einfluss des Geschiebedefizits auf die Auendynamik isoliert zu betrachten, um Zusammenhänge zwischen dem Geschiebehaushalt und der Auenökologie zu identifizieren. Dabei hilft es, zwei Bedingungen zu erfüllen.

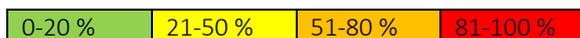
Erstens sollen die zu untersuchenden Auensysteme an Gewässern mit unterschiedlich stark beeinträchtigtem und damit unterschiedlich dynamischem Geschieberegime liegen. Somit gibt es im Datensatz ein Gradient des Geschiebedefizits. Als Hilfe für die Auenauswahl wird die Klassifikation zur Beeinträchtigung des Geschiebehaushaltes von Hanus et al. (2014) übernommen. Die Beeinträchtigung kann als Geschiebedefizit *GD* gegenüber dem natürlichen Zustand wie folgt ausgedrückt werden:

$$GD = \frac{GF_{\text{natürlicher Zustand}} - GF_{\text{aktueller Zustand}}}{GF_{\text{natürlicher Zustand}}} [\%] \quad (Gl. 1)$$

$GF_{\text{natürlicher Zustand}}$ jährliche transportierbare Geschiebefracht im natürlichen Zustand [m^3/Jahr]

$GF_{\text{aktueller Zustand}}$ jährliche transportierbare Geschiebefracht im aktuellen Zustand [m^3/Jahr]

In Rahmen dieser Arbeit wird das Geschiebedefizit anhand des folgenden Farbgradienten dargestellt:



Zweitens sollte es weitere auenbeeinflussenden Faktoren möglichst nicht geben, da sonst die Natürlichkeit der Auen und der Geschiebehaushalt selbst beeinflusst werden. Neben den in der Einleitung bereits erwähnten beiden Einflussfaktoren Schwall-Sunk und Restwasser werden im Rahmen dieser Bereinigung noch drei Faktoren, nämlich Ökomorphologie, Höhenlage und Artenvielfalt, einbezogen. Für jeden ausgewählten Faktor wird ein Bereinigungskriterium festgelegt, das zu erfüllen ist, damit das Objekt weiter analysiert wird (siehe Tab. 3).

¹ Bundesinventar vor der Revision vom 1. November 2017.

Mit Hilfe von MATLAB² wurden dann die Daten zu den Faktoren der Auen gegen den Geschiebehaushalt geplottet und anschliessend hinsichtlich allfälliger sichtbaren Zusammenhänge zwischen Geschiebedefizit und dem jeweiligen Faktor analysiert.

² MATLAB von TheMathWorks (2017). *MATLAB*, Boston, USA. <https://ch.mathworks.com/products/matlab.html>, Version 9.3. (R2017b). ermöglicht eine Datenerfassung, -analyse und -auswertung, numerische Berechnung mithilfe von Matrizen, Simulation und grafische Darstellung von Daten.

Tab. 3: Übersicht über die betrachteten Faktoren und die angewendeten Bereinigungskriterien für die zweite Bereinigung bei der Auenauswahl (I. Phase der Arbeit).

Reihenfolge	Faktor	Ökologische / Flussbauliche Bedeutung	Daten / Berechnung	Auswahlkriterium	Ausschlusskriterium	Begründung / Bemerkung
1)	Schwall-Sunk	Der Schwall-Sunk-Betrieb von Speicherkraftwerken (⇒ Glossar) generiert eine künstliche Abflusssdynamik. Er hat viele negative Auswirkungen auf die Gewässerökologie und Hydromorphologie, indem zum Beispiel die Wassertemperatur und –qualität, Flussmorphologie und Habitatverfügbarkeit starken und zyklischen Schwankungen unterworfen sind (Bruder et al., 2012).	Schwall-Sunk-Klassifikation von Hanus et al. (2014).	Von Schwall-Sunk: - nicht betroffen - möglicherweise betroffen aber nicht nachweisbar	Von Schwall-Sunk: - möglicherweise betroffen	Bei der Klasse „möglicherweise betroffen aber nicht nachweisbar“ handelt es sich eher um Laufkraftwerke (⇒ Glossar). Es geht aber nicht um Schwall-Sunk durch Speicherkraftwerkbetrieb, da kein Speichervolumen vorhanden ist. Die Klasse „möglicherweise von Schwall-Sunk betroffen“ wird dadurch verworfen, um die Abflussschwankungen als Einflussvariable möglichst auszuschliessen.
2)	Abfluss	Auf Restwasserstrecken wird der Abfluss und somit dessen Dynamik stark eingeschränkt.	Abfluss-Klassifikation von Hanus et al. (2014).	> 60 % des natürlichen Abflusses	0 – 60 % des natürlichen Abflusses	Es wird angenommen, dass eine Restwassermenge von weniger als 60 % des natürlichen Abflusses auf Restwasserstrecken und somit auf Auen mit einer reduzierten bzw. wenig natürlichen Abflusssdynamik hindeutet. Dieses Bereinigungskriterium bezweckt auch die Homogenisierung der Auen, damit der Abfluss keine Einflussvariable ist.
3)	Ökomorphologie	Die Ökomorphologie der meisten Schweizer Gewässer wurde mit der Methode <i>Ökomorphologie nach Stufe F</i> des Modulstufen-Konzept von Hütte und Niederhauser (1998) erhoben. Mit dieser Methode wurde die Ökomorphologie einzelner Gewässerabschnitte in 5 Klassen klassifiziert: eingedolt, naturfremd, stark beeinträchtigt, wenig beeinträchtigt und natürlich.	Geodaten: <i>Ökomorphologie Stufe F</i> . --- Die dominante Ökomorphologie ist die am häufigsten bezüglich der aufsummierten Gewässerlänge vorkommende Ökomorphologiekategorie im Gewässernetz der Aue.	Dominante Ökomorphologie vom Typ: - natürlich - wenig beeinträchtigt - stark beeinträchtigt.	Dominante Ökomorphologie vom Typ: - künstlich/naturfremd - eingedolt - nicht klassifiziert.	Homogenisierung des Datensatzes. Eine dominante Ökomorphologie des Gewässernetzes vom Typ eingedolt oder künstlich/naturfremd weist auf eine geringe Natürlichkeit der Aue hin. Wenn die dominante Ökomorphologie keine Klassifikation hat oder < 50% des Gewässernetzes beschreibt, wird sie im Rahmen dieser Arbeit als nicht repräsentativ für die Auenökologie beurteilt.
4)	Höhenlage	Die Temperatur beeinflusst die Produktivität und Ablaufgeschwindigkeit der chemischen und ökologischen Prozesse: Je höher in den Bergen, desto kühler und desto weniger produktiv sind die Ökosysteme (Allan und Castillo, 2007). Die Temperatur beeinflusst auch das Vorkommen der Baumarten, und dadurch die chemische Zusammensetzung des Streumaterials (sprich die Nahrungsgrundlagen von Herbivoren). Oberhalb 1200 m ü.M. kommen in der Schweiz v.a. nur Nadelwälder vor (Frehner et al., 2005). Die Nadeln bilden ein eher saures Substrat und eine langsamer zersetzbare Nahrungsgrundlage als das Laub (Walther et al., 2015).	Angabe von Hanus et al. (2014) zur mittleren Höhe des Auengebiets.	< 1200 m ü.M.	≥ 1200 m ü.M.	Homogenisierung des Datensatzes. Die ausgewählten Auen sollen möglichst ähnlich hinsichtlich Temperatur, Produktivität und chemische Zusammensetzung des organischen Materials sein.
5)	Artenvielfalt	Eine hohe Artenvielfalt weist auf einen hohen Natürlichkeitsgrad des Lebensraumes hin (Fink et al., 2017).	Geodaten: <i>Fliessgewässerabschnitte mit hoher Artenvielfalt oder national prioritären Arten</i> . --- Die ausgewählte Diversität berücksichtigt nur die sechs folgenden Artengruppen*: Laufkäfer (<i>Carabidea</i>), Eintagsfliegen (<i>Ephemeroptera</i>), Steinfliegen (<i>Plecoptera</i>), Köcherfliegen (<i>Trichoptera</i>), Fische und Flora. Es wird je ein Punkt vergeben, wenn die Aue in ihrem Gewässernetz Gewässerabschnitte aufweist, bei welchen eine oben genannte Artengruppe artenreich vorkommt. Das Gewässernetz einer Aue kann folglich maximal 6 Punkte erhalten, wenn pro Artengruppe mindestens ein artenreicher Abschnitt vorkommt. Die ausgewählte Diversität ist unabhängig von der Abschnittslänge.	0 < Ausgewählte Diversität ≤ 6	Ausgewählte Diversität = 0	Homogenisierung des Datensatzes. Die ausgewählten Auen sollen möglichst ähnlich bezüglich Artenvielfalt sein. Es wird angenommen, dass eine ausgewählte Diversität gleich Null auf eine geringe Natürlichkeit der Aue hinweist. Gemäss Schmidt und Fivaz (2013): Ein artenreicher Abschnitt gehört zu den 25%-artenreichsten Schweizer Fliessgewässerabschnitte pro Artengruppe. *Auswahl der Artengruppen nach Anforderung der durch die Eawag begleiteten Teilprojekte des Forschungsprojekts.

2.3.3 Dritte Bereinigung (qualitativ)

Das Ziel der dritten Bereinigung ist es, eine Auswahl von 15 Auen zu treffen. Hierbei geht es um eine qualitative Auswahl der Objekte, welche folgende zwei Hauptfaktoren berücksichtigt (Tab. 4):

- Faktor Q: Für die Vertraulichkeit der Abflussdaten und die Homogenität der Gewässergrösse hinsichtlich der II. und III. Phase.
- Faktor ME: Der menschliche Einfluss (kurz: ME) wird ausgedrückt als Summe der Siedlungs- und Landwirtschaftsflächen im Einzugsgebiet (EZG, ⇔ Glossar).

Schliesslich wurde noch subjektiv eine letzte Änderung in den bisher ausgewählten Auen vorgenommen.

Tab. 4: Beschreibung von Faktor Q (Abflussdaten) und Faktor ME (Menschlicher Einfluss) für die dritte Bereinigung der I. Phase.

Faktor Q / Auswahlkriterien	Daten / Berechnung	Begründung
1). Skalierungsfaktor $SF > 0.5$	Basismessnetz Oberflächengewässer, Kantonale und private Messstationen, Einzugsgebietsgliederung Schweiz --- Messstation flussaufwärts: $SF = EZG_{MS} / EZG_{Aue}$ (Gl. 2) MS flussabwärts: $SF = EZG_{Aue} / EZG_{MS}$ (Gl. 3) MS Messstation EZG Einzugsgebiet	Je repräsentativer das EZG der Messstation für das EZG der Aue, desto zuverlässig sind die Abflussdaten für das Gewässer im Auenperimeter. Grundlage für die Geschiebetransportberechnung (III. Phase).
2). EZG vollständig in CH	Einzugsgebietsgliederung Schweiz --- EZG-Typ „vollständig in der Schweiz“.	Die Landnutzung ist für Gebiete innerhalb der Schweiz bekannt. Wichtig für den Faktor ME.
3). Bekannte Messstation	Basismessnetz Oberflächengewässer Kantonale und private Messstationen (HADES 5.1.2) --- Wahl der Messstation: in kürzester Distanz zum Auenperimeter entlang dem Fliessgewässer, nur durch BAFU oder Kantone betrieben.	Messstationnummer und -name sind bekannt, Messstation liefert Abflussdaten, welche in den Jahrbüchern zu finden sind. Grundlage für die Geschiebetransportberechnung (III. Phase).
4). Gewässer ist watbar	Mitteilung von Betreuerinnen --- Aare, Reuss und Rhein nicht watbar.	Wichtig für die Feldmessung (III. Phase).
5). Aue nicht am Seeausfluss	Bundesinventar der Auengebiete nationaler Bedeutung. Bundesgeoportal.	Der Seeausfluss aus grossen bzw. regulierten Seen hat nicht einen natürlichen dynamischen Abfluss und führt kaum Geschiebe (BAFU, 2015b). Aus der Seeregulierung werden Fauna und Flora beeinträchtigt (BAFU, 2016).
Faktor ME / Auswahlkriterium	Daten / Berechnung	Begründung
6). Menschlicher Einfluss im EZG $ME < 65\%$	Einzugsgebietsgliederung Schweiz im Bundesgeoportal. --- $ME = A_{Siedlung} + A_{Landwirtschaft}$ (Gl. 4) $A_{Siedlung}$ prozentualer Anteil an Siedlungsfläche im EZG $A_{Landwirtschaft}$ prozentualer Anteil an Landwirtschaftsfläche im EZG Der Bereinigungswert wird so festgelegt, dass 15 Auenobjekte ausgewählt werden können.	Die menschliche Änderung der Landnutzung beeinflusst die Natürlichkeit eines Ökosystems (Allan und Castillo, 2007). Die Landnutzung des EZGs hat einen höheren Einfluss auf die Auenökologie als die Landnutzung direkt angrenzend an den Gewässerabschnitt (Kail et al., 2015; Roth et al., 1996). Gemäss Roth et al. (1996) ist die Landwirtschaftsfläche im EZG negativ korreliert mit der Natürlichkeit des Fliessgewässerabschnittes: Bei ca. 60 % Landwirtschaftsfläche im EZG ist die Habitatsqualität mittelmässig. Annahme in dieser Arbeit: auch die Siedlungsfläche wirkt sich negativ auf die Natürlichkeit eines Biotopes aus.

2.4 II. Phase – Ökologische Untersuchung

2.4.1 Auswahl der zu untersuchenden Aspekte

Unter dem allgemeinen Begriff Ökologie können viele Aspekte unterschieden werden, wie z.B. Habitatstrukturen, Vernetzung zwischen den Habitaten, Biozönose (⇒ Glossar), Arteninteraktionen, Nischenräume, trophische Beziehungen (Allan und Castillo, 2007). Um die formulierten Hypothesen zu testen, werden in der II. Phase nur die zwei ökologischen Aspekte Vernetzung und Habitatstrukturen untersucht (vgl. Abb. 2).

Im Rahmen dieser Arbeit wird insbesondere der Geschiebehalt der Gewässer als Einflussgrösse auf die Auenökologie untersucht.

2.4.2 Auswahl und Berechnung der ökologischen Indikatoren

Die Untersuchung der ökologischen Aspekte wird mittels Indikatoren für die 15 Auen, die in der I. Phase ausgewählt worden sind, durchgeführt. Die Auswahl der Indikatoren basiert auf den charakteristischen Habitaten der Auen:

- Wasser ist nicht nur Landschaftsbildende Kraft und Vernetzungselement zwischen Lebensräumen, sondern auch ein Lebensraum.
- Sedimente sind oft Zwischenräume zwischen aquatischen und terrestrischen Habitaten.
- Auentypische Vegetation und die Sukzession (⇒ Glossar) der Pflanzengesellschaften kann eine Auskunft über die Sedimentdynamik und den Geschiebehalt geben (Wohl et al., 2015).

Für die ausgewählten Habitate und die zu untersuchenden ökologischen Aspekte erfolgt eine Auswahl der Indikatoren, welche sich an in der Landschaftsökologie gängig verwendeten Indikatoren sowie an den im Handbuch von Woolsey et al. (2005) enthaltenen Empfehlungen richtet.

Die ausgewählten Indikatoren sind in Tab. 5 zusammengefasst. Die Berechnung der Indikatoren basiert auf dem Datensatz Habitatzusammensetzung und erfolgt mittels Software FRAGSTATS³ und/oder ArcGIS⁴, und die Ergebnisse werden dann mittels der Software R⁵ grafisch dargestellt.

In der Landschaftsökologie werden die Interaktionen zwischen dem räumlichen Muster und die ökologischen Prozesse angegangen. Dabei wird der Begriff „Patch“ (⇒ Glossar) verwendet. Patches und deren Grenzen und Vernetzung sind von zentraler Bedeutung für ökologische Prozesse, Organismen und Flüsse von Organismen, Stoff und Energie (Allan und Castillo, 2007; Rohde et al., 2004). Eine Landschaft kann durch die Zusammensetzung und durch die räumliche Anordnung von Patches charakterisiert werden, wobei für die Charakterisierung mehrere Landschaftsindikatoren zum Einsatz kommen können (Rohde et al., 2004). Abb. 5 enthält eine schematische Darstellung von zwei Landschaften mit zwei Patchtypen und veranschaulicht die Bedeutung von drei, im Rahmen dieser Arbeit eingesetzter Landschaftsindikatoren.

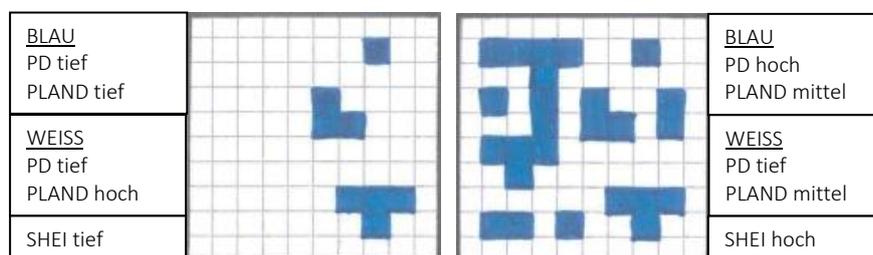


Abb. 5: Schema zum Begriff Patch und den Indikatoren Patch Dichte PD, Flächenanteil PLAND und Diversität der Habitats SHEI. Die zwei dargestellten Landschaften setzen sich aus zwei Habitatstypen zusammen (Typ BLAU und Typ WEISS). Je nach Anordnung, Grösse, Form

³ Fragstats ist eine Geostatistik-Software von McGarigal, K., Cushman, S. und Ene, E. (2012). FRAGSTATS, University of Massachusetts, Amherst. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>, Version v4., welche die Beschreibung und Quantifizierung der Landschaftsstruktur ermöglicht.

⁴ Das Programm ArcGIS von ESRI (2017). ArcGIS, Redlands, Kalifornien, USA. <https://www.esri.ch/de/produkte>, Version 10.5, ermöglicht die Abfrage, Verarbeitung, Analyse, Darstellung und Speicherung von geografischen Informationen, wie Daten, Datenbanken, Karten und 3D-View.

⁵ R ist ein Programm-System von R Core Team (2017). R, Wien. <https://www.R-project.org>, Version 3.4.3., das sich für statistische Analysen und graphischen Darstellung eignet.

und Häufigkeit des Vorkommens ändern sich die Indikatoren. PD ist beeinflusst von der Anzahl Patches, PLAND von der Gesamtgrösse des Patchtypes und SHEI von beiden PD und SHEI, also von der räumlichen Anordnung der Patches und Dominanz der Patchtypen.

Der auch in FRAGSTATS verwendete Begriff Patch stellt in einem Raster zusammenhängende Pixel der gleichen Landnutzungs Klasse dar. Die Gesamtanzahl der Patches vom selben Typ bildet eine Klasse. Eine Landschaft setzt sich aus einer oder mehreren Klassen zusammen, wobei die Patches zusammenhängende Wasserflächen, Waldstücke, usw. repräsentieren (McGarigal et al., 2012). FRAGSTATS berechnet mehrere Landschaftsindikatoren auf drei Ebene: für jeden Patch, für jeden Patchtyp (Klasse) und für die gesamte Landschaft. In FRAGSTATS wird der im 1mx1m Raster-Format gespeicherte Datensatz Habitatzusammensetzung eingegeben und folgende Indikatoren automatisch berechnet. Gemäss persönlicher Mitteilung von Kienast (2017), nimmt FRAGSTATS auch das Land ausserhalb des Auenperimeters als Teil der Landschaftsfläche an. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse dann manuell noch mit der tatsächlichen Auenfläche korrigiert.

Tab. 5: Abkürzung, Einheit, Wertebereich und ökologische Bedeutung der ausgewählten ökologischen Indikatoren basierend auf dem Datensatz Habitatzusammensetzung

Indikator / Abkürzung	Wertebereich / Einheit	Formel	Berechnung	Ökologische Bedeutung	Begründung
Wasserspiegelbreitenvariabilität --- B _{Wsp}	0 ≤ B _{Wsp} ≤ 1 --- [-]	$B_{Wsp} = VC_{Wsp} = \frac{\sigma_{Wspb}}{\mu_{Wspb}} \cdot 100$ (Gl. 5) VC = Variationskoeffizient σ _{Wspb} = Standardabweichung der Wasserspiegelbreiten μ _{Wspb} = Mittelwert der Wasserspiegelbreiten	Die Berechnung erfolgt ähnlich wie in Woolsey et al. (2005) vorgeschlagen für die quantitative Ausprägung der Wasserspiegelbreitenvariabilität und mit Hilfe der Toolbox <i>FluvialCorridor</i> ⁶ in ArcGIS. Zur Bewertung der Wasserspiegelbreitenvariabilität wird dann der Variationskoeffizient der gemessenen Wasserspiegelbreiten berechnet.	- Hydraulik - Morphologie - Habitatsdiversität	Die Wasserspiegelbreitenvariabilität gibt Auskunft über die Wasser-Land-Vernetzung sowie über die Strukturvielfalt der Sohle. Eine grosse Breitenvariabilität steht im Zusammenhang mit einer grossen Wassertiefenvariabilität und zeigt gleichzeitig eine hohe Strömungsvielfalt sowie eine vielfältige Verteilung von unterschiedlichen Korngrössen im Sohlenbereich an. Die Höhe Variabilität hat im Allgemeinen auch eine grosse Artenanzahl von Wasserorganismen, insbesondere Fischen, zur Folge. Zudem, ist die Wasserspiegelbreitenvariabilität mit der Länge der Uferlinie stark verbunden, welche ebenfalls eine gute Wasser-Land-Vernetzung anzeigt (Hütte und Niederhauser, 1998; Woolsey et al., 2005).
Uferlänge --- L _{Ufer}	L _{Ufer} ≥ 2 --- [km/Fluss-km]	$L_{Ufer} = \frac{P_{Wasser}}{L_{Fluss}}$ (Gl. 6) P _{Wasser} = Perimeter der Wasserfläche(n) L _{Fluss} = Länge des Hauptflusses	Die absolute Uferlänge wird dem Perimeter der Wasserflächen angenähert. Die Perimeterlänge wird mit dem Tool <i>ContactLength</i> der Toolbox <i>FluvialCorridor</i> gemessen und durch die Länge des Hauptflusses (Talweg) geteilt, was eine relative Uferlänge ergibt.	- Laterale Vernetzung - Habitatsdiversität - Rückhalt organisches Material	Die Uferlinie hat für die Gewässerökologie - insbesondere für den Stoffaustausch zwischen Gewässer und Land und für die laterale Vernetzung - eine zentrale Bedeutung. Die Uferlänge kontrolliert die Produktivität und die energetische Vernetzung zwischen Wasser und Land. Die Uferlänge reflektiert auch die geomorphologische Komplexität des Flussabschnittes und ist ein quantitativer Indikator für die Verfügbarkeit von aquatischen und terrestrischen Uferhabitaten sowie für die potenzielle Rückhaltekapazität eines Gewässers (Woolsey et al., 2005). Ein tiefer Wert der Uferlänge beschränkt nicht nur die Habitatverfügbarkeit für Arten sondern auch den Austausch von Energie, Stoff und Organismen zwischen Gewässer und Uferbereich (Tockner und Stanford, 2002).
Patch Dichte der auentypischen Vegetation --- PD	PD ≥ 0 --- [patches/ha]	$PD = \frac{n_i}{A}$ (Gl. 7) n _i = Anzahl Patches vom Patchtyp i A = Gesamtfläche der Landschaft	Die Patch Dichte der drei Vegetationstypen Kräuter, Weichholzaue (⇒ Glossar) und Hartholzaue (⇒ Glossar) wird mittels FRAGSTATS berechnet. Der Vegetationstyp Kräuter setzt sich zusammen aus den Typen „Gehölzfreie Aue“ (Typ 3) und „Übrige Krautgesellschaften“ (Typ 8).	- Fragmentierung der auentypischen Vegetation - Vernetzung durch die Vegetationstypen (Randlänge).	Die Sukzession der auentypischen Pflanzengesellschaften (⇒ Glossar) kann eine Auskunft über die Sedimentdynamik und den Geschiebehalt geben (Wohl et al., 2015). Die Patch Dichte (PD) eignet sich als Indikator für den Fragmentierungsgrad einer Landschaft: Je höher die PD, desto feiner die Textur der Vegetationslandschaft und desto höher die Vernetzung. Die PD gibt allerdings keine Angabe zur Fläche und räumlichen Verteilung der Patches.
Flächenanteil der auentypischen Vegetation --- PLAND	0 ≤ PLAND ≤ 100 --- [%]	$PLAND_i = p_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \cdot 100$ (Gl. 8) p _i = Landschaftanteil von Patchtyp i a _{ij} = Fläche des Patches j vom Patchtyp i A = Gesamtfläche der Landschaft	Der Flächenanteil der drei Vegetationstypen Kräuter, Weichholzaue (⇒ Glossar) und Hartholzaue (⇒ Glossar) wird mittels FRAGSTATS berechnet. Der Vegetationstyp Kräuter setzt sich zusammen aus den Typen „Gehölzfreie Aue“ (Typ 3) und „Übrige Krautgesellschaften“ (Typ 8).	- Habitatdiversität - Habitatzusammensetzung	PLAND beschreibt die Habitatdiversität und -zusammensetzung als prozentuales flächiges Vorkommen jedes Vegetationstypes in der Landschaft.
Shannon's Evenness Index --- SHEI	0 ≤ SHEI ≤ 1 --- [-]	$SHEI = \frac{-\sum_{i=1}^m (p_i \ln p_i)}{\ln m}$ (Gl. 9) p _i = Landschaftanteil von Patchtyp i m = Anzahl Patchtypen in der Landschaft	Die Shannon's Evenness Index wird, mittels FRAGSTATS über die ganze Auenlandschaft unter Betrachtung aller Patchtypen berechnet.	- Ausgewogenheit der Habitatsdiversität	In der Annahme, dass bei dieser Arbeit die sechs ausgewählten Artengruppen die gleiche ökologische Wichtigkeit haben, wird keine Gewichtung der Habitattypen vorgenommen. Da die Habitatdiversität mit zunehmender Anzahl an Habitattypen zunimmt, wird der Shannon's Evenness Index verwendet. Dieser Index normiert die beobachtete Diversität durch die maximal mögliche Diversität bei gegebener Patch Richness (McGarigal et al., 2012).

⁶ Die Toolbox *FluvialCorridor* wurde von Roux, C., Alber, A., Bertrand, M., Vaudor, L. und Piégay, H. (2013). *General overview guideline for the FluvialCorridor toolbox, a new ArcGIS toolbox package for exploring multiscale riverscape at a network scale.*: Sedalp (Sediment Management in Alpin Basins) and CNRS (UMR5600). entwickelt und kann mit ArcGIS benutzt werden. Sie ermöglicht die Charakterisierung von Fließgewässern und die Quantifizierung von Indikatoren.

2.5 III. Phase – Flussbauliche Untersuchung

Die dritte Phase besteht aus einer flussbaulichen Untersuchung. Hauptziel dieser Phase ist, das Geschiebedefizit ausgewählter Auen aus der II. Phase zu bestimmen. Zusätzlich erfolgt auch eine Begehung von 4 Auen, um einige Messgrößen zu erheben.

2.5.1 Bestimmung des Geschiebedefizits

2.5.1.1 Berechnungsgrundlagen

Als Grundlagen werden Geschiebehaushaltsstudien, Strategische Planungen zur Sanierung des Geschiebehaushaltes, Studien der VAW sowie amtliche Vermessungsdaten und Luftbilder gesucht. Anhand der Grundlagenverfügbarkeit, insbesondere von Abflussdaten, Korngrößen und Vermessung, wird eine Auswahl an Objekten getroffen, für welche die flussbauliche Untersuchung möglich ist. Es wurden 7 Auenobjekte ausgewählt, für welche die nötigen Grundlagen vorhanden sind und mit welchen der Geschiebedefizitgradient immer noch vollständig gedeckt ist.

Verwendet wird nur die jeweils aktuellste zur Verfügung stehende Vermessung. Es wird ein möglichst repräsentatives Querprofil in der Aue ausgewählt und abstrahiert, d.h. das ausgewählte Querprofil wird durch ein Polygon geometrisch mit drei bis maximal fünf Segmenten und einer ebenen Sohle angenähert. Das Längsgefälle wird aus dem jeweiligen Längsprofil auf einer Strecke von gesamthaft mindestens 1 km um das gewählte Querprofil bestimmt. Bei der Gefällsberechnung wird die Länge der betrachteten Strecken auf einen eventuellen Gefällknick hin geprüft und entsprechend verkürzt.

Der massgebende Durchmesser d_m sowie der charakteristische Korndurchmesser d_{90} werden aus den vorhandenen Geschiebehaushaltsstudien oder andere Berichte entnommen. Für die Uferrauheit werden die entsprechenden Strickler-Beiwerte aus den Grundlagen übernommen oder anhand von Fotos aufgrund der Uferbeschaffenheit abgeschätzt.

Für die Hydrologie werden die Daten der im Kap. 2.3.3 identifizierten Abflussmessstationen verwendet, genauer die statistischen Hochwasserabflüsse sowie die Abflussdauerkurve der Messperiode jeder Messstation. Bei einem Skalierungsfaktor kleiner als 0.60 wird eine aus der Formel von Kürsteiner (1917) zur Hochwasserabschätzung ohne Einbezug von Abflussmessungen abgeleitete Korrektur der Abflussdaten wie folgt vorgenommen:

$$Q_{Aue} = Q_{MS} \cdot SF^{2/3} \quad (Gl. 10)$$

Q_{Aue} Abfluss bei der untersuchten Aue [m^3/s]

Q_{MS} an der Messstation (MS) gemessener Abfluss [m^3/s]

SF Skalierungsfaktor zwischen den Einzugsgebieten [-] (vgl. Gl. 2 und Gl. 3 in Methodenteil 2.3.3)

2.5.1.2 Hydraulische Berechnung

Die Pegel-Abfluss-Beziehung wird mit der Teilflächenmethode nach Bezzola (2016) und mit Hilfe des massgebenden Querprofils berechnet, wobei die Abflüsse iterativ bestimmt werden (Abb. 6). Es erfolgt auch die Bestimmung der Abflusskapazität bzw. der Ausuferungsfrequenz.

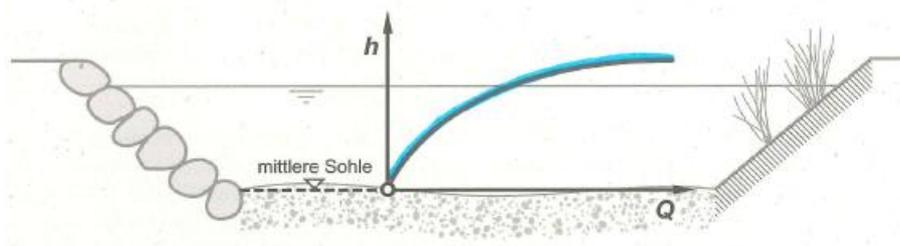


Abb. 6: Aus der Abflussberechnung für unterschiedliche Wassertiefen wird die Pegel-Abfluss-Beziehung (blaue Kurve) für das massgebende Profil ermittelt (verändert nach Bezzola (2016)).

2.5.1.3 Geschiebetransport

Näherung der Schubspannungsverteilung

Wie in Abb. 7 dargestellt, kann die tatsächliche Verteilung der Sohlenschubspannung im Profil durch die gemittlere dimensionslose Schubspannung über die gesamte Flussbreite θ_m oder die maximale dimensionslose Schubspannung im zentralen Bereich der Sohle θ_{max} wie folgt angenähert werden:

$$\theta_m = \frac{R_S \cdot J}{(s-1) \cdot d_m} \quad (Gl. 11)$$

$$\theta_{max} = \frac{h \cdot J}{(s-1) \cdot d_m} \quad (Gl. 12)$$

- R_S hydraulischer Radius [m]
 J Sohlgefälle [-]
 h Wassertiefe [m]
 s relative Feststoffdichte [-]
 d_m massgebender Korndurchmesser [m]

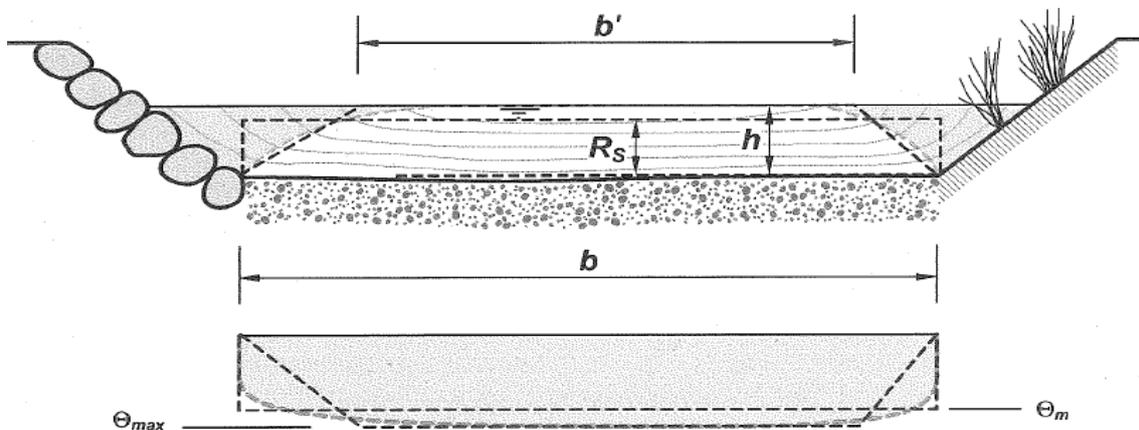


Abb. 7: Näherung der tatsächlichen Schubspannungsverteilung durch eine rechtecksförmige und eine trapezförmige Verteilung bei kleinen Wassertiefen- zu Breitenverhältnissen h/b (nach Bezzola (2016)).

Geschiebefunktion

Der Geschiebetransport beginnt, wenn die hydraulische Beanspruchung, ausgedrückt durch die dimensionslose Schubspannung θ , grösser wird als der Widerstand des Sohlenmaterials, ausgedrückt durch die kritische dimensionslose Schubspannung θ_c . Die kritische dimensionslose Schubspannung bei gleichkörnigem Material (Shields-Parameter) wird im Rahmen dieser flussbaulichen Berechnungen mit einem Wert von $\theta_c = 0.05$ angesetzt. Für das gewählte Querprofil wird die Geschiebefunktion, d.h. die Geschiebetransportrate G_b in Abhängigkeit des Abflusses Q , über die gesamte Flussbreite $G_b(R_S, b)$ und im zentralen Bereich der Sohle $G_b(h, b')$ mit der Formel nach Wong und Parker (2006) wie folgt berechnet:

$$G_b(R_S, b) = 4.93 \cdot b \cdot \sqrt{g} \cdot \sqrt{s-1} \cdot d_m^3 \cdot \rho_s \cdot \left(\frac{R_S \cdot J}{(s-1) \cdot d_m} - 0.047 \right)^{1.60} \quad (Gl. 13)$$

$$G_b(h, b') = 4.93 \cdot b' \cdot \sqrt{g} \cdot \sqrt{s-1} \cdot d_m^3 \cdot \rho_s \cdot \left(\frac{h \cdot J}{(s-1) \cdot d_m} - 0.047 \right)^{1.60} \quad (Gl. 14)$$

- b Breite der Flusssohle [m]
 b' Breite im zentralen Bereich der Flusssohle [m], $b' = b \left(2 \frac{R_S}{h} - 1 \right)$
 g Schwerkraft [9.81 m/s²]
 ρ_s Feststoffdichte des Sohlenmaterials [Annahme: 2650 kg/m³]

Bei kleineren Abflüssen ermöglicht die Geschiebefunktion $G_b(h, b')$ eine genauere Erfassung des Transportbeginns, während die Geschiebefunktion $G_b(R_S, b)$ für zunehmende Abflüsse zuverlässigere Daten für den Transport liefert (Bezzola, 2016). Aufgrund dieser Divergenz wird die Geschiebefunktion G_b im Rahmen dieser Arbeit vereinfacht aus den jeweiligen maximalen Werten von $G_b(R_S, b)$ und $G_b(h, b')$ ermittelt (siehe Abb. 8).

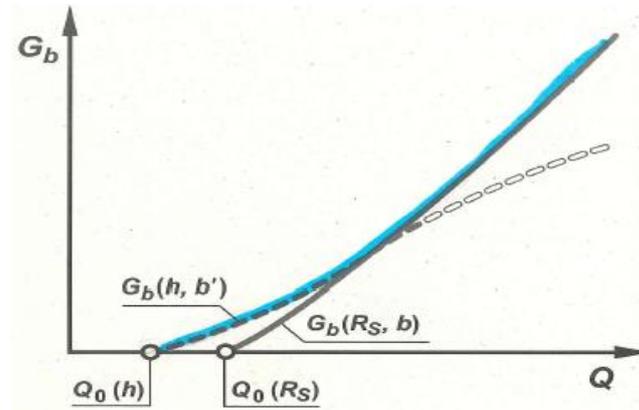


Abb. 8: Verlauf der mit der mittleren Sohlenschubspannung θ_m berechneten Geschiebefunktion $G_b(R_S, b)$ und der mit der maximalen Schubspannung θ_{max} ermittelten Geschiebefunktion $G_b(h, b')$. Die verwendete Geschiebefunktion G_b (blau) setzt sich aus den jeweils grösseren Werten zusammen (verändert nach Bezzola (2016)).

Transportbeginn

Der Grenzabfluss Q_0 für den Transportbeginn lässt sich durch den Vergleich zwischen der abflussabhängigen Sohlenschubspannung (θ_m resp. θ_{max} , in Gl. 11 und Gl. 12) und der dimensionslosen kritischen Schubspannung θ_c wie folgt bestimmen:

- bei $\theta_m = \theta_c$ beginnt der Transport über die gesamte Flussbreite; (Gl. 15)

- bei $\theta_{max} = \theta_c$ beginnt der Transport im zentralen Bereich der Sohle. (Gl. 16)

Stabilität der Flusssohle

Bei breiter Kornverteilung des Sohlenmaterials bildet sich an der Sohlenoberfläche eine Deckschicht (auch Pflasterungsschicht genannt), welche bis zu einem Abfluss Q_D stabil ist und das Unterschichtmaterial vor Erosion schützt. Gemäss Little und Meyer (1972) kann die Bildung einer Deckschicht nur ab einer Standardabweichung der Kornverteilung σ

$$\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}} \geq 1.5 \quad (\text{Gl. 17})$$

erfolgen. Korndurchmesser d_{84} und d_{16} bedeutet, 84% bzw. 16% Gewichtsanteil der Körner sind feiner.

Durch den Vergleich zwischen der abflussabhängigen Sohlenschubspannung (θ_m resp. θ_{max} , in Gl. 11 und Gl. 12) und dem Widerstand der Deckschicht θ_{cD} wird ermittelt, bei welchem Grenzabfluss Q_D die Stabilität der Deckschicht (falls vorhanden) nicht mehr gegeben ist und diese aufreißt.

Der Widerstand der Deckschicht θ_{cD} berechnet sich aus

$$\theta_{cD} = \theta_c \cdot \left(\frac{d_{mD}}{d_m}\right)^{2/3} \quad (\text{Gl. 18})$$

Der massgebende Korndurchmesser der Deckschicht d_{mD} wird mit dem charakteristischen Korndurchmesser d_{90} der Unterschicht angenähert. Der Grenzabfluss Q_D für das Aufreissen der Deckschicht wird wie folgt ermittelt:

- bei $\theta_m = \theta_{cD}$ entspricht Q_D dem Abfluss Q_{Dmax} , ab welchem Erosion des Sohlenmaterials über die gesamte Flussbreite stattfindet; (Gl. 19)

- bei $\theta_{max} = \theta_{cD}$ entspricht Q_D dem Abfluss Q_{Dmin} , ab welchem Erosion des Sohlenmaterials im zentralen Bereich der Sohle stattfindet. (Gl. 20)

Die Häufigkeit des Aufbrechens der Deckschicht wird durch den Vergleich zwischen dem ermittelten Grenzabfluss Q_D und dem statistischen Hochwasser HQ_x aus der Hochwasserstatistik der jeweiligen Messstation abgeschätzt, wobei x die Häufigkeit in Jahren beschreibt.

Wahl der Grenzabflüsse

Die Wahl der zu verwendenden Grenzabflüsse Q_0 und Q_D erfolgt anhand der Zusammensetzung der gewählten Geschiebefunktion. Beispielsweise, in Abb. 8 wird $Q_0(h)$ gewählt, weil in diesem Bereich die Geschiebefunktion aus den Werten von $G_b(h, b')$ zusammen setzt (analoges Wahlvorgehen für den Abfluss Q_D).

Transportkapazität

Die Geschiebeführung ist vom Abfluss, vom Vorhandensein einer Deckschicht und von der Geschiebezufuhr aus dem oberstrom liegenden Flussabschnitt abhängig. Im Rahmen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Geschiebezufuhr immer der Transportkapazität entspricht, d.h. der Transport entsprechend Transportkapazität erfolgt. Der Einfluss einer Deckschicht kann durch die Berechnung der maximalen und minimalen Transportkapazität $G_{b \max}$ bzw. $G_{b \min}$ vereinfachend abgeschätzt werden (Abb. 9).

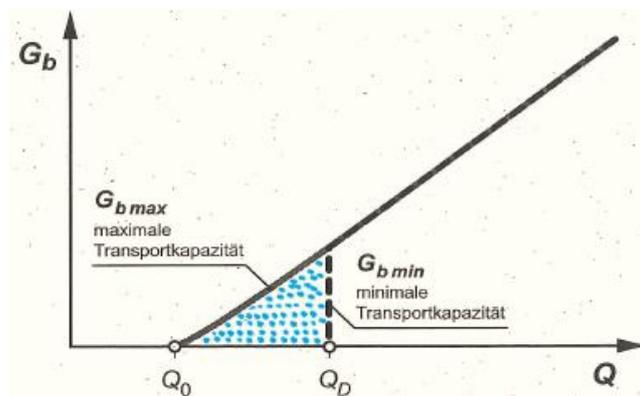


Abb. 9: Bestimmung der maximalen und der minimalen Transportkapazität $G_{b \max}$ bzw. $G_{b \min}$ anhand der Geschiebefunktion G_b und den Grenzabflüssen Q_0 und Q_D . Der Transport von feinerem Material über die stabile Deckschicht entspricht der blau punktierten Fläche (verändert nach Bezzola (2016)).

Geschiebefracht

Durch Kombination der Geschiebefunktion $G_b(Q)$ mit einer Abflussdauerkurve kann die Dauerkurve der Geschiebetransportkapazität ermittelt werden. Daraus werden durch Integration die maximale und minimale Geschiebefracht GF_{\max} bzw. GF_{\min} wie folgt berechnet:

$$GF_{\max} = \int_0^{t_0} G_{b \max} dt \quad (Gl. 21)$$

$$GF_{\min} = \int_0^{t_D} G_{b \min} dt \quad (Gl. 22)$$

Abb. 10 veranschaulicht das Berechnungsvorgehen mittels Kombination und Integration. In der vorliegenden Arbeit wurde die mittlere Abflussdauerkurve der gesamten Messperiode der jeweiligen Messstation verwendet und mit dem maximalen Abfluss der Messperiode ergänzt.

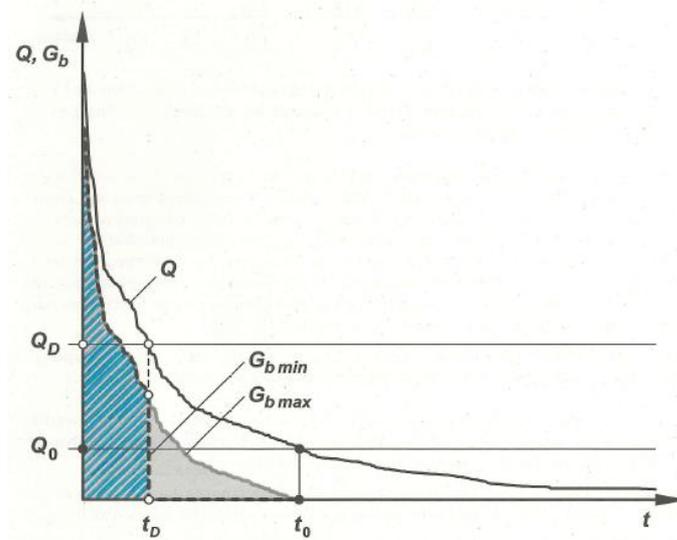


Abb. 10: Dauerkurve des Abflusses Q und Dauerkurven der maximalen und minimalen Geschiebetransportkapazität (G_{bmax} bzw. G_{bmin}). Die maximale Fracht GF_{max} entspricht der grau hinterlegten Fläche, die minimale Fracht GF_{min} der blau schraffierten Fläche (verändert nach Bezzola (2016)).

Im Rahmen dieser Arbeit wird entweder die minimale oder die maximale Geschiebefracht gemäss Entscheidungsdiagramm in Tab. 6 als transportierbare Geschiebefracht angenommen.

Tab. 6: Entscheidungsdiagramm für die Verwendung der minimalen oder maximalen Geschiebefracht GF zur Bestimmung des Geschiebedefizites

Begehung (in III. Phase)?				
Ja	Deckschicht stabil?			
	Ja	--> GF_{min}		
	Nein	--> GF_{max}		
Nein	Selbes Flusssystem wie eine Aue mit Begehung?			
	Ja	Annahme: gleiche Stabilität der Deckschicht		
	Nein	Längenprofil der Korndurchmesser in Geschiebehaushaltsstudie?		
		Ja	Linien von d_m und d_{90} parallel und mit gewissem Abstand voneinander?	
		Ja	Annahme: stabile Deckschicht	
Nein	Annahme: keine stabile Deckschicht			
	Nein	Annahme: keine stabile Deckschicht		

2.5.1.4 Geschiebedefizit

Mit der berechneten Geschiebefracht GF_{Ber} und der in der jeweiligen Geschiebehaushaltsstudie dokumentierten Geschiebefracht GF_{GHH} lässt sich das Geschiebedefizit GD wie folgt berechnen:

$$GD = \frac{GF_{Ber} - GF_{GHH}}{GF_{Ber}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (Gl. 23)$$

Das berechnete Geschiebedefizit wird anschliessend mit den Geschiebedefizitklassen nach Hanus et al. (2014) verglichen.

2.5.2 Feldmessung

Die Feldarbeit wird für vier Auen durchgeführt, damit jede Klasse des Geschiebedefizitgradienten untersucht wird. Die vier Auen werden anhand des Vorhandenseins von Kiesbänken und auch subjektiv auf Basis der Zugänglichkeit ausgewählt.

2.5.2.1 Korndurchmesser

Zur Erfassung der Kornverteilung des Sohlenmaterials werden vier Linienproben auf den Kiesbänken erhoben. Mithilfe der Linienprobe werden die Kornverteilung des Unterschichtmaterials, der massgebende Durchmesser d_m , der charakteristische Korndurchmesser d_{90} sowie die Breite der Kornverteilung als Streuung σ (vgl. Gl. 17) bestimmt. Die mittels Linienzahlanalyse bestimmten charakteristischen Korndurchmesser der Sohle werden mit den in den Grundlagen gefundenen und für die flussbauliche Untersuchung verwendeten Korndurchmessern verglichen.

2.5.2.2 Innere Kolmation

Ökologische Bedeutung

Die Gewässerökologie wird durch die innere Kolmation und nachfolgende Verstopfung des Porenraumes, Verfestigung des Substrats beeinträchtigt, beispielsweise durch Abnahme an Anzahl und Grösse der Substratzwischenräume und durch Reduktion der Sauerstoffzufuhr. Aus dieser Beeinträchtigung kann der Lebensraum für Makroinvertebraten weniger gut geeignet oder teilweise nicht mehr zugänglich bzw. der Reproduktionserfolg von kieslaichenden Fischen gefährdet sein (Fischnetz, 2004; Schälchli, 1993).

Berechnung

Die Erhebung der inneren Kolmation der Gewässersohle erfolgt nach dem von Woolsey et al. (2005) empfohlenen Aufnahmeverfahren und der Dokumentation von Schälchli (2002). Es werden 10 Probenahmestellen mit einer Fläche von ca. 0.16 m² in ebenen Bereichen nahe der Wasserlinie entlang einem 500 m lang Gewässerabschnitt gewählt. Die Bewertung der Kolmation jeder Stelle erfolgt durch optische Einteilung der Kolmation in 5 Kolmationsklassen und Zuordnung eines dimensionslosen, standardisierten Wertes (Tab. 7). Die mittlere Kolmation des Gewässerabschnittes ergibt sich aus dem Mittelwert des standardisierten Wertes jeder Aue.

Tab. 7: Optische Einteilung in 5 Kolmationsklasse und Zuordnung eines standardisierten Wertes (nach Woolsey et al. (2005))

Kolmationsklasse	Substrat (unter Deckschicht)	Lückenraum	Standardisierter Wert
Keine Kolmation	Sehr locker und grobkörnig (Steine, Kies, wenig Sand)	grobporig	1
Schwache Kolmation	Locker und breit abgestuft (Steine, Kies, Sand)	grob- bis feinporig	0.9
Mittlere Kolmation	Leicht verfestigt, Sand mit örtlich kohäsiven Ablagerungen	feinporig, örtlich verstopft	0.5
Starke Kolmation	Deutlich verfestigt, Sand und kohäsive Ablagerungen	feinporig bis vollständig verstopft	0.2
Vollständige Kolmation	Stark verfestigt, praktisch flächendeckende kohäsive Ablagerungen	vollständig verstopft	0

2.5.2.3 Quantitative Ausprägung der Wasserspiegelbreitenvariabilität

Die Wasserspiegelbreite wird gemäss Woolsey et al. (2005) an mehreren Stellen in regelmässigen Abständen (ca. 10 m) entlang einem ca. 400 m lang Gewässerabschnitt mittels Laser-Distanzmessgerät und Messband gemessen. Die Messung erfolgt senkrecht zur Fliessrichtung und, im Fall von Gewässerverzweigungen, durch Aufsummierung der benetzten Breiten der einzelnen Wasserläufe für jedes Querprofil. Der Abfluss zum Zeitpunkt der Datenerhebung wurde nachträglich anhand der Abflussmessstationen bestimmt, da die Wasserspiegelbreite vom Wasserstand abhängig ist.

Zur Bewertung der Wasserspiegelbreitenvariabilität wird dann der Variationskoeffizient der gemessenen Wasserspiegelbreiten berechnet. Es folgt ein Vergleich mit den bestimmten Wasserspiegelbreiten aus dem Datensatz Habitatzusammensetzung (Unterkap. 2.4.2).

2.6 Zusammenhang zwischen Ökologie und Geschiebedefizit

Die Resultate der ökologischen und der flussbaulichen Untersuchung werden durch eine lineare Regression mit Hilfe der Statistiksoftware R in Zusammenhang gebracht. Je nach Datenformat wird eine Vortransformation vorgenommen (Güsewell, 2017; Lamprecht, 1999). Voraussetzung für die lineare Regression und die Berechnung von Regressionskoeffizienten ist die Normalverteilung der Residuen der abhängigen Variablen (sprich des jeweiligen ökologischen Indikators).

3 Resultate

3.1 I. Phase – Auenauswahl

3.1.1 Erste Bereinigung

187 der 283 Objekte im Bundesinventar sind als Flussaunen eingetragen. Unter Betrachtung des aktuellen Zustandes der Typologie nach Hanus et al. (2014) werden 3 weitere Objekte ausgeschlossen, weil sie heutzutage Seeauen sind, das heisst Auen, die sich an Ufern von Stauseen befinden (für mehr Details siehe Anhang A-1). Im Rahmen dieser Arbeit werden folglich 184 Objekte als Flussaunen weiteranalysiert.

3.1.2 Zweite Bereinigung

In Tab. 8 sind die Ergebnisse der Bereinigungsschritte bezüglich Anzahl Objekte zusammengefasst. Die Kategorisierung, sprich die Werte jeder Flussaue für die fünf Faktoren sowie die graphischen Ergebnisse für jedes Bereinigungskriterium sind Anhang A-2 bzw. Anhang A-3 zu entnehmen. In Anhang A-4 ist eine Übersicht zur räumlichen Verteilung der Auengebiete und des Bereinigungseffekts der eingesetzten Kriterien zu sehen.

Tab. 8: Anzahl der Auenobjekte, die wegen dem Bereinigungskriterium jedes berücksichtigten Faktors der zweiten Bereinigung der I. Phase übrig bleiben resp. ausgeschlossen werden.

Reihenfolge	Faktor	Bereinigungskriterium	Übrigbleibende Objekte	Ausgeschlossene Objekte
			184	-
1)	Schwall-Sunk	Von Schwall-Sunk nicht betroffen oder möglicherweise betroffen aber nicht nachweisbar	149	35
2)	Restwasser	> 60% des natürlichen Abflusses	105	44
3)	Ökomorphologie	Natürlich bis stark beeinträchtigt	87	18
4)	Höhenlage	< 1200 m ü.M.	66	21
5)	Ausgewählte Artenvielfalt	> 0	47	19

3.1.3 Dritte Bereinigung

In Anhang A-5 sind die Ergebnisse der Einzelnen Bereinigungskriterien für die ausgewählte Faktoren Q (Vertraulichkeit der Abflussdaten) und ME (Menschlicher Einfluss des EZG) aufgeführt. In Abb. 11 sind die Resultate der 15 Auen, die diese dritte, qualitative Bereinigung bestehen, zusammengefasst.

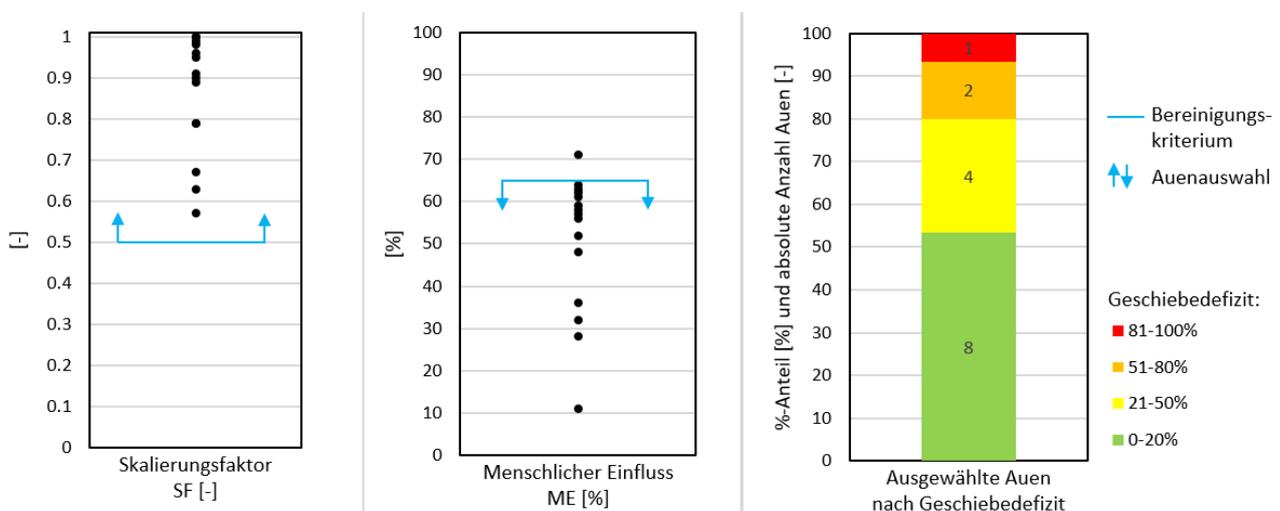


Abb. 11: (Links) Skalierungsfaktor SF zwischen den EZGflächen von Messstation und Aue, (Mitte) menschlicher Einfluss ME im EZG und (Rechts) Geschiebedefizitsklasse nach Hanus et al. (2014) der 15 Auen, die die dritte Bereinigung bestanden haben. Angabe zu dem jeweils angewendeten Bereinigungskriterium massgebend für die Auswahl der Auen.

Die ausgewählten Auen weisen eine Variation bezüglich Skalierungsfaktor auf: Für die Mehrheit sind die Abflussdaten für die jeweilige Auen repräsentativ (SF nah zum Wert 1), während für 4 Auen der Skalierungsfaktor tiefer ist, für eine Aue ist er sogar kleiner als 0.60 (Aue an der Schwarzen Lutschine, ObjNr 81).

Auch der berechnete menschliche Einfluss im EZG variiert stark zwischen den ausgewählten Auen (von 10 bis über den Wert des Bereinigungskriteriums, 65%). Ein Objekt liegt über dem Wert des Bereinigungskriteriums, da sie subjektiv gewählt wurde (Aue an der Glatt, ObjNr 14).

Die 15 ausgewählten Auen können entlang des Gradienten des Geschiebedefizit angeordnet werden, wobei die Geschiebedefizitsklassen bezüglich Anzahl Auen nicht gleich vertreten sind: Für die Defizitklasse 81-100% ist lediglich ein Objekt vorhanden (Aue an der Kander, ObjNr 72). Unter diesen 15 Auen befinden sich auch zwei Objekte, die das Bereinigungskriterium für den Faktor Artenvielfalt nicht erfüllt haben: Aue an der Kander (ObjNr 72, Geschiebedefizit 81-100%) und Aue an der Schwarzen Lutschine (ObjNr 81, Geschiebedefizit 51-80%).

3.2 II. Phase – Ökologische Untersuchung

Die Ergebnisse der ökologischen Untersuchung mittels Indikatoren Wasserspiegelbreite, Uferlinie, Patch Dichte und Flächenanteil der Vegetation sowie das Shannon's Evenness Index sind in Abb. 12 zusammengefasst.

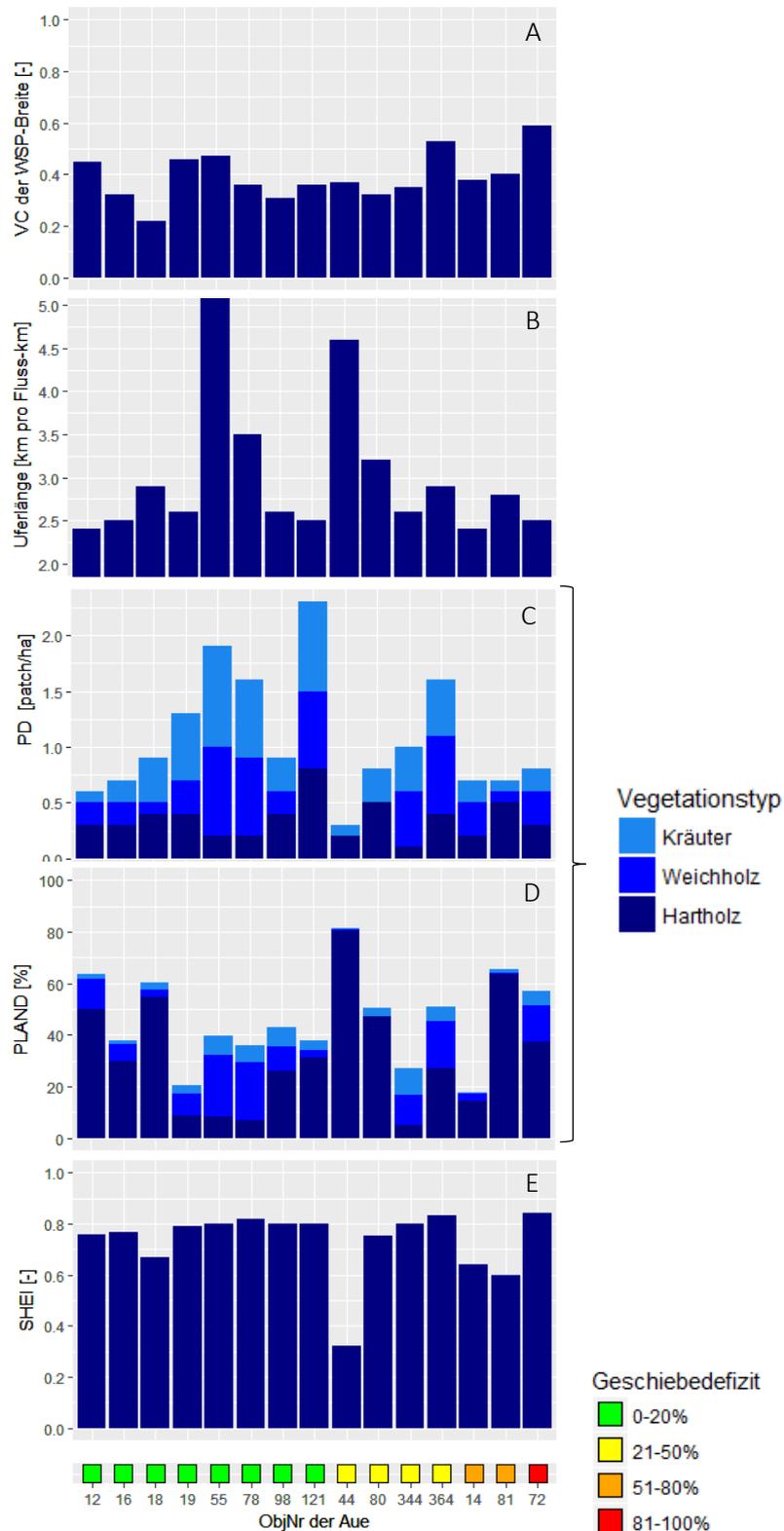


Abb. 12: (A) Variationskoeffizient der Wasserspiegelbreite jede 10m, (B) Uferlänge pro Flusskilometer, (C) Patch Dichte PD der Vegetationstypen Kräuter, Weichholz und Hartholz, (D) Flächenanteil PLAND der Vegetationstypen Kräuter, Weichholz und Hartholz und (E) Shannon's Evenness Index SHEI in den Auen (ObjNr des Bundesinventars) nach Geschiebedefizitklasse und ObjNr angeordnet.

Der Variationskoeffizient der Wasserspiegelbreiten schwankt von 0.2 (Thur, ObjNr 18) bis 0.6 (Kander, ObjNr 72). Die meisten Auen weisen eine relative Uferlänge knapp über den Minimalwert von 2 km/km auf, wobei in einzelnen Fällen die Uferlänge doppel so gross sein kann (Sense, ObjNr 55; Emme, ObjNr 44). Die genauen Werte der beiden Indikatoren Wasserspiegelbreite und Uferlänge sind Anhang B zu entnehmen, wo auch die Gerinnemorphologie dieser Auen nach Angaben von Hanus et al. (2014) zusammengefasst ist.

Die Patch Dichte und der Flächenanteil sind sehr unterschiedlich zwischen den Auen sowie zwischen den drei auentypischen Vegetationstypen. Die Aue an der Emme (ObjNr 44) fällt besonders durch die allgemein geringe aufsummierte Patch Dichte auf (0.3 Patches pro Hektar). Die Aue an der Venoge (ObjNr 121) weist mit einem Wert von 2.3 die höchste aufsummierte Patch Dichte auf. Die Variation der Patch Dichte innerhalb der Vegetationstypen schwankt zwischen 0.05 und 0.8 Patches/ha.

In der Mehrheit der untersuchten Auen stellt das Hartholz die auentypische Vegetation dar, es ist häufiger vorhanden als Weichholz und Kräuter. Sonst kommen die drei auentypischen Vegetationstypen in allen Auen vor, mit Ausnahme der Aue an der Lutschine (ObjNr 80), wo das Weichholz ganz fehlt. Bei den Auen an der Emme (ObjNr 44) und Schwarzer Lutschine (ObjNr 81) ist mehr als die Hälfte der gesamten Auenlandschaft durch Hartholzaue charakterisiert.

Die Evenness liegt in allen Auen, mit Ausnahme der Aue an der Emme (ObjNr 44), über einem Wert von 0.5, die Habitatzusammensetzung ist also eher ausgewogen, d.h. alle Habitate kommen in etwa gleich häufig vor, kein Habitattyp hat eine zu grosse Dominanz. Der tiefe SHEI-Wert der Aue an der Emme fällt auf, was sich mit dem geringen Vorhandensein von Kräuter und Weichholz verbinden lässt (vgl. Flächenanteil in Abb. 12 D).

Im Allgemeinen ist es aber kein klarer Trend und keine auffällige Korrelation zwischen dem jeweiligen Indikator und dem Geschiebedefizit sichtbar.

3.3 III. Phase – Flussbauliche Untersuchung

3.3.1 Vorliegende Grundlagen und Auswahl der Auen

Für viele Objekte liegen nicht alle notwendigen Angaben für die Durchführung der flussbaulichen Berechnung vor. Ausgewählt werden entsprechend nur 7 der 15 Auen der II. Phase (Tab. 9). Die aus den vorliegenden Grundlagen entnommenen relevanten Daten sind in Anhang C-1 zusammengefasst. Im Anhang C-2 sind die Daten zur Hochwasserstatistik, zur Dauerkurve und zum mittleren Abfluss aufgeführt. Eine Zusammenfassung der Berechnungsgrundlagen der 7 ausgewählten Auen sowie der für die flussbauliche Berechnung verwendeten Konstanten ist im Anhang C-3 zu finden.

Tab. 9: Anhand des Geschiebedefizitgradienten und der Grundlagenverfügbarkeit ausgewählte Auen für die flussbauliche Berechnung

ObjNr.	Gewässer	Aue	Kanton	Geschiebedefizit [%] (Hanus et al., 2014)
55	Sense	Senseaue	BE/FR	0-20%
18	Thur	Thurauen Will-Weieren	SG	0-20%
80	Lütschine	Chappelistutz	BE	21-50%
344	Töss	Dättlikon-Freienstein	ZH	21-50%
14	Glatt	Glatt nordwestlich Flawil	SG	51-80%
81	Schwarze Lütschine	In Erlen	BE	51-80%
72	Kander	Heustrich	BE	81-100%

3.3.2 Hydraulische Resultate

3.3.2.1 Abflusskapazität

Die Berechnungsergebnisse der Pegel-Abfluss-Beziehung sind im Anhang C-4 aufgeführt. Die dadurch bestimmte Abflusskapazität und der Vergleich mit den statistischen Hochwasserabflüssen sind in Tab. 10 zusammengefasst. Eine Ausuferung an den untersuchten Abschnitten kann relativ selten eintreten, d.h. in 4 der 7 Auen nur bei einem Hochwasser mit einer Wiederkehrperiode von 300 Jahren oder mehr.

Tab. 10: Maximale Wassertiefe, maximale Abflusskapazität und Hochwasserereignis, bei welchen eine Ausuferung an den untersuchten Auengewässern stattfindet.

ObjNr.	Gewässer	Geschiebedefizit (Hanus et al., 2014) [%]	Max. Wassertiefe [m]	Max. Abflusskapazität [m ³ /s]	Ausuferung auf...	Häufigkeit der Ausuferung [HQ _x]
55	Sense	0-20%	5.7	1484	beide Seiten	>> HQ ₃₀₀
18	Thur	0-20%	5.4	617	beide Seiten	~ HQ ₃₀
80	Lütschine	21-50%	3.5	859	linke Seite	>> HQ ₃₀₀
344	Töss	21-50%	3.6	394	rechte Seite	~ HQ ₃₀₀
14	Glatt	51-80%	1.8	72	rechte Seite	~ HQ ₅
81	Schwarze Lütschine	51-80%	1.9	171	linke Seite	>> HQ ₃₀₀
72	Kander	81-100%	2.7	230	linke Seite	~ HQ ₂₀

3.3.2.2 Stabilität der Flusssohle

Die gewählten Grenzabflüsse für den Transportbeginn und für das Aufbrechen der Deckschicht zur Schätzung der Stabilität der Flusssohle sind in Tab. 11 zusammengefasst. Die Verteilungen der Schubspannungen und die Grenzabflüsse Q_0 und Q_D für die gesamte Flussbreite sowie für den zentralen Bereich sind in Anhang C-5 aufgeführt. Der berechnete Grenzabfluss Q_0 für den Transportbeginn ist für alle Auen immer höher als der mittlere Abfluss aus der jeweiligen Messstation, sprich Geschiebe kann nicht ständig mobilisiert und transportiert werden.

Die verwendeten Grenzabflüsse entsprechen fast immer dem jeweiligen Grenzabfluss im zentralen Bereich (Ausnahme Thur: Verwendet wurde Q_D für das Aufbrechen der Deckschicht über die gesamte Flusssohle).

Die Deckschicht an fast allen untersuchten Abschnitten kann bei einem Hochwasser mit einer Wiederkehrperiode ungefähr von 2 bis 5 Jahren im zentralen Bereich aufreissen. Daraus folgt, dass die Sohle an diesen Gewässern relativ stabil ist. Nur an der Glatt konnte der Grenzabfluss Q_D für eine Erosion der Deckschicht, sowohl über die gesamte Flussbreite als auch im zentralen Bereich, nicht berechnet werden, da der Grenzabfluss Q_D höher liegt als die maximale Abflusskapazität bei bordvollem Abfluss im betrachteten Profil (vgl. relativ geringe Abflusskapazität in Tab. 10). Das Aufbrechen der Deckschicht ist dort damit äusserst unwahrscheinlich.

Während der Begehung von 4 der 7 Auen und mit Annahmen für die restlichen 3 Auen konnte festgestellt werden, dass eine durchgehende Deckschicht nur bei vier Auen vorhanden ist oder sein könnte.

Tab. 11: Grenzabfluss Q_0 für den Transportbeginn, Grenzabfluss Q_D für das Aufbrechen der Deckschicht sowie Häufigkeit des Aufbrechens anhand der Hochwasserstatistik der jeweiligen Messstation und Vorhandensein der Deckschicht. Der Bindestrich bedeutet keine Angabe durch die Berechnung möglich ($Q_D > \text{Abflusskapazität}$). Die Klammer beim Vorhandensein der Deckschicht bedeutet, dass die Angabe auf einer Annahme beruht (keine Begehung der Aue).

ObjNr.	Gewässer	Geschiebedefizit (Hanus et al., 2014)	Q_0	Q_D	Häufigkeit des Aufbrechen der Deckschicht	Deckschicht vorhanden?
		[%]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[HQ _x]	
55	Sense	0-20%	15	52	< HQ ₂	Nein
18	Thur	0-20%	53	362	HQ ₂ – HQ ₅	(Ja)
80	Lütschine	21-50%	53	147	= HQ ₅	Ja
344	Töss	21-50%	25	68	< HQ ₂	(Nein)
14	Glatt	51-80%	22	-	-	Nein
81	Schwarze Lütschine	51-80%	16	64	HQ ₃₀	(Ja)
72	Kander	81-100%	21	63	< HQ ₂	Ja

3.3.3 Geschiebedefizit

Beziehungen zwischen dem Abfluss Q und der minimalen und maximalen Geschiebetransportkapazität sind im Anhang C-6 zu finden. Die berechneten Werte für das Geschiebedefizit der ausgewählten Auen folgen dem Defizitgradienten gemäss der nach Hanus et al. (2014) angegebenen Defizitklassen (Tab. 12). Sie liegen innerhalb derselben Klasse oder nur leicht daneben.

Tab. 12: Geschiebedefizitklasse nach Hanus et al. (2014) und berechneter Wert mit Bemerkung zur Übereinstimmung zwischen den zwei Daten.

ObjNr.	Gewässer	Klasse für Geschie- bedefizit (Hanus et al., 2014)	Berechneter Wert für Ge- schiebedefizit	Bemerkung
		[%]	[%]	
55	Sense	0-20%	10	
18	Thur	0-20%	20	
80	Lütschine	21-50%	34	
344	Töss	21-50%	56	
14	Glatt	51-80%	59	
81	Schwarze Lütschine	51-80%	72	
72	Kander	81-100%	80	Gemäss Schälchli et al. (2005) sollte der betrachtete Abschnitt der Klasse 21-50% zugeordnet sein

3.3.4 Charakterisierung der Gewässer

Der Charakter des jeweiligen untersuchten Flussabschnitts ist in den in Anhang C-7 aufgeführten Luftbildern und Photographien der Standorte der Feldmessung zu sehen. Der Verlauf der Glatt und der Lütschine im betrachteten Abschnitt ist leicht bis stark s-förmig. Bei der Glatt befinden sich zudem Bauwerke im Fluss.

3.3.5 Korngrößenverteilung

Die mittels Linienzahlanalyse erhobenen und ausgewerteten charakteristischen Korndurchmesser jeder mit Begehung untersuchten Aue sind in Tab. 13 zusammengefasst. Die Kornverteilungskurven der vier Linienproben pro Aue befinden sich im Anhang C-8. Die Standardabweichung der Kornverteilung σ aller untersuchten Auen erfüllt die Voraussetzung zur Bildung einer Deckschicht. Die im Feld gemessenen Korngrößen stimmen für die Aue an der Sense gut mit den Daten aus den Grundlagen überein, während dies für die anderen drei Auen weniger zutrifft.

Tab. 13: Charakteristische mittlere Korndurchmesser d_m und d_{90} der Sohle und Streuung σ des Sohlenmaterials aus den Linienzahlanalysen. Die für Sense, Lütschine und Glatt angegebene Werte sind die gemittelten Korndurchmesser aus den vier Linienproben. Die gemessenen Korndurchmesser für die Kander basieren auf eine einzige Linienprobe (LP-Nr. 2). Als Vergleich sind auch die Korndurchmesser d_m und d_{90} aus den jeweiligen Grundlagendaten aufgeführt.

ObjNr	Gewässer	Geschiebedefizit	Linienzahlanalyse			Grundlagendaten		
		[%]	d_m [cm]	d_{90} [cm]	σ [-]	d_m [cm]	d_{90} [cm]	Quelle
55	Sense	10%	5.5	13.6	5.4	5.2	15.5	[13]
80	Lütschine	34%	6.8	16.0	4.8	12.6	35.0	[14]
14	Glatt	59%	3.0	7.1	5.4	5.0	15.0	[9]
72	Kander	80%	6.7	16.7	5.2	11.6	28.7	[1]

3.3.6 Innere Kolmation

Mit zunehmendem Geschiebedefizit nimmt die standardisierte mittlere Kolmation ab, d.h. der Grad der inneren Kolmation nimmt zu (Tab. 14). Dabei streuen die einzelnen Messwerte unterschiedlich stark um den Mittelwert. Die höchste gefundene Kolmationsklasse ist in 3 der 4 Auen vom Typ starke Kolmation, dabei ist auch eine leichte Tendenz mit dem zunehmenden Geschiebedefizit erkennbar: Die Anzahl Stellen in welche diese höchste Klasse beobachtet wurde, nimmt zu. Die einzelnen Messwerte sind in 0 aufgeführt.

Tab. 14: Standardisierte mittlere innere Kolmation der Gewässersohle auf Basis von 10 Einzelmessungen, Streuung der Einzelmessungen und Angabe zur höchsten Kolmationsklasse pro Aue.

ObjNr	Gewässer	Geschiebedefizit	Standardisierte mittlere Wert der inneren Kolmation	Streuung der stan- dardisierten Werte	höchste gefundene Kol- mationsklasse
		[%]	[-]	[-]	[Anzahl Stellen]
55	Sense	10%	0.86	0.24	1 x stark
80	Lütschine	34%	0.83	0.18	2 x mittel
14	Glatt	59%	0.76	0.33	2 x stark
72	Kander	80%	0.58	0.35	4 x stark

3.3.7 Quantitative Ausprägung der Wasserspiegelbreitenvariabilität

Die Feldmessung der Wasserspiegelbreiten konnte nur für drei Auen durchgeführt werden. Aus Sicherheitsgründen wurde an der Sense auf die Messung verzichtet.

Die Unterschiede zwischen der mittels zwei Methoden berechneten Variationskoeffizienten sind für die Glatt und Lütschine verhältnismässig klein ($< 10\%$), während bei der Kander ein mehr als die Hälfte kleinerer Variationskoeffizient im Feld gemessen wurde (Tab. 15). Im Anhang C-100 sind die genauen Angaben zum Abfluss während der Feldmessung und zum mittleren Abfluss sowie zur Länge des gemessenen Fliessgewässerabschnittes und zur Gesamtlänge der Aue zusammengefasst. Bei allen drei Auen erfolgte die Feldmessung bei Abflüssen, die unter dem mittleren Abfluss lagen. Im Feld wurde ein ca. 400 m langer Gewässerabschnitt untersucht, was deutlich weniger als die Hälfte der Auengewässerslänge ist.

Tab. 15: Variationskoeffizient der Wasserspiegelbreite VC aus Luftbildern der II. Phase und aus der Feldmessung, prozentualer Unterschied zwischen den beiden VC sowie standardisierter Wert. (-). An der Sense konnte die Breite des Wasserspiegels nicht gemessen werden.

ObjNr	Gewässer	Geschiebedefizit	VC Luftbild	VC Feld	Unterschied VC Luftbild und VC Feld	Standardisierter Wert der VC Feld
		[%]	[-]	[-]	[%]	[-]
55	Sense	10%	0.47	-	-	-
80	Lütschine	34%	0.32	0.29	8.2	0.45
14	Glatt	59%	0.38	0.36	5.7	0.55
72	Kander	80%	0.59	0.21	64.8	0.32

3.4 Zusammenhänge zwischen Ökologie und Geschiebedefizit

Die Zusammenhänge zwischen Geschiebedefizit und den ausgewählten ökologischen Indikatoren wurden mit Hilfe einer linearen Regression untersucht. Die Resultate sind in Tab. 16 zusammengefasst. Die Residuen weisen eine Normalverteilung auf. Die Transformation der Daten erfolgte nach Empfehlungen von Lamprecht (1999). Aus der Regressionsanalyse resultiert, dass die durch das Geschiebedefizit erklärte Varianz in den ökologischen Daten sowie dessen Signifikanz generell gering sind. Nur die Uferlänge weist einen signifikant negativen Zusammenhang mit dem Geschiebedefizit (p -Wert < 0.05) sowie einen hohen Anteil erklärter Varianz auf ($R^2 = 0.62$; Abb. 13).

Tab. 16: Lineare Regression zwischen Geschiebedefizit und ausgewählten ökologischen Indikatoren. (*) Für die Auen an der Glatt, Kander und Lüttschine (ObjNr 14, 72 und 80) wurden die im Feld gemessenen Wasserspiegelbreiten verwendet.

Geschiebedefizit (Transformation: Arcsin-Wurzel) versus...	Lineare Regression der Form $y = a \cdot x \pm b$			R^2	p-Wert	
	Steigung a	Ordinatenabschnitt b	Transformation			
Uferlänge	- 0.303	+0.700	logarithmisch	0.619	0.036	
WSP-Breitenvariabilität	nur aus Geodaten	+0.193	+0.527	Arcsin-Wurzel	0.212	0.299
	ergänzt durch Felddaten*	- 0.087	+0.672	Arcsin-Wurzel	0.061	0.594
Patch Dichte	der auentypischen Vegetation	- 0.088	+0.029	logarithmisch	0.028	0.718
	der Kräuter	- 0.335	- 0.268	logarithmisch	0.114	0.459
	der Weichholzaue	+0.236	- 0.820	logarithmisch	0.024	0.769
	der Hartholzaue	- 0.116	- 0.469	logarithmisch	0.017	0.780
Evenness	der Habitatdiversität	+0.054	- 0.181	logarithmisch	0.077	0.546

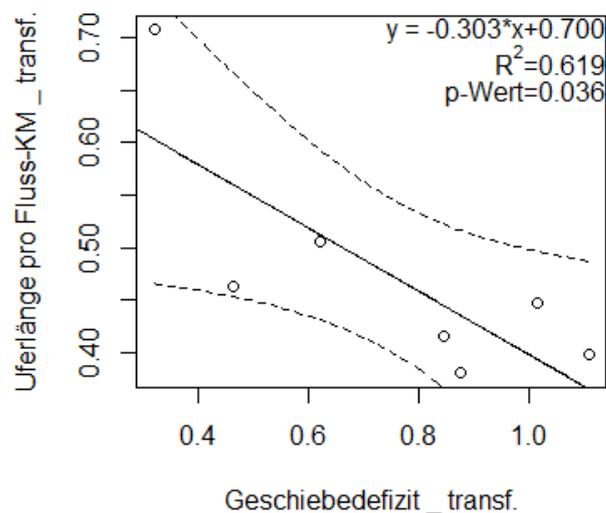


Abb. 13: Negativer linearer Zusammenhang zwischen Geschiebedefizit und Uferlänge.

4 Diskussion

4.1 I. Phase – Auenauswahl

Erste Bereinigung

Ungefähr drei Viertel der Objekte wurden im Jahr 1992 ins Bundesinventar aufgenommen, der Rest mit der Ergänzung im Jahr 2003. Seit der Aufnahme ins Inventar können sich bei einigen Objekten die Typologie und der Zustand verändert haben, wie zum Beispiel bei den drei Objekten, die nicht in die Arbeit einbezogen wurden, weil sie heutzutage Seeufer-Auen sind (zwei Auen an der Aare, ObjNr 36 und 53, und eine Aue an der Reuss, ObjNr 91). Aus diesem Grund ist die Revision des Aueninventars wohl willkommen, um den Zustand der Auen zu überprüfen und die Daten zu aktualisieren.

Zweite Bereinigung

Bezüglich des räumlichen Bereinigungseffekts der angewandeten Kriterien (vgl. Übersichtskarte in Anhang A-4) gilt es zu beachten: Viele Auen in den alpinen Kantonen wurden aufgrund der Kriterien Schwall-Sunk und Abfluss ausgeschlossen. Dies lässt sich durch das Vorhandensein von Wasserkraftwerken in den Bergtälern, die das Wasser aus- oder umleiten, erklären. Zahlreiche Auen, die diese beiden Kriterien bestanden, werden durch das Bereinigungskriterium Ökomorphologie ausgeschlossen: In den kleinen alpinen Fließgewässern am Anfang eines Flusssystemes ist die Ökomorphologie aller Gewässerabschnitte nicht vollständig dokumentiert. Viele Auen fallen raus, weil die Klassifikation der Ökomorphologie nicht repräsentativ für das ganze Gewässernetz in der Aue ist. Der Faktor Höhenlage schliesst zudem weitere Objekte auf dem Alpenbogen aus. Daraus kann man schliessen, dass aufgrund der ausgewählten Faktoren in dieser Arbeit eher Auen in den tieferen Lagen analysiert werden.

Zum Faktor Artevielfalt ist noch Folgendes zu erwähnen: Die Angaben hinsichtlich der Artenvielfalt erfolgen auf Basis der aktuell verfügbaren Daten zur Verbreitung der Arten, welche in den Datenzentren von Info Species erfasst sind (Schmidt und Fivaz, 2013). Die Datenzentren sammeln Daten zum Artenvorkommen anhand von der Bevölkerung ausgefüllten Meldeformulare. Es ist daher zu bedenken, dass es in wenig durch den Mensch besiedelten Gebieten grosse Wissens- bzw. Datenlücken für fast alle Arten gibt. Zudem kann aus dem Datensatz nicht abgeleitet werden, ob ein Fließgewässerabschnitt wegen fehlenden Daten oder wegen ungenügendem Artenreichtum nicht zu den artenreichsten Abschnitten gehört. Wegen dieser kritischen Überlegung zur Datengrundlage wird der Faktor Artenvielfalt als letzter in der zweiten Bereinigung berücksichtigt. Dies erklärt auch, wieso in der dritten Bereinigung zwei Objekte trotz Nichtbestehens dieses Faktors einbezogen wurden.

Dritte Bereinigung

Drei der 15 ausgewählten Objekte in der Auenliste am Ende der Bereinigungen in Phase II erfüllen nicht das Bereinigungskriterium für die Faktoren ausgewählte Artenvielfalt und menschlicher Einfluss im EZG. Sie wurden trotzdem ausgewählt aufgrund der Vertretung aller Geschiebedefizitsklassen.

Diesen beiden Faktoren wurde eine tiefere Priorität zugeordnet, d.h. sie wurden als letzte in der Reihenfolge der eingesetzten Bereinigungsfaktoren berücksichtigt. Die Reihenfolge der Faktoren bzw. der Bereinigungskriterien hat allerdings keinen Einfluss auf die Auenauswahl der II. Phase, da sowieso nur 15 Auen, aus zeitlichen und organisatorischen Gründen, ausgewählt werden mussten.

Die Reihenfolge hat aber einen Einfluss auf die Analyse, indem der mögliche Zusammenhang zwischen dem Geschiebedefizit und den einzelnen Faktoren anhand der in Anhang A-3 vorliegenden Darstellung nicht sichtbar ist, ausser beim ersten Faktor der Reihenfolge. Mit zunehmendem Geschiebedefizit sind mehr Objekte durch Schwall-Sunk möglicherweise beeinträchtigt vorhanden.

4.2 II. Phase – Ökologische Untersuchung

Anhand der Resultate der ökologischen Untersuchung (in Abb. 12) fällt es schwer, eine Beeinflussung des Geschiebedefizits auf die Landschaftsindikatoren zu sehen. Dafür können mehrere Erklärungen bzw. Gründe erwähnt werden.

Beeinflussungsfaktoren

Ein erster möglicher Grund dafür kann der unberücksichtigte Einfluss von weiteren Faktoren sein. An dieser Stelle wird auf die Resultate der relativen Uferlänge und der Wasserspiegelbreitenvariabilität kurz zurückgegriffen, um deren Abhängigkeit von der Flussmorphologie und der Wasserspiegellage zu erklären.

Die Gewässer der untersuchten Auen weisen fast alle Uferlängen im Bereich des Minimalwerts von 2 auf, der höchste Wert von 5,1 km/km wird an der Sense 8ObjNr 55) erreicht (Abb. 12, B). Der hohe Wert für die Uferlänge der Sense kann durch ihren verzweigten Verlauf (Angabe zur Verlauftypologie nach Hanus et al. (2014)) erklärt werden. Die Uferlänge hängt von der Flussmorphologie ab: In einem durchgehend kanalisierten Gerinne verlaufen die Ufer parallel zur Flussachse, so dass die Uferlänge einen Minimalwert von 2 km Ufer pro Flusskilometer hat. In stark verzweigten Gewässern, wie zum Beispiel dem Tagliamento in Norditalien, kann die Uferlänge hingegen bis 25 km/km bei Mittelwasser erreichen (Tockner und Stanford, 2002).

Man soll aber aus der Morphologie nicht direkt auf die Uferlänge schlussfolgern. Der zweithöchste berechnete Wert (4.6 km/Fluss-km) wird an der Emme (ObjNr 44) beobachtet, welche dort gemäss Hanus et al. (2014) einen gestreckten Verlauf hat und die hohe Uferlänge ist durch den schmalen Gerinnearm parallel zum Hauptfluss gegeben. Wenn aber die Wassertiefe kleiner wäre, könnte beispielsweise dieser Gerinnearm nicht mehr durchströmt werden. Die Uferlänge hätte dort dann bloss einen Wert von ca. 2 km/km. Tatsächlich wird die Uferlänge auch massiv durch den Wasserstand beeinflusst. Dies zeigt auch das Beispiel Tagliamento: Die Uferlänge kann bei Niedrigwasser den Wert von 20 km/km und bei Mittelwasser 25 km/km aufweisen und bei Hochwasser bis auf ungefähr 2 km/km zurücksinken (Tockner und Stanford, 2002).

Die Uferlänge steht in einem engen Zusammenhang mit der Variabilität der Wasserspiegelbreite (Woolsey et al., 2005). Zarn (1997) hat in seinen Versuchen die Abhängigkeit der Wasserspiegelbreite von Morphologie und Wasserstand, genauer vom Verhältnis Flussbettbreite zu Wassertiefe untersucht: Die Wasserspiegelbreite nimmt mit zunehmender Wassertiefe zu, während das Verhältnis der Wasserspiegelbreite zur Flussbettbreite durch die Morphologie stark beeinflusst ist. Ein weiterer Faktor, der die Variabilität der Wasserspiegelbreite beeinflussen kann, ist die Ökomorphologie: Bei stark beeinträchtigter Ökomorphologie wird die natürliche Wasserspiegelbreite durch feste Uferverbauungen eingeschränkt, beispielsweise wie am untersuchten Gewässerabschnitt an der Sense (Anhang C-7).

Die mögliche Beeinflussung durch weitere, externe Faktoren lässt sich beispielsweise auch anhand des Habitats Vegetation erklären: Gemäss Auenverordnung (Art.5) ist in den Auen eine gewisse landwirtschaftliche und waldwirtschaftliche Nutzung immer noch zugelassen. Auenwälder können forstlich durch unterschiedlichen Bewirtschaftungskonzepte und Eingriffsmassnahmen bewirtschaftet werden, wobei dies einen Einfluss auf den Auenwaldbestand hat (Auenberatungsstelle, 2008; Teuscher et al., 1995). In den Auen finden zudem auch natürliche Prozesse statt, die diese ökologischen Indikatoren beeinflussen, nämlich Waldwachstum, intra- und interspezifische Konkurrenz oder natürliche Störungsfaktoren wie zum Beispiel Windwurf, Waldbrand und Verbiss durch Wildtiere (Frehner et al., 2005). Wichtig zu beachten ist zudem, dass der Flächenanteil der einzelnen Vegetationstypen auch von der Perimeterabgrenzung des Auengebiets abhängig ist. Die Perimeter waren/sind oft durch sichtbare Anhaltspunkte wie Waldgrenzen, Bäche, Wege und Strassen festgelegt (Teuscher et al., 1995). Die sehr hohen prozentualen Flächenwerte an Hartholz bei den Auen an der Emme (ObjNr 44) und an der Schwarzen Lutschinen (ObjNr 81) in Abb. 12 D können durch eine grosszügige Ausscheidung des Auengebiets um das Fliessgewässer bedingt sein. Wegen dieser Abhängigkeit wurde in der vorliegenden Arbeit darauf verzichtet, ein Zusammenhang zwischen Geschiebedefizit und Flächenanteil der auentypischen Vegetation zu untersuchen.

Methodik

Ein zweiter diskutierbarer Punkt ist auch die eingesetzte Methodik für die ökologischen Indikatoren. Insbesondere die Resultate zur Wasserspiegelbreitenvariabilität und zur Uferlänge sind mit Vorsicht zu interpretieren. Die Berechnung basiert auf den aus Luftbilder kartierten Wasserflächen, und nicht aus Feldmessungen, wie z.B. Woolsey et al. (2005) für die Wasserspiegelbreitenbestimmung empfehlen. Die Kartierung der Wasserfläche ist teils jedoch fraglich: Die kartierten Wasserflächen können nicht immer die tatsächliche Form und Grösse aufweisen und wahrscheinlich sind sie kleiner und/oder als nicht zusammenhängend kartiert. Mögliche Gründe können sein, dass das Wasser von der Ufervegetation zum Teil überdeckt war, die Wassertiefe gering war und entsprechend als Sediment kartiert wurde oder dass das Gewässer ausserhalb vom ausgeschiedenen Auenperimeter weiterfliesst. Form und Grösse der Wasserflächen sind zudem vom Wasserstand abhängig, wie bereits diskutiert. Es wird hier aber angenommen, dass die Luftbilder bei ähnlichen Wasserständen in allen Auen aufgenommen wurden.

Zudem basiert die Berechnung auf eine Vereinfachung: Der Perimeter der Wasserfläche wird als Länge der Ufer angenommen (vgl. Gl. 6). Je nach Gewässerbreite und Zerstückelung der kartierten Wasserfläche kann dadurch die relative Uferlänge künstlich erhöht werden.

Darstellung

Es ist mit den untersuchten Auen keine klare Aussage zur möglichen Beeinflussung des Geschiebehaushaltes auf die Auenökologie möglich. Dies kann an der Darstellung bzw. Anordnung der Auenobjekte entlang der x-Achse liegen. Das Geschiebedefizit ist in Phase I dieser Arbeit in Klassen angegeben, also als diskrete und nicht als kontinuierliche Grösse. Vielleicht sind zwei Auen mit ähnlichem Geschiebedefizit in zwei unterschiedlichen Defizitklassen eingeteilt und die grafische Anordnung der Auen entlang der x-Achse der Abbildungen, welche ordinal nach ObjNr der Aue innerhalb jeder Klasse ist, ermöglicht keine korrekte Darstellung bzw. täuscht über mögliche Zusammenhänge hinweg.

Aus diesem Grund sind die Resultate der flussbaulichen Untersuchung sehr wichtig (Phase III) und es wird auf die Zusammenhänge in Kap. 3.4 verwiesen.

4.3 III. Phase – Flussbauliche Untersuchung

Grundlagen

Das in der Berechnungen verwendete Querprofil wurde aus drei nachfolgenden Querprofilen abstrahiert. Seine Repräsentativität ist darum, je nach Querprofilabstand der Vermessungen, auf wenige Hundert Meter beschränkt.

Die vorliegenden Grundlagen weisen unterschiedliche zeitliche Herkunft auf: Einige Vermessungen und Geschiebehaushaltsstudien sind zum Teil mehr als 10 Jahre alt. Auch die hydrologische Grundlage ist zwischen den Auen bezüglich Länge der Messreihe sehr unterschiedlich: mehr als 80 Messjahre für Sense und Lüttschne und nur 7 Messjahre für die Schwarze Lüttschne. Neben der kurzen Messperiode kommt der Schwarzen Lüttschne noch dazu, dass die Abflussdaten der Messstation anhand des Verhältnisses zwischen den EZGen von Messstation und der Aue als nicht so repräsentativ eingestuft werden kann (Skalierungsfaktor nur 0.57). Aus diesem Grund wurde die Dauerkurve der Abflüsse der Schwarzen Lüttschne mittels Gl. 10 korrigiert.

Wahl der Grenzabflüsse, Stabilität der Deckschicht und Abflusskapazität

Bei Verwendung des Grenzabflusses Q_D für das Aufbrechen der Deckschicht scheint die Deckschicht in allen Auen relativ stabil zu sein. Ein lokales Aufreißen der Deckschicht im zentralen Bereich des Gerinnes erfolgt bei Hochwässern mit einer Jährlichkeit von etwas mehr als 2-5 Jahren, ausser an der Schwarzen Lüttschne (mehr als 30 Jahren, auf Basis der korrigierten statistischen Hochwasserabflüsse). Daher muss eher selten mit einem Aufbrechen der Deckschicht im zentralen Bereich gerechnet werden. Der Grenzabfluss für eine Erosion der Deckschicht über die gesamte Flussbreite liegt höher als der Grenzabfluss für die Erosion im zentralen Bereich. Das Aufbrechen der Deckschicht über die gesamte Breite ist daher seltener, oder sogar äusserst unwahrscheinlich, wie beispielsweise an der Glatt.

Im Allgemeinen bedeutet das, dass bei den betrachteten Abflüssen und Gewässerabschnitten wenige Veränderungen im Flussbett statt finden. Geschiebedynamik kann trotzdem vorhanden sein, und dies lässt sich anhand von zwei Fällen diskutieren. Beim Vorhandensein einer Deckschicht kann bei kleineren Abflüssen, bei welchen sie (noch) nicht erodiert wird, feineres Geschiebe über die Deckschicht hinwegtransportiert und auch abgelagert werden. Man spricht in diesem Fall von laufendem Geschiebe (Bezzola, 2016). Durch dynamische Ablagerung und Verschiebung von laufendem Geschiebe können neue Habitate entstehen (Weber et al., 2017). Wenn aber keine Deckschicht vorhanden ist, wie es für ungefähr die Hälfte der untersuchten Abschnitten der Fall ist oder sein kann, dann können häufiger Erosion und Umlagerung des Sohlenmaterials geschehen (da Q_0 kleiner Q_D ist, d.h. der Transport beginnt, bevor die Deckschicht ausreißt).

Allerdings, bei Betrachtung des Gerinnenverlaufs könnte sich die Flusssohle doch noch relativ häufig verändern: Der mäandrierende oder leicht S-förmige Verlauf, beispielsweise der Glatt, führt zu einer gewissen Erhöhung der Beanspruchung an den jeweiligen Kurvenaussenseiten. Diesen Aspekt wurde aber in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Die Stabilität der Flusssohle hängt auch indirekt von der Abflusskapazität ab: Je grösser die Abflusskapazität, desto höher der bordvolle Abfluss. Eine ausgeprägte Deckschicht kann dadurch erodiert werden, ohne dass das Wasser seine Erosionskraft durch Ausuferung auf die Schwemmebene verliert.

Die Ufervegetation kann die Abflusskapazität beeinflussen. Im Falle eines stark bewachsenen Querschnitts reduziert sich die Abflusskapazität, die Pegel-Abfluss-Beziehung wird flacher und Ausuferungen treten häufiger auf. Der Einfluss der Ufervegetation konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden. Der Ausuferungsprozess selbst wurde auch nicht untersucht, darum gibt es keine Angaben zur Ausdehnungsfläche und Störungskraft der Überschwemmung.

Wahl der Geschiebetransportformel und der Geschiebefracht

Die zur Berechnung der Geschiebetransportkapazität verwendete Geschiebetransportformel von Wong und Parker (2006) wurde aus demselben Datensatz an Modellversuchen wie der in Flussbau übliche Ansatz von Meyer-Peter und Müller (1948) abgeleitet. Beide Formeln sind sehr ähnlich aufgebaut, mit der Ausnahme der

Reduktion des Vorfaktors von 8 gemäss Meyer-Peter und Müller (1948) auf 4.93 gemäss Wong und Parker (2006), vgl. dazu Gl. 13 resp. Gl. 14. Es resultiert dadurch nach Wong und Parker (2006) eine ungefähr halb so grosse Transportkapazität.

Die Versuche von Meyer-Peter und Müller lagen in einem Gefällsbereich von 0.04% bis 2.3%, allerdings ist der Ansatz für kiesführende Flüsse mit einem Gefälle unter etwa 0.5% am besten geeignet (Bezzola, 2016). Vier der sieben untersuchten Gewässer weisen jedoch höhere Gefälle auf (zwischen 0.7 und 1.7%). Die Wahl der Formel nach Wong und Parker (2006) eignet sich gut dafür, da die Formel nach Meyer-Peter und Müller (1948) die Transportkapazität bei höheren Gefällen überschätzt (Bezzola, 2016; Smart und Jäggi, 1983).

Wegen der hohen Sensitivität der Transportkapazität auf das Gefälle, ist es wichtig, das Gefälle genau zu kennen. Das Gefälle wurde mindestens über einen Kilometer, bei Gefällsknicken über eine kürzere Strecke, gemittelt.

Bezüglich der verwendeten ausgewählten Geschiebefracht gilt es zu beachten, dass die Wahl der Geschiebefracht das daraus berechnete Geschiebedefizit beeinflusst: Je höher die Differenz zwischen minimaler und maximaler Geschiebefracht, desto abweichender und unsicherer der Geschiebedefizitwert.

Geschiebefizit

Die Geschiebedefizitwerte aus den Resultaten der Berechnung im Rahmen dieser Arbeit und der Klassifikation von Hanus et al. (2014) stimmen relativ gut überein. Es ist zu erwähnen, dass die Klassifikation von Hanus et al. (2014) unter anderem auf der zusammenfassenden Studie von Schälchli et al. (2007) basiert, welche zum Teil dieselben Geschiebehaushaltsstudien berücksichtigt hat.

Der berechnete Wert des Geschiebedefizits ist mit gewissen Unsicherheiten verbunden, grundsätzlich durch die bereits diskutierte Repräsentativität des abstrahierten Querprofiles, Aktualität der Grundlagen, Wahl der Grenzabflüsse und Wahl der berechneten Geschiebefracht.

Auch in der Klassifikation nach Hanus et al. (2014) gibt es unterschiedliche Zuverlässigkeitsklassen: Einige Klassifikationen stützen auf ausgewerteten Daten, andere auf gemessenen Daten ab. Gemäss Schälchli et al. (2007) ist das Geschiebedefizit bei der Kander (ObjNr 80) in die Klasse 21-50% einzustufen, und nicht 81-100% wie von Hanus et al. (2014) angegeben.

Feldmessung

Die Feldarbeit konnte wie geplant durchgeführt werden, mit Ausnahme der Aue an der Sense, wo auf die Messung der Wasserspiegelbreite aus Sicherheitsgründen verzichtet wurde (erhöhter Abfluss). Der Standort der Aue hätte angepasst werden können, da fast die ganze Talebene der Sense als Auengebiet ausgeschieden ist. Darauf wurde jedoch verzichtet, da die Linienzahlanalysen möglichst an der Stelle zu erheben waren, von der die Angaben zu den Korndurchmessern in den Grundlagen stammen.

Korngrößen

Die vier Kornverteilungskurven jeder beprobte Aue sehen ähnlich aus. Nur an der Glatt lassen sich zwei Hauptkurven erkennen, welche zum Aussortierungsprozess in Fließrichtung entlang der Kiesbank zurückzuführen sind: flussabwärts sind die Körner feiner als am Anfang der Kiesbank (Rachelly, 2018; Weber et al., 2017).

Kolmation

Der Grad der inneren Kolmation nimmt mit zunehmendem Geschiebedefizit zu. Allerdings stützt sich diese Aussage nur auf vier Auenobjekte und Mittelwerte von nur 10 Stellen pro Auenobjekt. Die Kolmation variiert zwischen den einzelnen Messstellen stark. Die Streuung der Werte kann einerseits an der einfachen Klassifikationsmethode und andererseits an lokalen räumlichen Unterschieden der Gewässersohle bezüglich Kolmation liegen (Schälchli, 1993). Die höchste beobachtete Kolmationsklasse (starke Kolmation) kommt in drei der vier untersuchten Auen vor, jedoch steigt die Häufigkeit mit zunehmendem Geschiebedefizit.

Die Sohle natürlicher Gewässer tendiert bei längerer Zeit ohne Hochwasser zu kolmatieren (Schälchli, 2002). Im Rahmen dieser Arbeit gibt es aber keine Angabe zur zeitlichen Distanz vom letzten Hochwasser, welches zur Dekolmation hätte führen können. Neben Hochwasser ist das Grundwasser auch ein Einflussfaktor auf die Dekolmation der Gewässersohle. Langandauernde Exfiltrationsverhältnisse von Grundwasser ins Gewässer können die innere Kolmation durch das Spülen der Zwischenräume begrenzen oder sogar verhindern (Schälchli, 1993). Wegen diesen unberücksichtigten Einflussfaktoren und der geringen Anzahl an gemessenen Daten wurde keine lineare Regression zur Untersuchung der Beziehung zwischen Geschiebedefizit und Kolmation der Sohle durchgeführt.

WSP-Breite

Die im Feld gemessenen Werte der Wasserspiegelbreitenvariabilität stimmen für zwei von drei untersuchten Auen gut mit den Werten basierend auf Luftbildern überein. Für die Aue an der Kander hingegen sind grosse Unterschiede (65%) vorhanden, welche sich aufgrund folgender Gründe ergeben könnten. Erstens können die Flussmorphologie und der Wasserstand durch die zeitliche Distanz zwischen Felderhebung und Luftbildaufnahme unterschiedlich sein. Das hat Auswirkungen auf die Wasserspiegelbreite. Zweitens wurde die Feldmessung nur entlang eines Abschnitts durchgeführt, dessen Repräsentativität für das gesamte Auengewässer nicht überprüft wurde. Drittens ist die Feldmessung mit gewissen Ungenauigkeiten behaftet: unscharfe Grenze zwischen Wasser und Land, unregelmässige Messabstände, Messgenauigkeit. Neben den genannten Punkten sind die bereits diskutierten Unregelmässigkeiten in der Kartierung der Habitatzusammensetzung zu erwähnen (vgl. Diskussion im Kap. 4.2). Für die Aue an der Kander wurden die aus den Luftbildern ermittelten Werte durch die mittels Feldmessung erhobenen Daten ersetzt und diese für die Berechnung der linearen Regression verwendet.

4.4 Zusammenhänge zwischen Ökologie und Geschiebedefizit

Die lineare Regression zeigt einen signifikanten negativen Zusammenhang zwischen Uferlänge und Geschiebedefizit (p -Wert = 0.036, $R^2=0.619$, negative Steigung der Regressionsgerade), was die Hypothese H2 bestätigt.

Zwischen Geschiebedefizit und den anderen untersuchten ökologischen Aspekten (Wasserspiegelbreitenvariabilität, Patch Dichte der auentypischen Vegetation und Evenness der Habitatdiversität) besteht dagegen kein signifikanter linearer Zusammenhang.

Von den fünf in der Einleitung formulierten Hypothesen, kann somit nur die zweite (H2: Die Länge der Uferlinie nimmt mit zunehmendem Geschiebedefizit ab.) bestätigt werden. Für die anderen (H1, H3, H4, H5) wird keine Evidenz gefunden. Aus diesen Ergebnissen lassen sich zwei Punkte diskutieren:

Erstens geht es um die Höhe des R^2 -Wertes: Je nach Forschungsdisziplin sind unterschiedliche Grössen des R^2 zu erwarten, um eine gute Aussagekraft des statistischen Modells zu belegen. Ein R^2 -Wert von 1 bedeutet, dass die gesamte Variation in der Zielgrösse durch die erklärende Grösse abgedeckt wird. Hohe R^2 -Werte ($R^2 > 0.8$) werden aber v.a. unter kontrollierten experimentellen Bedingungen wie zum Beispiel in einem Laborversuch erreicht. In der Natur sind solch hohe Werte selten, weil viele zusätzliche Aspekte und Beeinflussungsfaktoren vorhanden sind, die nicht berücksichtigt oder ausgeschlossen werden können (Pflieger, 2014).

Zweitens kann davon ausgegangen werden, dass sich die Beeinflussungsstärke und die Signifikanz vom Geschiebedefizit auf die Auenökologie mit zunehmender Entfernung von der Flusssohle reduzieren. Mit grösserem Abstand von der Sohle, d.h. dort, wo der Geschiebetransport stattfindet und ein Geschiebedefizit unmittelbare Auswirkungen hat, gibt es mehr Zeit und mehr Raum für andere Einflussgrössen (siehe bereits diskutierte Möglichkeiten in Kap. 4.2).

Die Morphologie sollte beispielweise für eine genauere Analyse der Wasserspiegelbreitenvariabilität und der Länge des Ufers auch miteinbezogen werden. Die natürliche Regimebreite und der natürliche Morphologietyp könnte mit dem aktuellen Zustand verglichen werden. Wenn morphologische Unterschiede vorliegen, sollte man zudem untersuchen, ob sie durch das Geschiebedefizit oder weitere menschliche Eingriffe entstanden sind. Die Hochwassergeschichte und die menschliche Nutzung des Grundwassers spielen auch eine Rolle: Wann ist das letzte Hochwasser aufgetreten? Wie stark schwankt der Grundwasserspiegel? Beide Faktoren können einen Einfluss auf die Dekolmationsprozesse der Gewässersohle sowie auf die Vegetation haben. Insbesondere die Auenvegetation wird nicht nur durch Überschwemmung oder Grundwasserschwankungen im Wurzelraum beeinflusst, sondern auch durch das Klima im Allgemeinen (Foote et al., 1996). Ausserdem stellt der Klimawandel eine weitere Unbekannte für terrestrische und aquatische Bereiche der Fließgewässerökosysteme dar, da sich das Abflussregime, die Niederschlagsverteilung und die Temperatur verändern werden (Allan und Castillo, 2007).

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein signifikanter Zusammenhang mit dem Geschiebedefizit festgestellt: Mit zunehmendem Geschiebedefizit reduziert sich die Uferlänge. Für die anderen untersuchten ökologischen Aspekte der Auen konnte zum Teil leichte Tendenzen, aber keine signifikanten Zusammenhänge gefunden werden. Das Fehlen von signifikanten Zusammenhängen könnte an mehreren Gründen liegen. Erstens wurden relativ wenige Auen untersucht (nur 7 Auen für die lineare Regressionsanalyse), wobei bei Betrachtung von mehreren Objekten vielleicht ein Zusammenhang sichtbar geworden und die Signifikanz höher gewesen wäre. Zweitens könnten die eingesetzte Methodik und die verwendeten Grundlagen eine Limitierung des Modells darstellen oder sogar eine Verzerrung der Zusammenhänge verursachen. Drittens konnten die betrachteten Einflussfaktoren vielleicht nicht vollständig abgebildet werden und weitere zusätzliche Einflussfaktoren wurden nicht berücksichtigt.

Darüber hinausgehend, auch wenn kein signifikanter Zusammenhang bewiesen wurde, bedeutet das nicht, dass keine Beziehung zwischen Geschiebedefizit und der ökologischen Variable vorliegt. Es könnte eine nicht lineare Beziehung bestehen (Lamprecht, 1999). Auch wenn ein signifikanter Zusammenhang vorliegt, bedeutet dies nur, dass statistisch ein Zusammenhang zwischen den zwei Grössen besteht. Es könnte aber sein, dass der Zusammenhang indirekt entsteht und beide Grössen von einer dritten Grösse, die nicht berücksichtigt wurde, beeinflusst werden. Mit der vorliegenden Analyse werden räumliche Muster der Auenlandschaft untersucht und nicht zwingend Ursache-Wirkungs-Beziehungen nachgewiesen.

Bezüglich der im Rahmen dieser Masterarbeit verwendeten Daten und gewählten Methodik sind folgende Verbesserungen möglich bzw. Empfehlungen für weitere Arbeiten denkbar.

Mit dieser Arbeit wird nur die räumliche Komponente der Dynamik untersucht. Die Zeit ist die zweite Komponente, welche eine Rolle spielt. Interessant zu untersuchen wäre, ob und wie sich die ökologischen Merkmale im Laufe der Zeit verändern. Zudem wäre es interessant zu wissen, seit wann in einem Fließgewässer ein Geschiebedefizit besteht und ob das Geschiebedefizit über die Jahrzehnte immer konstant war.

Man könnte die zeitliche Dynamik untersuchen, wenn eine bessere und umfangreichere Datengrundlage über die Vergangenheit erarbeitet würde, z.B. durch Digitalisierung von historischen Landeskarten und Luftbildern, welche bis in die 40er Jahre zurück gehen können, mit der Berücksichtigung der Aufnahmen des Schweizerischen Landesforstinventars und mit der Recherche von Hochwasserschutzprojekten und Flusskorrekturen. Die Datensätze könnten auch laufend erweitert werden, indem weitere regelmässige Messungen mittels Luftbildaufnahmen oder Felderhebungen durchgeführt werden. Zusätzlich wären Simulationen mit computergestützten, mehrdimensionalen, hydrodynamischen und numerischen Modellen hilfreich, wenn möglich mit Integration von biologischen Modellen (z.B. Wachstumsprozesse der Vegetation). Und schliesslich darf nicht vergessen werden, dass die Auen Lebensräume sind: Die Pflanzen und Tiere und deren Interaktionen können selbst Auswirkungen auf ihre Habitate auslösen, beispielweise durch Herbivorie und Durchwurzelung.

Schlussendlich, ausgehend davon, dass die Qualität der auentypischen Lebensräume unter anderem von der lateralen Vernetzung abhängt und gegeben den signifikanten Zusammenhang zwischen Geschiebedefizit und Uferlänge, kann auch das Geschiebedefizit als Beurteilungskriterium für den ökologischen Zustand der Auen verwendet werden. Und durch Sanierung des Geschiebehaushaltes könnten die auentypischen Lebensräume geschützt und deren Vernetzung gefördert werden.

6 Danksagung

An Dr. Christine Weber und Cristina Rachelly geht ein besonderer Dank, dass sie die Entstehung dieser Masterarbeit ermöglicht haben. Ihre konstruktiven Rückmeldungen und Hinweise habe ich sehr geschätzt und die interessanten und anregenden Diskussionen haben mich für die Interdisziplinarität dieser Arbeit begeistert. Prof. Dr. Robert Boes und Dr. Volker Weitbrecht von der VAW möchte ich ebenfalls danken für die wertvollen und kritischen Inputs während den Vorweisungen und der Schlusspräsentation.

Christian Ginzler (WSL) danke ich für die Shapefiles zur Auenkartierung, die er mir zur Verfügung gestellt hat. Ein Dankeschön geht auch an Prof. Dr. Felix Kienast (ETHZ/WSL), für die Bereitstellung der Software FRAGS-TATS.

Für die Hilfe bei der Feldarbeit danke ich Cristina, meiner Schwester Eva und Gabriel Zehnder. Ich bin meinen beiden Betreuerinnen und meiner Freundin Lea Portmann besonders dankbar für das Korrekturlesen dieses Berichtes und für ihre Hinweise auf Ergänzungs- oder Ausformulierungsbedarf. Herzlichen Dank!

Zum Schluss, aber deshalb nicht weniger wichtig, möchte ich mich auch bei meiner Familie und meinem Freund für die herzliche Unterstützung bedanken.

Quellenverzeichnis

Literatur

- Allan, J.D. und Castillo, M.M. (2007). *Stream ecology. Structure and function of running waters*, Dordrecht, Niederlande: Springer.
- Auenberatungsstelle (2008). *Auendossier: Faktenblätter*, Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU.
- Baumgartner, M. (2017). *Restwassersanierung nach Art. 80 ff. GSchG: Stand Ende 2016 und Entwicklung seit Ende 2014*. Bundesamt für Umwelt BAFU.
- Bezzola, G.R. (2016). *Flussbau*.
- Bruder, A., Schweizer, S., Vollenweider, S., Tonolla, D. und Meile, T. (2012). *Schwall und Sunk: Auswirkungen auf die Gewässerökologie und mögliche Sanierungsmassnahmen*. Wasser Energie Luft 104, 257-264.
- Bunn, S.E. und Arthington, A.H. (2002). *Basic Principles and Ecological Consequences of Altered Flow Regimes for Aquatic Biodiversity*. Environmental Management 30, 492-507.
- Di Giulio, M., Franca, M.J., Scheidegger, C., Schleiss, A., Vetsch, D. und Weber, C. (2017). *Sediment- und Habitatsdynamik in Fliessgewässern*, Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU.
- Eawag, EPFL-LCH, ETHZ-VAW und WSL (2016). *Angewandte, praxisorientierte Forschung im Bereich Wasserbau und Ökologie. Forschungsprojekt „Lebensraum Gewässer – Sedimentdynamik und Vernetzung“, 2017-2021*. Projektantrag.
- Fink, S., Döring, M., Franca, M.J., Martín Sanz, E., Nadyeina, O., Robinson, C., Schleiss, A. und Scheidegger, C. (2017). *Dynamik und Biodiversität in Auen*. In: Geschiebe- und Habitatsdynamik. Merkblatt-Sammlung Wasserbau und Ökologie. Bundesamt für Umwelt BAFU Merkblatt 5.
- Finlayson, C.M. (2012). *Forty years of wetland conservation and wise use*. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 22, 139-143.
- Fischnetz (2004). *Dem Fischrückgang auf der Spur*. Schlussbericht des Projekts Netzwerk Fischrückgang Schweiz – «Fischnetz».
- Foote, A.L., Pandey, S. und Krogman, N.T. (1996). *Process of wetland loss in India*. Environmental Conservation 23, 45-54.
- Frehner, M., Wasser, B. und Schwitter, R. (2005). *Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion*, Bern: BUWAL.
- Gallandat, J.-D., Gobat, J.-M. und Roulier, C. (1993). *Kartierung der Auengebiete von nationaler Bedeutung*, Bern: BUWAL.
- Güsewell, S. (2017). *Analysis of Ecological Data*.
- Hanus, E., Roulier, C., Paccaud, G., Bonnard, L. und Fragnière, Y. (2014). *Aufwertungsbedarf in den Auen von nationaler Bedeutung. Sanierung von Geschiebehaushalt, Restwasser und Schwall-Sunk. Revitalisierung*. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Abteilung Arten, Ökosysteme, Landschaften.
- Hauer, F.R., Locke, H., Dreitz, V.J., Hebblewhite, M., Lowe, W.H., Muhlfeld, C.C., Nelson, C.R., Proctor, M.F. und Rood, S.B. (2016). *Gravel-bed river foodplains are the ecological nexus of glaciated mountain landscapes*. Science Advances 2.
- Hu, S., Niu, Z., Chen, Y., Li, L. und Zhang, H. (2017). *Global wetlands: Potential distribution, wetland loss, and status*. Science of the Total Environment 586, 319-327.
- Hütte, M. und Niederhauser, P. (1998). *Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer in der Schweiz. Ökomorphologie Stufe F (flächendeckend)*, Bern: BUWAL.
- Jones, D., Cocklin, C. und Cutting, M. (1995). *Institutional and Landowner Perspectives on Wetland Management in New Zealand*. Journal of Environmental Management 45, 143-161.
- Kail, J., Brabec, K., Poppe, M. und Januschke, K. (2015). *The effect of river restoration on fish, macroinvertebrates and aquatic macrophytes: A meta-analysis*. Ecological Indicators 58, 311-321.
- Kienast, F., (2017). Landscape metrics Berechnung? am 23.01.2018. Kontakt: felix.kienast@wsl.ch.

- Kingsford, R.T. (2000). *Ecological impacts of dams, water diversion and river management on floodplain wetlands in Australia*. *Austral Ecology* 25, 109-127.
- Kondolf, G.M. (1997). *Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels*. *Environmental Management* 21, 533–551.
- Kondolf, G.M. und Wolman, M.G. (1993). *The sizes of salmonid spawning gravels*. *Water Resources Research* 29, 2275-2285.
- Kuhn, N. und Amiet, R. (1988). *Inventar der Auengebiete von nationaler Bedeutung. Allgemeiner Teil. Entwurf für die Vernehmlassung*. Eidg. Dep. des Innern, Bundesamt für Forstwesen und Landschaftsschutz, Bern.
- Kürsteiner, L. (1917). *Das neue Elektrizitätswerk der Stadt Chur an der Plessur bei Lüen*. *Schweizerische Bauzeitung* 69, 23-24.
- Lachat, T., Pauli, D., Gonseth, Y., Klaus, G., Scheidegger, C., Vittoz, P. und Walter, T. (2010). *Wandel der Biodiversität in der Schweiz seit 1900. Ist die Talsohle erreicht?*, Bern, Stuttgart, Wien: Haupt Verlag.
- Lamprecht, J. (1999). *Biologische Forschung - Von der Planung bis zur Publikation*, Fürth: Filander-Verlag.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G. und Miller, J.P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*, San Francisco: W.H. Freeman.
- Little, W.C. und Meyer, P.G. (1972). *The Role of Sediment Gradation on Channel Armoring*. Atlanta USA: Georgia Institute of Technology.
- Martín Sanz, E.J. (2017). *Flow sediment interactions in managed rivers: influence on ecosystem structure and function*. Zürich: ETH-Zürich.
- Meyer-Peter, E. und Müller, R. (1948). *"Formulas for Bed-Load Transport"*. Second Meeting IAHSR, Appendix 2. Stockholm, 39-64.
- Müller-Wenk, R., Huber, F., Kuhn, N. und Peter, A. (2003). *Landnutzung in potentiellen Fließgewässer-Auen – Artengefährdung und Ökobilanzen*. Schriftenreihe Umwelt Nr. 361. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 80 S.
- Poff, N.L., Allan, J.D., Bai, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E. und Stromberg, J.C. (1997). *The natural flow regime*. *BioScience* 47, 769-784.
- Rachelly, C., (2018). Unterschiede in der Korngrösse auf einer Kiesbank wegen Sortierung am 06.03.2018. Kontakt: rachelly@vaw.baug.ethz.ch.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J. und Braun, D.P. (1996). *A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems*. *Conservation Biology* 10, 1163-1174.
- Rohde, S., Kienast, F. und Bürgi, M. (2004). *Assessing the Restoration Success of River Widening: A Landscape Approach*. *Environmental Management* 34, 574-589.
- Roth, N.E., Allan, J.D. und Erickson, D.L. (1996). *Landscape influences on stream biotic integrity assessed at multiple spatial scales*. *Landscape Ecology* 11, 141-156.
- Roux, C., Alber, A., Bertrand, M., Vaudor, L. und Piégay, H. (2013). *General overview guideline for the FluvialCorridor toolbox, a new ArcGIS toolbox package for exploring multiscale riverscape at a network scale.*: Sedalp (Sediment Management in Alpin Basins) and CNRS (UMR5600).
- Rust-Dubié, C., Schneider, K. und Walter, T. (2006). *Fauna der Schweizer Auen. Eine Datenbank für Praxis und wissenschaft*, Bern: Haupt Verlag.
- Schälchli, Abegg+Hunzinger und Hunziker, Zarn&Partner (2005). *Geschiebe- und Schwebstoffproblematik in schweizer Fließgewässern*. Bericht von Schälchli, Abegg + Hunzinger, Zürich, 19 S.
- Schälchli, Abegg+Hunzinger und Hunziker, Zarn&Partner (2007). *Reaktivierung des Geschiebehaushalts in Schweizer Fließgewässern. Massnahmen und Kosten*.
- Schälchli, U. (1993). *Die Kolmation von Fließgewässersohlen: Prozesse und Berechnungsgrundlagen* Zürich: ETH-Zürich.
- Schälchli, U. (2002). *Kolmation. Methoden zur Erkennung und Bewertung*, Dübendorf: Eawag.

- Schmidt, B. und Fivaz, F. (2013). *Fliessgewässerabschnitte mit hoher Artenvielfalt oder national prioritären Arten. Grundlagen für die Planung von Revitalisierungen.*, Neuchâtel: CSCF/karch.
- Smart, G.M. und Jäggi, M.N.R. (1983). *Sedimenttransport on steep slopes*. Zürich: EZH-Zürich.
- Teuscher, F., Roulier, C. und Lussi, S. (1995). *Vollzugshilfe zur Auenverordnung*. Reihe Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 43 S.
- Thielen, R., Tognola, M., Roulier, C. und Teuscher, F. (2002). *2. Ergänzung des Bundesinventars der Auengebiete von nationaler Bedeutung. Technischer Bericht*. Schriftenreihe Umwelt Nr. 341. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 143 S.
- Tockner, K. und Stanford, J.A. (2002). *Riverine floodplains: present state and future trends*. Environmental Conservation 29, 308-330.
- Walthert, L., Scherler, M., Stähli, M., Huber, M., Baltensweiler, A., Ramirez-Lopez, L. und Papritz, A. (2015). *Böden und Wasserhaushalt von Wäldern und Waldstandorten der Schweiz unter heutigen und zukünftigem Klima (BOWA-CH)*. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Zürich, Eidg. Technische Hochschule ETH.
- Ward, J.V., Tockner, K. und Schiemer, F. (1999). *Biodiversity of floodplain river ecosystems: ecotones and connectivity*. Regulated Rivers: Research & Management 15, 125-139.
- Weber, C., Döring, M., Fink, S., Martín Sanz, E., Robinson, C., Scheidegger, C., Siviglia, N., Trautwein, C., Vetsch, D. und Weitbrecht, V. (2017). *Sedimentdynamik im Gewässernetz*. In: Geschiebe- und Habitatsdynamik. Merkblatt-Sammlung Wasserbau und Ökologie. Bundesamt für Umwelt BAFU Merkblatt 1.
- Wohl, E., Bledsoe, B.P., Jacobson, R.B., Poff, N.L., Rathburn, S.L., Walters, D.M. und Wilcox, A.C. (2015). *The Natural Sediment Regime in Rivers: Broadening the Foundation for Ecosystem Management*. BioScience 65, 358-371.
- Wong, M. und Parker, G. (2006). *Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database*. Journal of Hydraulic Engineering 132, 1159-1168.
- Woolsey, S., Weber, C., Gonser, T., Hoehn, E., Hostmann, M., Junker, B., Roulier, C., Schweizer, S., Tieg, S., Tockner, K. und Peter, A. (2005). *Handbuch für die Erfolgskontrolle bei Fliessgewässerrevitalisierungen*: Eawag, WSL, LCH-EPFL, VAW-ETHZ.
- Zarn, B. (1997). *Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität*. Zürich: ETH-Zürich.

Internetseiten

- BAFU (2015b). *Wasserführung und Abflussregime der Fliessgewässer*. Bundesamt für Umwelt. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/fachinformationen/zustand-der-gewaesser/zustand-der-fliessgewaesser/wasserfuehrung-und-abflussregime-der-fliessgewaesser.html>. [letzter Zugriff am 16.02.2018].
- BAFU (2016). *Seeregulierung*. Bundesamt für Umwelt. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/dossiers/seeregulierung.html>. [letzter Zugriff am 15.02.2017].
- BAFU (2017a). *Auen*. Bundesamt für Umwelt. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/biodiversitaet/fachinformationen/massnahmen-zur-erhaltung-und-foerderung-der-biodiversitaet/oekologische-infrastruktur/biotope-von-nationaler-bedeutung/auen.html>. [letzter Zugriff am 15.02.2018].
- Pflieger, V. (2014). *Bestimmtheitsmaß R^2 - Teil 5: Wie hoch muss mein R^2 sein?* INWT Statistics GmbH. https://www.inwt-statistics.de/blog-artikel-lesen/Bestimmtheitsmass_R2-Teil5.html. [letzter Zugriff am 05.05.2018].

Gesetze, Verordnungen, Richtlinien

- Auenverordnung *Verordnung vom 28. Oktober 1992 über den Schutz der Auengebiete von nationaler Bedeutung*

Programme und Software

- ESRI (2017). *ArcGIS*, Redlands, Kalifornien, USA. <https://www.esri.ch/de/produkte>, Version 10.5.
- McGarigal, K., Cushman, S. und Ene, E. (2012). *FRAGSTATS*, University of Massachusetts, Amherst. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>, Version v4.
- R Core Team (2017). *R*, Wien. <https://www.R-project.org>, Version 3.4.3.
- TheMathWorks (2017). *MATLAB*, Boston, USA. <https://ch.mathworks.com/products/matlab.html>, Version 9.3. (R2017b).

Geodaten

- BAFU (2000). *Kantonale und private Messstationen (HADES 5.1.2)*
- BAFU (2007). *Bundesinventar der Auengebiete von nationaler Bedeutung*.
- BAFU (2013a). *Fliessgewässerabschnitte mit hoher Artenvielfalt oder national prioritären Arten*.
- BAFU (2013b). *Ökomorphologie Stufe F*.
- BAFU (2015a). *Einzugsgebietsgliederung Schweiz EZGG-CH*.
- BAFU (2017b). *Basismessnetz Oberflächengewässer*.
- WSL (2017). *Habitatzusammensetzung der Auen nationaler Bedeutung basierend auf Luftbildkartierung im Rahmen der Wirkungskontrolle Biotopschutz Schweiz WBS*.

Geschiebehaltstudien, amtliche Vermessungen und andere Berichte für die flussbauliche Berechnung

- [1] Hunziker, Zarn & Partner (2004), Geschiebehalt Kander. Projektübergreifende Gesamtbetrachtung zum Geschiebehalt und der morphologischen Entwicklung der Kander zwischen Kandersteg und der Mündung in den Thuner See.
- [2] Ristag Ingenieure AG (2015), Vermessung Kander (Thuner See - Engstlige).
- [3] Flussbau AG (2010), Geschiebehalt Töss.
- [4] Terra Vermessungen AG (2013), Vermessung Töss (Rhein - Orüti).
- [5] Flussbau AG (2014), Gewässerentwicklungskonzept Bern - GEKOB.2014. Strategische Planungen nach GSchG/GSchV. Sanierung des Geschiebehalt im Kanton Bern. Schlussbericht - Gewässersystem Sense-Saane-Aare.
- [6] Riesen & Stettler AG (2009), Vermessung Sense (Saane - Heitibüffel).
- [7] Flussbau AG (2014), Gewässerentwicklungskonzept Bern - GEKOB.2014. Strategische Planungen nach GSchG/GSchV. Sanierung des Geschiebehalt im Kanton Bern. Schlussbericht - Gewässersystem Lüttschine.
- [8] Ingenieurbüro Walter Wasem (2010), Vermessung Vereinigte Lüttschine (Brienzersee - Zweilüttschinen).
- [9] Schälchli, Abegg + Hunzinger, Geo7 AG, Schällibaum AG und Hersche Ingenieure AG (2005), Geschiebehalt Thur und Einzugsgebiet. Projekt 4: Glatt.
- [10] Ingenieurbüro Walter Wasem (2012), Vermessung Schwarze Lüttschine (Zweilüttschinen - Grindelwald).
- [11] Schälchli, Abegg + Hunzinger, Geo 7 AG, Schällibaum AG und Hersche Ingenieure AG (2005), Geschiebehalt Thur und Einzugsgebiet. Synthesebericht.
- [12] Terradata AG (2011), Vermessung Thur (Kantonsgrenze TG/SG - Altbrugg).
- [13] VAW-Bericht Nr. 4050 (1994), Geschiebehalt Thur: Bericht über den Geschiebehalt der Thur und Prognosen der zukünftigen Sohlenveränderungen zwischen Schwarzenbach (SO) und der Mündung in den Rhein., Zürich: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW). ETH-Zürich.
- [14] Flussbau AG, Sense21. Gewässerentwicklungskonzept Sense. Systembeschreibung. Fachbereich Flussmorphologie und Wasserbau, Zürich, 2017.
- [15] Jäggi, M. (2012), Hochwasserschutz Bödeli Lüttschine. Teilprojekt Hydraulik / Geschiebe.
- [16] M. Chiari und Rickenmann, D. (2009), «Modellierung des Geschiebetransportes mit dem Modell SETRAC für das Hochwasser im August 2005 in Schweizer Gebirgsflüssen,» Bd. 101, Nr. 4, pp. 319-327.
- [17] VAW-Bericht Nr. 4234 (2007), Morphologische Entwicklungen von Flussaufweitungen, Zürich: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH-Zürich.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Auentypische Vegetation (aus Thielen et al. (2002))	1
Abb. 2: Konzeptionelles Modell über mögliche Interaktionen und Einflussfaktoren zwischen Ökologie und Geschiebehauhalt welche die räumliche und zeitliche Dynamik in Flussauen ausmachen. Die Komponente Sediment und Abfluss prägen die Flussmorphologie und erzeugen eine zeitliche und räumliche Dynamik, welche die ökologische Merkmalen Vernetzung und Habitat beeinflusst. Im zentrum des Modells interagieren die natürlichen Einflussfaktoren, welche durch die menschlichen Eingriffe (rote Pfeile am Rand des Modells) beeinflusst werden können.	2
Abb. 3: Gliederung der Arbeit in drei Phasen.....	5
Abb. 4: Exkurs zum Aueninventar	6
Abb. 5: Schema zum Begriff Patch und die Indikatoren Patch Dichte PD, Flächenanteil PLAND und Diversität der Habitate SHEI. Die zwei dargestellten Landschaften setzen sich aus zwei Habitatstypen zusammen (Typ BLAU und Typ WEISS). Je nach Anordnung, Grösse, Form und Häufigkeit des Vorkommens ändern sich die Indikatoren. PD ist beeinflusst von der Anzahl Patches, PLAND von der Gesamtgrösse des Patchtypes und SHEI von beiden PD und SHEI, also von der räumlichen Anordnung der Patches und Dominanz der Patchtypen.	11
Abb. 6: Aus der Abflussberechnung für unterschiedliche Wassertiefen wird die Pegel-Abfluss-Beziehung (blaue Kurve) für das massgebende Profil ermittelt (verändert nach Bezzola (2016)).	14
Abb. 7: Näherung der tatsächlichen Schubspannungsverteilung durch eine rechtecksförmige und eine trapezförmige Verteilung bei kleinen Wassertiefen- zu Breitenverhältnissen h/b (nach Bezzola (2016)).	15
Abb. 8: Verlauf der mit der mittleren Sohlenschubspannung θ_m berechneten Geschiebefunktion $G_b(RS, b)$ und der mit der maximalen Schubspannung θ_{max} ermittelten Geschiebefunktion $G_b(h, b')$. Die verwendete Geschiebefunktion G_b (blau) setzt sich aus den jeweils grösseren Werten zusammen (verändert nach Bezzola (2016)).....	16
Abb. 9: Bestimmung der maximalen und der minimalen Transportkapazität $G_b max$ bzw. $G_b min$ anhand der Geschiebefunktion G_b und den Grenzabflüssen Q_0 und Q_D . Der Transport von feinerem Material über die stabile Deckschicht entspricht der blau punktierten Fläche (verändert nach Bezzola (2016)).....	17
Abb. 10: Dauerkurve des Abflusses Q und Dauerkurven der maximalen und minimalen Geschiebetransportkapazität (G_{bmax} bzw. G_{bmin}). Die maximale Fracht GF_{max} entspricht der grau hinterlegten Fläche, die minimale Fracht GF_{min} der blau schraffierten Fläche (verändert nach Bezzola (2016)).....	18
Abb. 11: (Links) Skalierungsfaktor SF zwischen den EZGflächen von Messstation und Aue, (Mitte) menschlicher Einfluss ME im EZG und (Rechts) Geschiebedefizitsklasse nach Hanus et al. (2014) der 15 Auen, die die dritte Bereinigung bestanden haben. Angabe zu dem jeweils angewendeten Bereinigungskriterium massgebend für die Auswahl der Auen.	21
Abb. 12: (A) Variationskoeffizient der Wasserspiegelbreite jede 10m, (B) Uferlänge pro Flusskilometer, (C) Patch Dichte PD der Vegetationstypen Kräuter, Weichholz und Hartholz, (D) Flächenanteil PLAND der Vegetationstypen Kräuter, Weichholz und Hartholz und (E) Shannon's Evenness Index SHEI in den Auen (ObjNr des Bundesinventars) nach Geschiebedefizitklasse und ObjNr angeordnet.....	23
Abb. 13: Negativer linearer Zusammenhang zwischen Geschiebedefizit und Uferlänge.....	29

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Verwendete Geodaten für Phase I und II (weitere Informationen sind im Quellenverzeichnis zu finden).....	6
Tab. 2: Vorliegenden Geschiebehaltstudien und amtlichen Vermessungen (weitere Informationen sind im Quellenverzeichnis zu finden).	6
Tab. 3: Übersicht über die betrachteten Faktoren und die angewendeten Bereinigungskriterien für die zweite Bereinigung bei der Auenauswahl (I. Phase der Arbeit).	9
Tab. 4: Beschreibung von Faktor Q (Abflussdaten) und Faktor ME (Menschlicher Einfluss) für die dritte Bereinigung der I. Phase.	10
Tab. 5: Abkürzung, Einheit, Wertebereich und ökologische Bedeutung der ausgewählten ökologischen Indikatoren basierend auf dem Datensatz Habitatzusammensetzung	13
Tab. 6: Entscheidungsdiagramm für die Verwendung der minimalen oder maximalen Geschiebefracht GF zur Bestimmung des Geschiebedefizites	18
Tab. 7: Optische Einteilung in 5 Kolmationsklasse und Zuordnung eines standardisierten Wertes (nach Woolsey et al. (2005)).....	19
Tab. 8: Anzahl der Auenobjekte, die wegen dem Bereinigungskriterium jedes berücksichtigten Faktors der zweiten Bereinigung der I. Phase übrig bleiben resp. ausgeschlossen werden.	21
Tab. 9: Anhand des Geschiebedefizitgradienten und der Grundlagenverfügbarkeit ausgewählte Auen für die flussbauliche Berechnung	25
Tab. 10: Maximale Wassertiefe, maximale Abflusskapazität und Hochwasserereignis, bei welchem eine Ausuferung an den untersuchten Auengewässern stattfindet.	25
Tab. 11: Grenzabfluss Q_0 für den Transportbeginn, Grenzabfluss Q_D für das Aufbrechen der Deckschicht sowie Häufigkeit des Aufbrechens anhand der Hochwasserstatistik der jeweiligen Messstation und Vorhandensein der Deckschicht. Der Bindestrich bedeutet keine Angabe durch die Berechnung möglich ($Q_D > \text{Abflusskapazität}$). Die Klammer beim Vorhandensein der Deckschicht bedeutet, dass die Angabe auf einer Annahme beruht (keine Begehung der Aue).	26
Tab. 12: Geschiebedefizitklasse nach Hanus et al. (2014) und berechneter Wert mit Bemerkung zur Übereinstimmung zwischen den zwei Daten.....	26
Tab. 13: Charakteristische mittlere Korndurchmesser d_m und d_{90} der Sohle und Streuung σ des Sohlenmaterials aus den Linienzahlanalysen. Die für Sense, Lutschine und Glatt angegebene Werte sind die gemittelten Korndurchmesser aus den vier Linienproben. Die gemessenen Korndurchmesser für die Kander basieren auf eine einzige Linienprobe (LP-Nr. 2). Als Vergleich sind auch die Korndurchmesser d_m und d_{90} aus den jeweiligen Grundlagendaten aufgeführt.....	27
Tab. 14: Standardisierte mittlere innere Kolmation der Gewässersohle auf Basis von 10 Einzelmessungen, Streuung der Einzelmessungen und Angabe zur höchsten Kolmationsklasse pro Aue.....	27
Tab. 15: Variationskoeffizient der Wasserspiegelbreite VC aus Luftbildern der II. Phase und aus der Feldmessung, prozentualer Unterschied zwischen den beiden VC sowie standardisierter Wert. (-). An der Sense konnte die Breite des Wasserspiegels nicht gemessen werden.	28
Tab. 16: Lineare Regression zwischen Geschiebedefizit und ausgewählten ökologischen Indikatoren. (*) Für die Auen an der Glatt, Kander und Lutschine (ObjNr 14, 72 und 80) wurden die im Feld gemessenen Wasserspiegelbreiten verwendet.	29

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

Abkürzung	Bedeutung
⇒	Verweis auf die Erläuterung eines Fachbegriffs im Glossar
Auenverordnung	Verordnung vom 28. Oktober 1992 über den Schutz der Auengebiete von nationaler Bedeutung (SR 451.31)
BAFU	Bundesamt für Umwelt. Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
Eawag	Eawag - das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs.
EZG	Einzugsgebiet
Info Species	Das Schweizerische Informationszentrum für Arten. Es besteht aus dem Zusammenschluss der Daten- und Informationszentren zu Flora, Fauna, Pilzen, Moosen und Flechten.

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	[-]	Querschnittsabhängige Konstante im logarithmischen Fließgesetz, angewendet in der Teilflächenmethode für die Bestimmung der Pegel-Abfluss-Beziehung.
A	[m ²]	Fläche, Abflussfläche in einem Querschnitt, oder Gesamtfläche der Auenlandschaft
a _{ij}	[m ₂]	Fläche des Patches j vom Patchtyp i
A _{Landwirtschaft}	[m ²]	Landwirtschaftsfläche, Fläche mit einer landwirtschaftlichen Nutzung
A _{Siedlung}	[m ²]	Siedlungsfläche, Fläche mit menschlichen Einrichtungen
b	[m]	Breite, meist Sohlenbreite des Betrachtungsabschnittes
b'	[m]	Reduzierte Breite
b _{Wsp}	[m]	Breite des Wasserspiegels
EZG	[m ²]	Einzugsgebiet
EZG _{Aue}	[m ²]	Einzugsgebiet der Aue
EZG _{MS}	[m ²]	Einzugsgebiet der Messstation
d ₉₀	[m]	Charakteristischer Korndurchmesser, wobei 90% des Gewichts der Kornverteilung feiner ist
d _m	[m]	Massgebender Korndurchmesser
d _{mD}	[m]	Massgebender Korndurchmesser der Deckschicht
G _b	[kg/s]	Geschiebetransportkapazität, meist Geschiebefunktion
G _{b max}	[kg/s]	Maximale Geschiebetransportkapazität
G _{b min}	[kg/s]	Minimale Geschiebetransportkapazität
G _{b(h,b')}	[kg/s]	Geschiebetransportkapazität im zentralen Bereich der Flusssohle
G _{b(R_s,b)}	[kg/s]	Geschiebetransportkapazität über die gesamte Flussbreite
GD	[%]	Geschiebedefizit
GF	[kg]	Geschiebefracht
GF _{aktueller Zustand}	[kg]	Geschiebefracht im aktuellen, heutigen Zustand
GF _{natürlicher Zustand}	[kg]	Geschiebefracht im natürlichen Zustand, ohne Beeinträchtigung durch Schwall-Sunk, Abflussregulierung, Geschiebemanagement und -rückhalt
GF _{GHH}	[kg]	Geschiebefracht aus vorliegenden Geschiebehaushaltsstudien
GF _{Ber}	[kg]	Im Rahmen dieser Arbeit berechnete Geschiebefracht
GF _{max}	[kg]	Maximale Geschiebefracht
GF _{min}	[kg]	Minimale Geschiebefracht
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung (9.81 m/s ²)
h	[m]	Wassertiefe
HQ _x	[m ³ /s]	Spitzenabfluss eines Hochwasserereignisses mit einer Jährlichkeit x
J	[-]	Mittlere Sohlengefälle
K _{St}	[m ^{1/3} /s]	Rauigkeitsbeiwert nach Strickler
L	[m]	Länge, meist des Betrachtungsabschnittes
L _{Fluss}	[m]	Länge des Hauptflusses
L _{Ufer}	[m/m]	Uferlänge
m	[-]	Anzahl Patchtypen in der Landschaft
ME	[-]	Menschlicher Einfluss
MS	[-]	Messstation

n_i	[-]	Anzahl Patches vom Patchtyp i
PD	[patches/ha]	Patch Dichte
p_i	[%]	Landschaftsanteil von Patchtyp i
PLAND	[%]	Flächenanteil
P_{Wasser}	[m]	Länge des Perimeters der kartierten Wasserfläche
Q	[m ³ /s]	Abfluss
Q_0	[m ³ /s]	Abfluss bei Transportbeginn, bezogen auf d_m der Unterschicht
Q_{Aue}	[m ³ /s]	Abfluss beim Betrachtungsabschnittes der Aue
Q_D	[m ³ /s]	Abfluss beim Aufreißen der Deckschicht
$Q_{D\text{max}}$	[m ³ /s]	Abfluss ab welchem Erosion des Sohlenmaterials über die gesamte Flussbreite stattfindet
$Q_{D\text{min}}$	[m ³ /s]	Abfluss ab welchem Erosion des Sohlenmaterials im zentralen Bereich der Flussohle stattfindet
Q_{MS}	[m ³ /s]	Abfluss bei der Messstation
R	[m]	Hydraulischer Radius
R_s	[m]	Hydraulischer Radius des Sohlenteilquerschnitts
s	[-]	Relative Feststoffdichte ($=\rho_s/\rho_w$)
SF	[-]	Skalierungsfaktor
SHEI	[-]	Diversität der Habitate (Shannon's Evenness Index)
θ	[-]	Dimensionslose Schubspannung
θ_c	[-]	Kritische dimensionslose Schubspannung bei Transportbeginn
θ_{cD}	[-]	Kritische dimensionslose Schubspannung beim Aufreißen der Deckschicht
θ_m	[-]	Mittlere dimensionslose Schubspannung
θ_{max}	[-]	Maximale dimensionslose Schubspannung
ρ_s	[kg/m ³]	Feststoffdichte des Sohlenmaterials
ρ_w	[kg/m ³]	Dichte des Wassers
σ	[-]	Standardabweichung, meist Mass für die Streuung einer Kornverteilung

Glossar

Das Glossar beschreibt die wichtigsten Begriffe, die in der vorliegenden Arbeit verwendet werden.

Begriff	Bedeutung
Auentypische Vegetation	Pflanzenarten, die für ihr Überleben im Wesentlichen auf Auen angewiesen sind bzw. ihren natürlichen Verbreitungsschwerpunkt in Auen haben. Sie sind nicht nur in der Lage, Trockenperioden zu überdauern, sondern ertragen auch zeitweilige Überflutungen, in deren Anschluss sie sich rasch regenerieren. Meist Pionier- und Ruderalpflanzen (www.eawag.ch und www.rivermanagement.ch).
Biodiversität	Biodiversität bedeutet biologische Vielfalt und beschreibt die Anzahl, Verschiedenheit und Variabilität der lebenden Organismen. Sie umfasst drei Ebenen: die Vielfalt zwischen den Arten (Artenvielfalt), die Vielfalt innerhalb der Arten (genetische Vielfalt) sowie die Vielfalt zwischen Ökosystemen (www.bafu.admin.ch).
Biozönose	Gemeinschaft der in einem Biotop regelmässig vorkommenden Arten von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen, deren Vertreter untereinander und mit den angehörigen anderer Arten in Wechselbeziehung stehen (www.specturm.de).
Dynamik, dynamisch	Unter Dynamik werden die stetigen Schwankungen des Wasser- und Geschiebeflusses verstanden, welche die Lebensräume von Flusslandschaften verändern. Dynamische Vorgänge sind beispielsweise das Entstehen und Verschwinden neuer Gerinne oder Kiesbänke. Die zeitliche und räumliche Dynamik ist für viele flussbegleitende Arten lebensnotwendig (www.bafu.admin.ch).
Einzugsgebiet	Der Bezugsraum für die Hydrologie und die Wasserwirtschaft (www.bafu.admin.ch).
Furt-Kolk Sequenz	Kolke sind lokale Tiefenerosionen in der Flusssohle, Furten lokalen Erhöhungen. Furten bilden sich aus dem groben Korn eines oberstrom gelegenen Kolkes (www.rivermanagement.ch).
Geschiebe	Geschiebe bezeichnet mineralische Feststoffe (von Sand und Kies bis Blöcke), die von einem Einzugsgebiet abgetragen und vom Fliessgewässer abwärts transportiert werden. Durch die gegenseitige Reibung werden die Gesteinskörner abgerundet und mit zunehmender Transportdistanz kleiner (Bezzola, 2016).
Geschiebetransport	Der von der Strömung angetriebene Geschiebetransport findet gleitend, rollend oder springend auf der Gewässersohle statt. Im Wasserbau wird der Geschiebetransport durch die Masse des Geschiebes definiert, das pro Zeiteinheit durch den gesamten Gewässerquerschnitt transportiert wird (Bezzola, 2016).
Hartholz	Holz mit relativ hohem Härtegrad; zum Beispiel: Eichen-, Buchen-, Linden-, Hagebuchen-, Eschenholz (Gallandat et al., 1993). Hartholzauenwald sind auf die montane und kolline Stufe beschränkt und werden nur von Hochwassern mit hohen Wiederkehrzeiten überschwemmt, nicht jedoch von saisonalen und jährlichen Hochwassern (Di Giulio et al., 2017).
Indikator	Ein Indikator bezeichnet allgemein einen Hinweis auf einen bestimmten Sachverhalt oder ein bestimmtes Ereignis. Da biologische Sachverhalte schwer zu fassen sind, werden in der Ökologie Indikatoren als messbare Ersatzgrössen verwendet, um den Zustand oder die Prozesse eines Ökosystems zu beschreiben. Im Handbuch für die Erfolgskontrolle bei Fliessgewässerrevitalisierungen sind 50 Indikatoren beschrieben (www.rivermanagement.ch).
Laufkraftwerk	Wasserkraftanlage ohne eigenen Speicher, welche auf die laufende Verarbeitung des jeweiligen Zuflusses angewiesen ist (www.bafu.admin.ch).
Ökomorphologie	Mit der Methode Ökomorphologie Stufe F wird die Natürlichkeit der Ökomorphologie einer Fliessgewässerstrecke klassifiziert. Dabei werden die eigentliche Gewässermorphologie, bauliche Massnahmen im und am Gewässer sowie Gegebenheiten im unmittelbar angrenzenden Umland bei Begehungen erhoben und anhand eines Punktesystem hinsicht ökologische Lebensraumfunktion bewertet (Hütte und Niederhauser, 1998).
Ökosystem	Ganzheitliches Wirkungsgefüge von Lebewesen und deren belebten Umwelt (Gallandat et al., 1993)
Patch	Diskrete, homogene Landschaftseinheit, abgegrenzt durch Diskontinuität (McGarigal et al., 2012).
Revitalisierung	Wiederherstellung naturnaher Strukturen bei verbauten Gewässern: Minimales Ziel von Revitalisierungsmassnahmen ist die Erreichung der Zustandsklasse «wenig beeinträchtigt» nach

	Ökomorphologie Stufe F. Verbesserung der aquatischen Vernetzung: Minimales Ziel ist die Sanierung der künstlichen Abstürze von mehr als 50 cm Höhe (www.bafu.admin.ch und www.rivermanagement.ch).
Restwassermenge	Abflussmenge eines Fließgewässers, die nach einer oder mehreren Entnahmen von Wasser verbleibt (Art. 4 Bst. k GSchG).
Restwasserstrecke	Fließgewässerstrecke, welche durch eine oder mehrere Wasserentnahmen wesentlich beeinflusst wird. Bei Laufkraftwerken mit Wasserentnahme entspricht die Restwasserstrecke der Strecke zwischen der Wasserfassung und der Rückgabe. Bei Speicher- oder Pumpspeicherkraftwerken ist die Restwasserstrecke nach oben durch den Speichersee bzw. durch die Wasserfassungen begrenzt und erstreckt sich unterhalb soweit das Fließgewässer wesentlich beeinflusst wird ((Bruder et al., 2012) www.bafu.admin.ch).
Speicherkraftwerk	Wasserkraftanlage, die nur einen Teil des gefassten Wassers unverzüglich nutzt. Den anderen Teil speichert sie und verarbeitet ihn einige Stunden, Wochen oder Monate später (Bruder et al. (2012) und www.bafu.admin.ch).
Schwall-Sunk	Mit diesem Begriff wird die schwallartige Abflussschwankung in Gewässer flussabwärts von Speicherkraftwerken gekennzeichnet. Der erhöhte Abfluss während des Turbinenbetriebes wird als Schwall bezeichnet, während Sunk steht für die tiefe, oft unter dem natürlichen Niederwasser liegende, Wasserführung während der übrigen Zeiten, indem das Wasser zurückgestaut wird (Bruder et al. (2012), www.bafu.admin.ch und www.rivermanagement.ch).
Sukzession	Zeitliche Entwicklung der Vegetation gemäss einer vorgegebenen Abfolge, bei der sich die nachfolgenden Stadien aus den vorhergehenden bilden; in der Aue wird zum Beispiel der Weidenwaid durch den Erlenwald ersetzt, dieser dann durch den Eschenwald (Gallandat et al., 1993)
Vernetzung	Die Vernetzung beschreibt die Austauschprozesse und Interaktionen innerhalb aquatischer Lebensräume sowie zwischen aquatischen und terrestrischen Lebensräumen. Drei Ebenen werden unterschieden: 1) Longitudinale Vernetzung beschreibt die Durchgängigkeit innerhalb des Gerinnes für Organismen in Fließrichtung und -gegenrichtung, inklusive Austausch mit Seitenbächen. 2) Laterale Vernetzung beschreibt den Austausch zwischen Gerinne, Uferbereich, Auen und der weiteren Umgebung. 3) Vertikale Vernetzung beschreibt den Austausch zwischen Fließgewässer und Grundwasser durch die Gewässersohle (www.rivermanagement.ch) .
Weichholz	Holz mit relativ schwachem Härtegrad; zum Beispiel: Pappel-, Erlen-, Weidenholz (Gallandat et al., 1993)

Verzeichnis der Anhänge

Anhang A	I. Phase – Auenauswahl	51
Anhang A-1.	Resultate der ersten Bereinigung	51
Anhang A-2.	Resultate der zweiten Bereinigung.....	52
Anhang A-3.	Zwischenresultaten der zweiten Bereinigung.....	55
Anhang A-4.	Räumliche Verteilung der Auengebiete und Bereinigungseffekt der Kriterien.....	58
Anhang A-5.	Resultate der dritten Bereinigung	59
Anhang B	II. Phase – Ökologische Untersuchung	61
Anhang C	III. Phase – Flussbauliche Untersuchung	62
Anhang C-1.	Grundlagen und flussbauliche Informationen	62
Anhang C-2.	Hochwasserstatistik und Dauerkurve	63
Anhang C-3.	Konstanten, Querprofile, Rauigkeitsbeiwerte, Gefälle, Ausuferungsgrenze und Korndurchmesser	64
Anhang C-4.	Pegel-Abfluss-Beziehung	65
Anhang C-5.	Schubspannungen und Grenzabfüsse.....	66
Anhang C-6.	Geschiebetransportkapazität.....	67
Anhang C-7.	Standorte der Feldmessungen.....	68
Anhang C-8.	Kornverteilungen	74
Anhang C-9.	Resultate der Feldmessung der inneren Kolmation.....	75
Anhang C-10.	Resultate der Feldmessung der Wasserspiegelbreite.....	76
Anhang D	Eigenständigkeitserklärung	77

Anhänge

Anhang A I. Phase – Auenauswahl

Anhang A-1. Resultate der ersten Bereinigung

Tab. 17: Trotz Aufnahme im Bundesinventar als Flussauen sind diese Objekte heutzutage eher Seeauen (Hanus et al., 2014).

ObjNr	Name	Gewässer	Kanton	Höhe [m ü. M.]	Typologie	natürlicher Stil	aktueller Zustand	Geschiebedefizit	Restwasser	Schwall-Sunk
36	Auenreste Klingnauer Stausee	Aare	AG	320	Stausee-Ufer	verzweigt	Seeufer	nicht relevant	nicht relevant	möglicherweise betroffen aber nicht nachweisbar
53	Niederried–Oltigen- matt	Aare, Saane	BE	460	Stausee-Ufer	verzweigt	Stauseeufer	Mobilisierung von Ge- schiebe beeinträchtigt	nicht relevant	möglicherweise betroffen
91	Rottenschwiler Moos	Reuss	AG	380	Stausee-Ufer	verzweigt	Seeufer	51-80%	nicht relevant	nicht betroffen

Anhang A-2. Resultate der zweiten Bereinigung

Flussauenwerte für die fünf ausgewählten Beeinflussungsfaktoren

Folgende Flussauen bestehen die zweite Bereinigung der I. Phase:

Tab. 18: Nach ObjNr des Bundesinventars aufgelistete Flussauen, die alle Bereinigungskriterien für die berücksichtigten Faktoren (Schwall-Sunk, Restwasser, Ökomorphologie, Höhe und ausgewählte Artenvielfalt DIV) bestanden haben (m. b. aber nicht n. = möglicherweise betroffen aber nicht nachweisbar).

ObjNr	Name	Gewässer	Kanton	Geschiebe- defizit	Schwall-Sunk	Restwasser	Ökomorphologie	Höhe [m ü. M.]	DIV
3	Koblener Rhein und Laufen	Rhein	AG	81-100%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	318	2
5	Eggrank–Thurspitz	Rhein, Thur	SH/ZH	0-20%	m. b. aber nicht n.	81-100%	stark beeinträchtigt	347	4
6	Schäffäuli	Thur	TG	0-20%	m. b. aber nicht n.	81-100%	stark beeinträchtigt	380	4
7	Wuer	Thur	TG	0-20%	m. b. aber nicht n.	81-100%	stark beeinträchtigt	380	1
8	Hau–Äuli	Murg, Thur	TG	0-20%	m. b. aber nicht n.	81-100%	stark beeinträchtigt	390	1
12	Ghöggerhütte	Thur	SG/TG	0-20%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	480	1
14	Glatt nordwestlich Flawil	Glatt	SG	51-80%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	530	2
16	Gillhof–Glattburg	Thur	SG	0-20%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	500	4
18	Thurauen Wil-Weieren	Thur	SG	0-20%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	520	1
19	Thur und Necker bei Lütis- burg	Necker, Thur	SG	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	560	4
44	Oberburger Schachen	Emme	BE	21-50%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	560	4
45	Emmenschachen	Aare, Emme	SO	21-50%	nicht betroffen	61-80%	wenig beeinträchtigt	430	2
48	Alte Aare: Lyss–Dotzigen	Alte Aare	BE	51-80%	nicht betroffen	81-100%	wenig beeinträchtigt	430	2
49	Alte Aare: Aarberg–Lyss	Alte Aare	BE	51-80%	nicht betroffen	81-100%	wenig beeinträchtigt	440	1
50	Sagnes de la Burtignière	L'Orbe	VD	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	1040	2
51	Reussinsel Risi	Reuss	AG	81-100%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	350	1
55	Senseauen	Sense	BE/FR	0-20%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	810	4
58	Teuffengraben–Sackau	Schwarzwasser	BE	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	750	4
60	Bois du Dévin	La Gérine	FR	21-50%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	573	3
69	Belper Giessen	Aare	BE	21-50%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	520	3
78	Engstlige: Bim Stei–Oybedly	Engstlige	BE	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	900	2
80	Chappelstutz	Lütschine	BE	21-50%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	640	3
87	Rüssalden	Reuss	AG	81-100%	m. b. aber nicht n.	81-100%	natürlich	345	1
88	Tote Reuss–Alte Reuss	Reuss	AG	81-100%	m. b. aber nicht n.	81-100%	natürlich	360	1
92	Still Rüss–Rickenbach	Reuss	AG/ZH	51-80%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	380	3
95	Ober Schachen–Rüssspitz	Reuss	AG/ZG/ZH	51-80%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	390	1
97	Frauental	Lorze	ZG	51-80%	m. b. aber nicht n.	81-100%	natürlich	394	1
98	Ämmenmatt	Kleine Emme	LU	0-20%	nicht betroffen	81-100%	wenig beeinträchtigt	650	3
110	Biber im Ägeriried	Biber	SZ/ZG	0-20%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	900	2
112	Vallon de la Laire	La Laire	GE	21-50%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	350	2
113	Vallon de l'Allondon	L'Allondon	GE	21-50%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	380	3
120	Les Iles de Bussigny	La Venoge	VD	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	394	1
121	La Roujarde	La Venoge	VD	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	420	1
217	La Neirigue et la Glâne	La Neirigue, La Glâne	FR	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	660	1
221	Aare bei Altreu	Aare	BE/SO	51-80%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	428	1
229	Madonna del Piano	Tresa	TI	0-20%	nicht betroffen	81-100%	wenig beeinträchtigt	265	4
337	Möriken–Wildeggen	Bünz	AG	21-50%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	380	3
338	Unterer Schiltwald	Rotbach	LU	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	420	3
339	Badhus–Graben	Grosse Fontannen	LU	0-20%	nicht betroffen	81-100%	wenig beeinträchtigt	640	3
340	Entlental	Entlen	LU	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	840	3
341	Flühli	Hohwäldlibach, Rot- bach, Waldemme	LU	21-50%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	940	3
342	Bibermüli	Biber	SH	0-20%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	400	2
343	Freienstein–Tösseggen	Töss	ZH	21-50%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	340	3
344	Dättlikon–Freienstein	Töss	ZH	21-50%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	370	1
345	Oberglatt	Glatt	ZH	21-50%	nicht betroffen	81-100%	wenig beeinträchtigt	420	1
364	Sonogno–Brione	Verzasca	TI	21-50%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	830	3
366	Veizio–Aranno	Magliasina	TI	0-20%	nicht betroffen	81-100%	wenig beeinträchtigt	610	3

Folgende Flussauen bestehen nicht die zweite Bereinigung der I. Phase:

Tab. 19: Nach ObjNr des Bundesinventars aufgelistete Flussauen, die ein oder mehrere Bereinigungskriterien für die berücksichtigten Faktoren (Schwall-Sunk, Restwasser, Ökomorphologie, Höhe und ausgewählte Artenvielfalt DIV) bestanden haben (grau markiert = nicht bestanden; m. b. = möglicherweise betroffen; m. b. aber nicht n. = möglicherweise betroffen aber nicht nachweisbar; n. r. = nicht repräsentativ)

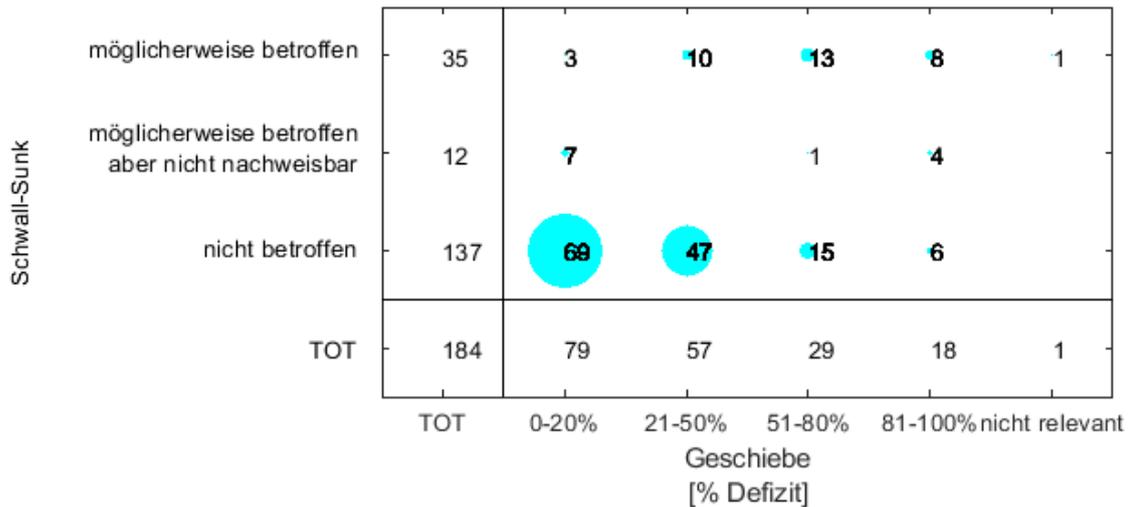
ObjNr	Name	Gewässer	Kanton	Geschiebe- defizit	Schwall-Sunk	Restwasser	Ökomorphologie	Höhe [m ü. M.]	DIV
2	Haumättli	Rhein	AG	81-100%	m. b. aber nicht n.	81-100%	stark beeinträchtigt	282	0
4	Seldenhalde	Wutach	SH	0-20%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	470	0
9	Wyden bei Pfyn	Thur	TG	0-20%	m. b. aber nicht n.	0-20%	stark beeinträchtigt	400	1
11	Unteres Ghögg	Thur	TG	0-20%	nicht betroffen	41-60%	stark beeinträchtigt	465	1
27	Rhäzünser Rheinauen	Hinterrhein	GR	51-80%	m. b.	81-100%	stark beeinträchtigt	600	0
28	Cumparduns	Albula, Hinterrhein	GR	81-100%	m. b.	0-20%	wenig beeinträchtigt	670	0
29	Cauma	Vorderrhein	GR	0-20%	m. b.	81-100%	n. r.	690	0
30	Plaun da Foppas	Vorderrhein	GR	21-50%	nicht betroffen	21-40%	stark beeinträchtigt	710	0
31	Cahuons	Vorderrhein	GR	21-50%	nicht betroffen	0-20%	stark beeinträchtigt	880	1
32	Disla–Pardomat	Vorderrhein	GR	21-50%	nicht betroffen	0-20%	stark beeinträchtigt	980	0
33	Fontanivas–Sonduritg	Vorderrhein	GR	21-50%	nicht betroffen	0-20%	stark beeinträchtigt	1040	1
34	Gravas	Vorderrhein	GR	21-50%	nicht betroffen	0-20%	stark beeinträchtigt	1250	0
35	Ogna da Pardiala	Vorderrhein	GR	21-50%	nicht betroffen	21-40%	stark beeinträchtigt	750	1
37	Wasserschloss Brugg–Stilli	Aare, Reuss	AG	81-100%	nicht betroffen	41-60%	natürlich	330	4
40	Umiker Schachen–Stieren- hölzli	Aare	AG	81-100%	nicht betroffen	0-20%	natürlich	340	4
46	Utzenstorfer Schachen	Emme	BE	21-50%	nicht betroffen	41-60%	wenig beeinträchtigt	480	1
47	Altwässer der Aare und der Zihl	Aare	BE	21-50%	nicht betroffen	81-100%	naturfremd	430	2
52	Les Iles de Villeneuve	La Broye	FR/VD	81-100%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	475	0
59	Laupenau	Saane	BE	51-80%	m. b.	81-100%	stark beeinträchtigt	480	0
61	Ärgera: Plasselb–Marly	Ärgera / La Gérine	FR	0-20%	nicht betroffen	81-100%	n. r.	750	2
62	La Sarine: Rossens–Fribourg	La Sarine	FR	81-100%	m. b.	0-20%	stark beeinträchtigt	560	4
65	Les Auges d'Estavannens	La Sarine	FR	81-100%	m. b.	81-100%	stark beeinträchtigt	700	2
66	Les Auges de Neirivue	La Sarine	FR	81-100%	m. b.	81-100%	stark beeinträchtigt	750	3
68	La Sarine près Château- d'Oex	La Sarine	VD	0-20%	m. b.	81-100%	stark beeinträchtigt	910	0
71	Augand	Kander, Simme	BE	51-80%	nicht betroffen	41-60%	stark beeinträchtigt	580	2
72	Heustrich	Kander	BE	81-100%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	675	0
74	Gastereholz	Kander	BE	0-20%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	1370	2
75	Brünnlisau	Simme	BE	21-50%	nicht betroffen	0-20%	natürlich	640	0
76	Wilerau	Simme	BE	21-50%	nicht betroffen	0-20%	stark beeinträchtigt	690	1
77	Niedermettlisau	Simme	BE	21-50%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	710	0
81	In Erlen	Schwarze Lutschine	BE	51-80%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	960	0
83	Jägglisglunte	Aare	BE	nicht rele- vant	m. b.	81-100%	natürlich	567	0
84	Sytenwald	Aare	BE	21-50%	m. b.	81-100%	wenig beeinträchtigt	580	0
86	Sandey	Urbachwasser	BE	0-20%	nicht betroffen	21-40%	natürlich	800	0
99	Schlierenrüti	Grosse Schliere	OW	21-50%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	445	0
101	Laui	Gross Laui	OW	21-50%	nicht betroffen	81-100%	naturfremd	520	0
102	Steinibach	Gerisbach, Sarnersee, Steinibach	OW	21-50%	nicht betroffen	81-100%	wenig beeinträchtigt	500	0
104	Tristel	Muota	SZ	21-50%	m. b.	81-100%	natürlich	595	0
107	Stössi	Chärstelenbach	UR	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	1160	0
108	Widen bei Realp	Furkareuss	UR	0-20%	nicht betroffen	61-80%	natürlich	1510	0
114	Moulin de Vert	Le Rhône	GE	81-100%	m. b.	81-100%	n. r.	350	0
115	Les Gravines	La Versoix	GE	0-20%	nicht betroffen	0-20%	stark beeinträchtigt	390	1
118	Grand Bataillard	La Versoix	VD	0-20%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	460	0
119	Embouchure de l'Aubonne	L'Aubonne	VD	21-50%	m. b.	81-100%	wenig beeinträchtigt	375	1
122	Bois de Vaux	La Venoge	VD	51-80%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	440	0
124	Iles des Clous	Le Rhône, Grand Canal	VD	21-50%	m. b.	81-100%	stark beeinträchtigt	380	0
125	Source du Trient	Le Trient	VS	0-20%	nicht betroffen	81-100%	wenig beeinträchtigt	1700	0
127	Lotrey	La Borgne	VS	21-50%	nicht betroffen	21-40%	naturfremd	1350	0
128	Pramousse–Satarma	La Borgne d'Arolla	VS	0-20%	nicht betroffen	21-40%	n. r.	1820	0
129	La Borgne en amont d'Arolla	La Borgne d'Arolla	VS	0-20%	nicht betroffen	0-20%	natürlich	2020	0
130	Salay	La Borgne de Ferpècle	VS	0-20%	nicht betroffen	0-20%	n. r.	1750	0
131	Ferpècle	La Borgne de Ferpècle	VS	0-20%	nicht betroffen	0-20%	natürlich	1960	0
132	Derborence	La Lizerne, Lac de Der- borence	VS	0-20%	nicht betroffen	81-100%	n. r.	1470	0
133	Pfynwald	Rhone	VS	51-80%	m. b.	21-40%	n. r.	580	0
134	Tännmattu	Lonza	VS	0-20%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	1412	1
135	Chiemadmatte	Lonza	VS	0-20%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	1620	0
138	Grund	Ganterbach, Nessel- bach, Saltina, Taferna	VS	0-20%	m. b.	0-20%	wenig beeinträchtigt	1050	0
139	Bilderne	Rotten	VS	51-80%	m. b.	81-100%	stark beeinträchtigt	730	0
140	Zeiterbode	Rotten	VS	21-50%	nicht betroffen	21-40%	stark beeinträchtigt	1270	0
141	Matte	Rotten	VS	21-50%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	1300	0
142	Sand	Goneri, Lengesbach, Rotten	VS	21-50%	nicht betroffen	81-100%	n. r.	1380	0
144	La Réchesse	Le Doubs	JU	21-50%	m. b.	81-100%	wenig beeinträchtigt	460	0
145	La Lomenne	Le Doubs	JU	21-50%	m. b.	81-100%	wenig beeinträchtigt	440	3
146	Bosco dei Valloni	Ticino	TI	21-50%	nicht betroffen	41-60%	natürlich	1355	0
147	Soria	Ticino	TI	0-20%	nicht betroffen	41-60%	natürlich	1290	0
148	Geröra	Ticino	TI	21-50%	nicht betroffen	61-80%	natürlich	1235	2

149	Albinasca	Ticino	TI	0-20%	nicht betroffen	61-80%	natürlich	1180	0
150	Bolla di Loderio	Brenno	TI	21-50%	nicht betroffen	21-40%	stark beeinträchtigt	355	4
151	Brenno di Blenio	Brenno	TI	21-50%	nicht betroffen	0-20%	stark beeinträchtigt	590	1
155	Campall	Brenno del Lucomagno	TI	0-20%	nicht betroffen	0-20%	n. r.	1420	2
156	Bassa	Moesa	TI	51-80%	m. b.	81-100%	natürlich	250	0
157	Isola	Moesa	GR/TI	51-80%	m. b.	81-100%	wenig beeinträchtigt	260	0
158	Ai Fornas	Moesa	GR	21-50%	m. b.	81-100%	natürlich	270	0
160	Pascoletto	Moesa	GR	81-100%	m. b.	81-100%	natürlich	320	2
161	Rosera	Moesa	GR	81-100%	m. b.	81-100%	natürlich	410	2
162	Pomareda	Moesa	GR	21-50%	m. b.	21-40%	natürlich	485	0
164	Canton	Moesa	GR	21-50%	nicht betroffen	21-40%	natürlich	590	0
166	Pian di Alne	Calancasca	GR	21-50%	nicht betroffen	41-60%	stark beeinträchtigt	985	0
167	Boschetti	Ticino	TI	51-80%	m. b.	81-100%	natürlich	215	0
168	Ciossa Antognini	Ticino	TI	51-80%	m. b.	81-100%	naturfremd	200	1
170	Saleggio	Maggia	TI	51-80%	nicht betroffen	21-40%	natürlich	300	0
171	Maggia	Maggia	TI	51-80%	nicht betroffen	21-40%	natürlich	360	3
172	Sompredi-Lovalt	Maggia	TI	51-80%	nicht betroffen	0-20%	natürlich	690	0
174	Strada	Inn	GR	0-20%	nicht betroffen	21-40%	wenig beeinträchtigt	1070	0
176	Plan-Sot	Inn	GR	0-20%	nicht betroffen	21-40%	wenig beeinträchtigt	1070	0
177	Panas-ch-Resgia	Inn	GR	51-80%	nicht betroffen	21-40%	wenig beeinträchtigt	1088	0
181	Lischana-Suronnas	Inn	GR	21-50%	nicht betroffen	21-40%	wenig beeinträchtigt	1150	0
185	Sotruinas	Inn	GR	21-50%	nicht betroffen	21-40%	wenig beeinträchtigt	1420	0
187	Blaisch dal Piz dal Ras	Susasca	GR	51-80%	nicht betroffen	81-100%	wenig beeinträchtigt	1780	1
188	San Batrumieu	Inn	GR	0-20%	m. b. aber nicht n.	81-100%	wenig beeinträchtigt	1670	0
190	Isla Glischa-Arvins-Seglias	Inn, Chamuera	GR	0-20%	m. b. aber nicht n.	81-100%	n. r.	1690	0
194	Flaz	Flaz, Inn	GR	51-80%	m. b.	81-100%	wenig beeinträchtigt	1710	0
195	Il Rom Valchava-Graveras (Müstair)	Il Rom	GR	21-50%	nicht betroffen	61-80%	stark beeinträchtigt	1320	1
211	Les Monod	Le Veyron	VD	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	660	0
216	Chrauchbach: Haris	Chrauchbach	GL	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	1200	0
218	Vers Vaux	Le Rhône	GE	81-100%	m. b.	81-100%	stark beeinträchtigt	338	0
220	Rossgarten	Rhein	AG	81-100%	m. b. aber nicht n.	0-20%	stark beeinträchtigt	305	2
224	Rohr-Oey	Louibach	BE	21-50%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	1250	0
226	La Torneresse à l'Etivaz	La Torneresse	VD	0-20%	nicht betroffen	41-60%	natürlich	1100	3
227	Sonlèrt-Sabbione	Bavona	TI	51-80%	nicht betroffen	21-40%	wenig beeinträchtigt	730	0
301	Les Iles de Bogis	La Versoix	VD	0-20%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	300	0
303	Solalex	L'Avançon d'Anzeindaz	VD	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	1480	0
313	Muscherensense	Muscherensense	FR	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	1100	0
314	Kalte Sense	Kalte Sense	BE/FR	0-20%	nicht betroffen	81-100%	naturfremd	1000	1
315	Rotenbach	Kalte Sense	BE	21-50%	nicht betroffen	81-100%	naturfremd	1100	0
319	Emmeschlucht	Emme	BE	21-50%	nicht betroffen	81-100%	wenig beeinträchtigt	800	0
321	Harzisboden	Emme	BE	21-50%	nicht betroffen	81-100%	wenig beeinträchtigt	1120	0
322	Rezliberg	Trüebach	BE	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	1450	0
323	Hornbrügg	Allebach, Rossbach	BE	0-20%	nicht betroffen	81-100%	n. r.	1460	0
324	Lochweid	Tschentbach	BE	0-20%	nicht betroffen	81-100%	wenig beeinträchtigt	1220	0
325	Gastere bei Selden	Kander	BE	0-20%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	1540	0
326	Tschingel	Gamchibach, Gornere- wasser, Tschingelsee	BE	0-20%	nicht betroffen	81-100%	n. r.	1150	0
327	Ganzenlouwina	Rychenbach	BE	0-20%	nicht betroffen	81-100%	n. r.	1600	0
349	Grosstal	Isitaler Bach	UR	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	1270	0
351	Unterschächen-Spiringen	Schächen	UR	21-50%	nicht betroffen	21-40%	stark beeinträchtigt	950	0
352	Alpenrösl-Herrenrüti	Engelberger Aa	OW/UR	0-20%	nicht betroffen	81-100%	stark beeinträchtigt	1200	0
353	Altboden	Gorenzmettlenbach	UR	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	1660	0
354	Gorneren	Gornerbach	UR	0-20%	nicht betroffen	81-100%	wenig beeinträchtigt	1600	0
355	Stäuberboden	Chärstelenbach	UR	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	1280	0
356	Unteralp	Unteralpreuss	UR	21-50%	m. b.	41-60%	natürlich	1580	0
357	Ghirone	Brenno della Greina	TI	21-50%	nicht betroffen	21-40%	stark beeinträchtigt	1280	0
358	Chiggigogna-Lavorgo	Ticino	TI	51-80%	m. b.	0-20%	natürlich	630	0
359	Biaschina-Giornico	Ticino	TI	51-80%	m. b.	0-20%	natürlich	430	2
360	Fontane	Orino	TI	0-20%	nicht betroffen	81-100%	n. r.	1330	0
361	Madra	Orino	TI	0-20%	nicht betroffen	81-100%	wenig beeinträchtigt	1030	0
362	Calnegia	Fiume Calnegia	TI	0-20%	nicht betroffen	81-100%	n. r.	1050	0
363	Mött di Tirman	Rio Colobiasca	TI	0-20%	nicht betroffen	81-100%	n. r.	1380	0
365	Ruscada	Boggera	TI	0-20%	nicht betroffen	81-100%	naturfremd	1120	0
369	Goldachtobel	Goldach	SG	0-20%	nicht betroffen	41-60%	natürlich	490	2
371	Ampferenboden	Necker	AR/SG	0-20%	nicht betroffen	81-100%	natürlich	1030	0
373	Schilstal / Sand	Fanbach, Furschbach, Schils	SG	0-20%	nicht betroffen	81-100%	n. r.	1130	0
374	Rheinau / Cholau	Mülbach, Rhein	SG	21-50%	m. b.	81-100%	n. r.	460	1
376	Sarelli-Rosenbergli	Rhein	SG	51-80%	m. b.	81-100%	n. r.	510	0
380	Alp Val Tenigia	Rein da Sumvitg	GR	0-20%	nicht betroffen	81-100%	n. r.	1320	0
394	Ova da Roseg	Ova da Roseg	GR	21-50%	nicht betroffen	0-20%	wenig beeinträchtigt	1800	0
396	Ova dal Fuorn	Ova dal Fuorn	GR	0-20%	nicht betroffen	81-100%	n. r.	1740	0
399	Clairbief	Le Doubs	JU	51-80%	m. b.	81-100%	wenig beeinträchtigt	466	0

Anhang A-3. Zwischenresultaten der zweiten Bereinigung

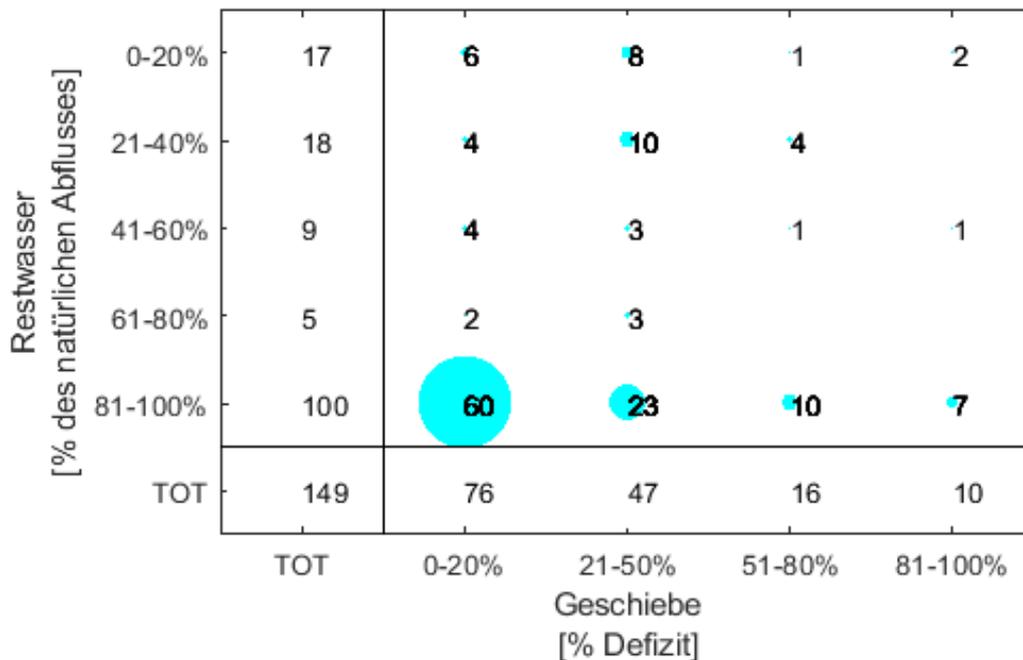
Folgende Grafiken beschreiben die Auensysteme bezüglich den ausgewählten Kriterien in Abhängigkeit zu ihrer Geschieberegimeklasse (Geschiebedefizit auf die x-Achse).

1) Schwall-Sunk



Bereinigung: Nicht betroffen, möglicherweise betroffen aber nicht nachweisbar
 → 149 Auen

2) Abfluss



Bereinigung: Restwasser > 60% des natürlichen Abflusses
 → 105 Auen

3) Ökomorphologie

dominante Ökomorphologie [falls >50% des Gewässernetzes in der Aue bewertet ist]	eingedolt	0				
	naturfremd	5	2	3		
	stark beeinträchtigt	29	17	8	1	3
	wenig beeinträchtigt	18	10	5	3	
	natürlich	40	21	9	6	4
	nicht repräsentativ	13	12	1		
	TOT	105	62	26	10	7
	TOT	0-20%	21-50%	51-80%	81-100%	
		Geschiebe [% Defizit]				

Bereinigung: Natürlich, wenig beeinträchtigt, stark beeinträchtigt

→ 87 Auen

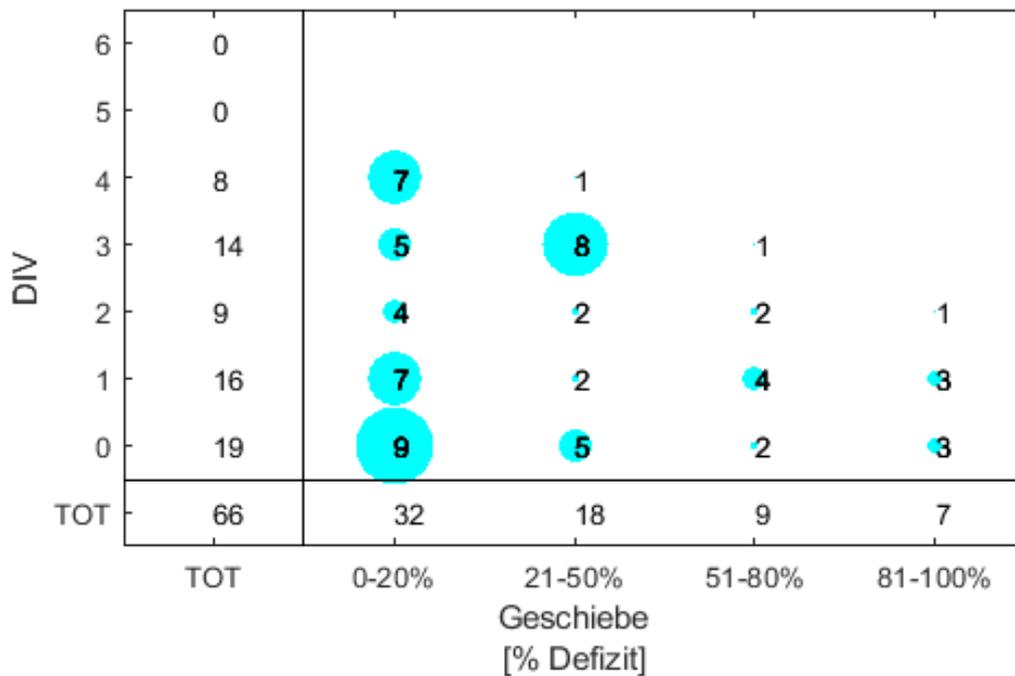
4) Höhenlage

mittlere Höhenlage [m ü.M.]	1600 - 1799	6	5		1	
	1400 - 1599	5	5			
	1200 - 1399	10	6	4		
	1000 - 1199	7	6	1		
	800 - 999	8	4	3	1	
	600 - 799	9	6	2		1
	400 - 599	22	9	7	5	1
	< 400	20	7	5	3	5
	TOT	87	48	22	10	7
	TOT	0-20%	21-50%	51-80%	81-100%	
		Geschiebe [% Defizit]				

Bereinigung: Höhenlage < 1200 m ü.M.

→ 66 Auen

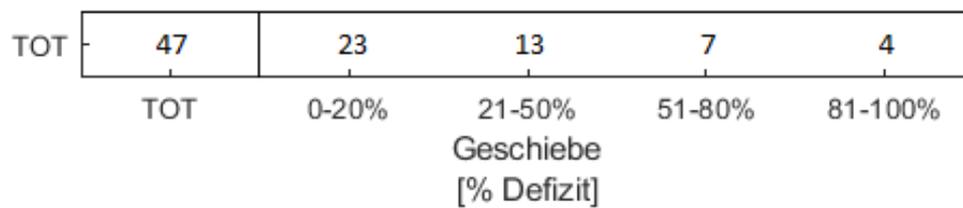
5) Artenvielfalt (Ausgewählte Artenvielfalt, kruz: DIV)



Bereinigung: DIV > 0

→ 47 Auen

Anzahl Auenobjekte pro Geschiebedefizitklasse am Ende der zweiten Bereinigung:



Anhang A-4. Räumliche Verteilung der Auengebiete und Bereinigungseffekt der Kriterien

Legende

- 149 2.Ber_1.SS_nB_nN
- 105 2.Ber_2.Abfluss_60100%
- 87 2.Ber_3.Okom_natur_wenigstarkBeein_50%
- 66 2.Ber_4.Hohe_0bis1200müM
- 47 2.Ber_5.Arten_DIVnicht0

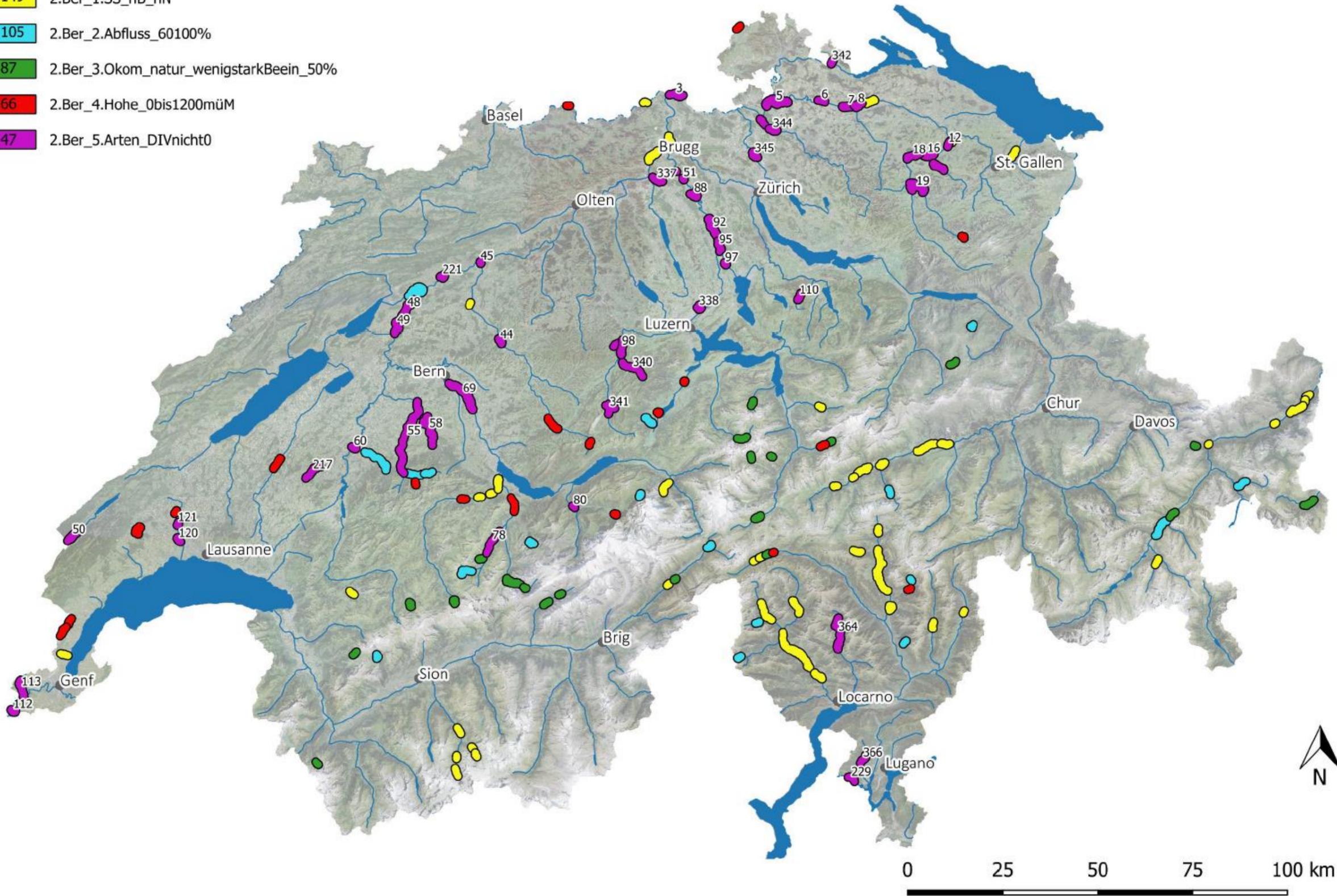


Abb. 14: Übersicht zur räumlichen Verteilung der Schweizer Flussauen und zum Bereinigungseffekt der angewendeten Kriterien auf die berücksichtigten Faktoren (1. Faktor: Schwall-Sunk, 2. Faktor: Abfluss, 3. Faktor: Ökomorphologie, 4. Faktor: Höhenlage, 5. Faktor: Ausgewählter Artenvielfalt (DIV)) mit Angabe zur Anzahl Objekte die den jeweiligen Bereinigungskriterium bestehen. Diejenigen Objekte, die alle Bereinigungskriterien bestanden, werden in der 2. Bereinigung ausgewählt (violett eingefärbt, 47 Objekte).

Anhang A-5. Resultate der dritten Bereinigung

Flussauenwerte für die qualitativ ausgewählten Bereinigungskriterien.

Folgende Flussauen bestehen die dritte Bereinigung der I. Phase:

Tab. 20: Nach ObjNr des Bundesinventars aufgelistete Flussauen, die die dritte Bereinigung bestanden haben (grau markiert = nicht bestanden; MS = Abflussmessstation).

ObjNr	Name	Gewässer	Kanton	Geschiebe- defizit	Distanz zur nächsten MS vom Auenrand [km]	MS ist flussauf- wärts (0) oder -abwärts (1)?	BAFU o- der kanto- nale MS?	Faktor Skalierungs- faktor SF	Kriterium Q bestanden?	Landwirtschafts- fläche [%]	Siedlungs- fläche [%]	Faktor Menschlicher Einfluss ME	Kriterium ME bestanden?	Beide Krite- rien Q und ME bestan- den?	Subjektive Auswahl Bemerkung
12	Ghöggerhütte	Thur	SG/TG	0-20%	1.5	0	Kanton	0.95	Ja	56	8	64	Ja	Ja	
14	Glatt nordwestlich Flawil	Glatt	SG	51-80%	1.3	1	Kanton	1.01	Ja	57	14	71	Nein	Nein	noch drin trotz ME >65%
16	Gillhof–Glattburg	Thur	SG	0-20%	3.0	1	Kanton	0.98	Ja	55	8	63	Ja	Ja	
18	Thurauen Wil-Weieren	Thur	SG	0-20%	6.3	0	BAFU	0.89	Ja	55	6	61	Ja	Ja	
19	Thur und Necker bei Lütisburg	Necker, Thur	SG	0-20%	3.0	1	BAFU	0.90	Ja	54	5	58	Ja	Ja	
44	Oberburger Schachen	Emme	BE	21-50%	12.7	0	BAFU	0.67	Ja	52	5	57	Ja	Ja	
55	Senseauen	Sense	BE/FR	0-20%	0.2	1	BAFU	1.00	Ja	54	4	59	Ja	Ja	
72	Heustrich	Kander	BE	81-100%	0.9	1	BAFU	0.99	Ja	34	2	36	Ja	Ja	wieder drin, trotz ausge- wählter Artenvielfalt DIV =0
78	Engstlige: Bim Stei–Oybedly	Engstlige	BE	0-20%	0.6	1	Kanton	0.96	Ja	45	2	48	Ja	Ja	
80	Chappelstutz	Lütschine	BE	21-50%	3.7	1	BAFU	0.91	Ja	26	2	28	Ja	Ja	
81	In Erlen	Schwarze Lütschine	BE	51-80%	11.0	1	Kanton	0.57	Ja	30	2	32	Ja	Ja	wieder drin, trotz ausge- wählter Artenvielfalt DIV =0
98	Ämmenmatt	Kleine Emme	LU	0-20%	0.3	1	BAFU	0.79	Ja	49	3	52	Ja	Ja	
121	La Roujarde	La Venoge	VD	0-20%	8.6	1	BAFU	0.79	Ja	55	7	62	Ja	Ja	
344	Dättlikon–Freienstein	Töss	ZH	21-50%	0.4	1	Kanton	1.02	Ja	42	14	56	Ja	Ja	
364	Sonogno–Brione	Verzasca	TI	21-50%	6.3	1	BAFU	0.63	Ja	10	1	11	Ja	Ja	

Folgende Flussauen bestehen nicht die dritte Bereinigung der I. Phase:

Tab. 21: Nach ObjNr des Bundesinventars aufgelistete Flussauen, die die dritte Bereinigung wegen Kriterium Q oder ME oder subjektive Auswel nicht bestanden haben (grau markiert = nicht bestanden bzw. nicht ausgewählt; k.A. = keine Angabe; MS = Abflussmessstation.)

ObjNr	Name	Gewässer	Kanton	Geschiebe- defizit	Distanz zur nächsten MS vom Auenrand [km]	MS ist flussauf- wärts (0) oder -abwärts (1)?	BAFU o- der kanto- nale MS?	Faktor Skalierungs- faktor SF	Kriterium Q bestanden?	Landwirtschafts- fläche [%]	Siedlungs- fläche [%]	Faktor Menschlicher Einfluss ME	Kriterium ME bestanden?	Beide Krite- rien Q und ME bestan- den?	Subjektive Auswahl Bemerkung
3	Koblener Rhein und Laufen	Rhein	AG	81-100%	0.3	1	BAFU	1.00	Nein	k.A.	k.A.	k.A.	Nein	Nein	aus
5	Eggrank–Thurspitz	Rhein, Thur	SH/ZH	0-20%	3.9	0	BAFU	0.12	Nein	63	13	76	Nein	Nein	aus
6	Schäffäuli	Thur	TG	0-20%	9.8	1	BAFU	0.95	Ja	59	9	68	Nein	Nein	aus
7	Wuer	Thur	TG	0-20%	15.7	1	BAFU	0.94	Ja	59	9	68	Nein	Nein	aus
8	Hau–Äuli	Murg, Thur	TG	0-20%	18.8	1	BAFU	0.81	Ja	59	9	67	Nein	Nein	aus
45	Emmenschachen	Aare, Emme	SO	21-50%	7.1	0	BAFU	0.95	Nein	54	7	60	Ja	Nein	aus
48	Alte Aare: Lyss–Dotzigen	Alte Aare	BE	51-80%	0.0	0	Kanton	k.A.	Nein	k.A.	k.A.	k.A.	Nein	Nein	aus
49	Alte Aare: Aarberg–Lyss	Alte Aare	BE	51-80%	0.0	0	Kanton	k.A.	Nein	k.A.	k.A.	k.A.	Nein	Nein	aus
50	Sagnes de la Burtignière	L'Orbe	VD	0-20%	0.0	0	BAFU	0.32	Nein	28	3	30	Ja	Nein	aus
51	Reussinsel Risi	Reuss	AG	81-100%	1.1	1	BAFU	1.00	Nein	50	9	60	Ja	Nein	aus
58	Teuffengraben–Sackau	Schwarzwasser	BE	0-20%	6.8	1	BAFU	0.37	Nein	53	5	57	Ja	Nein	aus
60	Bois du Dévin	La Gérine	FR	21-50%	9.1	1	BAFU	0.07	Nein	47	7	53	Ja	Nein	aus
69	Belper Giessen	Aare	BE	21-50%	1.5	1	BAFU	1.00	Nein	56	11	68	Nein	Nein	aus
87	Rüssalden	Reuss	AG	81-100%	1.5	0	BAFU	1.00	Nein	50	10	60	Ja	Nein	aus
88	Tote Reuss–Alte Reuss	Reuss	AG	81-100%	6.3	1	BAFU	0.99	Nein	50	10	60	Ja	Nein	aus
92	Still Rüss–Rickenbach	Reuss	AG/ZH	51-80%	5.6	0	BAFU	0.87	Nein	51	9	60	Ja	Nein	aus
95	Ober Schachen–Rüssspitz	Reuss	AG/ZG/ZH	51-80%	2.2	0	BAFU	0.91	Nein	49	8	58	Ja	Nein	aus
97	Frauental	Lorze	ZG	51-80%	0.4	1	BAFU	1.00	Nein	67	20	87	Nein	Nein	aus
110	Biber im Ägerried	Biber	SZ/ZG	0-20%	4.0	1	BAFU	0.47	Nein	55	5	60	Ja	Nein	aus
112	Vallon de la Laire	La Laire	GE	21-50%	2.2	1	BAFU	0.00	Nein	64	16	80	Nein	Nein	aus
113	Vallon de l'Allondon	L'Allondon	GE	21-50%	0.0	0	BAFU	0.82	Nein	54	6	60	Ja	Nein	aus
120	Les Iles de Bussigny	La Venoge	VD	0-20%	2.5	1	BAFU	0.99	Ja	59	8	67	Nein	Nein	aus
217	La Neirigue et la Glâne	La Neirigue, La Glâne	FR	0-20%	0.2	1	Kanton	1.00	Nein	77	7	84	Nein	Nein	aus
221	Aare bei Altreu	Aare	BE/SO	51-80%	14.9	0	BAFU	0.97	Nein	48	19	67	Nein	Nein	aus
229	Madonna del Piano	Tresa	TI	0-20%	0.9	0	BAFU	0.96	Nein	8	12	19	Ja	Nein	aus
337	Möriken–Wildeggen	Bünz	AG	21-50%	0.6	0	Kanton	0.89	Ja	57	16	73	Nein	Nein	aus
338	Unterer Schiltwald	Rotbach	LU	0-20%	2.3	0	Kanton	0.59	Ja	64	18	82	Nein	Nein	aus
339	Badhus–Graben	Grosse Fontannen	LU	0-20%	2.0	1	BAFU	0.12	Nein	38	3	41	Ja	Nein	aus
340	Entlental	Entlen	LU	0-20%	7.0	1	BAFU	0.19	Nein	44	1	45	Ja	Nein	aus
341	Flühli	Hohwäldlibach, Rotbach, Waldemme	LU	21-50%	4.7	0	Kanton	0.27	Nein	40	2	42	Ja	Nein	aus
342	Bibermüli	Biber	SH	0-20%	3.8	0	Kanton	0.84	Nein	63	12	75	Nein	Nein	aus
343	Freienstein–Tösseggen	Töss	ZH	21-50%	1.3	0	Kanton	0.90	Ja	42	14	56	Ja	Ja	aus, es gibt schon eine Aue an der Töss (344)
345	Oberglatt	Glatt	ZH	21-50%	0.8	0	Kanton	1.07	Nein	33	40	73	Nein	Nein	aus
366	Vezio–Aranno	Magliasina	TI	0-20%	5.3	1	BAFU	0.66	Ja	15	3	18	Ja	Ja	aus, EZG zu klein

Anhang B II. Phase – Ökologische Untersuchung

Ausgewählte Resultate

Tab. 22: Gerinneform und berechnete ökologische Indikatoren Uferlänge und Wasserspiegelbreite der ausgewählten Auenobjekte (ObjNr nach Aueninventar)

ObjNr	Gewässer	Geschiebe- defizit	Natürlicher Stil nach Hanus et al. (2014)	Aktueller Zustand nach Hanus et al. (2014)	Uferlänge	Variationskoeffizient der WSP-Breitenvari- abilität
		[%]			[km / Fluss-km]	[-]
12	Thur	0-20%	Mäander	Gestreckt	2.37	0.45
16	Thur	0-20%	Verzweigt	Gestreckt	2.50	0.32
18	Thur	0-20%	Verzweigt	Gestreckt	2.90	0.22
19	Necker, Thur	0-20%	Mäander	Mäander	2.59	0.46
55	Sense	0-20%	Verzweigt	Verzweigt	5.12	0.47
78	Engstlige	0-20%	Verzweigt	Verzweigt	3.48	0.36
98	Kleine Emme	0-20%	Verzweigt	Freie Mäander	2.58	0.31
121	La Venoge	0-20%	Freie Mäander	Freie Mäander	2.45	0.36
44	Emme	21-50%	Gestreckt	Gestreckt	4.59	0.37
80	Lütschine	21-50%	Freie Mäander	Freie Mäander	3.18	0.32
344	Töss	21-50%	Freie Mäander	Freie Mäander	2.59	0.35
364	Verzasca	21-50%	Verzweigt	Verzweigt	2.92	0.53
14	Glatt	51-80%	Talmäander	Talmäander	2.41	0.38
81	Schwarze Lütschine	51-80%	Verzweigt	Gestreckt	2.81	0.40
72	Kander	81-100%	Gestreckt	Gestreckt	2.51	0.59

Anhang C III. Phase – Flussbauliche Untersuchung

Anhang C-1. Grundlagen und flussbauliche Informationen

Tab. 23: Zusammenfassung der vorliegenden Grundlagen (Roter Kreuz bedeutet keine Daten gefunden).

Aue [ObjNr]	Gewässer	Geschiebehaltstudie?	Amtliche Vermessung?	KM Auen	QP geeignet	d ₅₀ [cm]	d ₉₀ [cm]	d _m [cm]	Kornverteilung?	Talgefälle [-]	Q ₀ Transportbeginn [m ³ /s]	mittl Fracht [m ³ /Jahr]	naturnahe / transportierbare Geschiebefracht (Referenzzustand) [m ³ /a]	Erosion oder Auflandungstrend?	Abriebeiwert	Kiesentnahme / Wasserkraftwerk	IST Zustand Geschiebefazit / Morphologie	Szenarien / Massnahmen
14	Glatt	[9]	nein	1.1 bis 12.1 km von Mündung in die Thur Ort Durchmesser: Niederglatt bei KM 5.3	QP 4	X	15	5	X	0.0045 aus S. 28, GHHS	8	290	1500 (mittelwert) Schwankungsbereich: 0 - 4'000	Geschiebefazit, Erosionstendenz nicht nachweisbar wegen fehlenden QPaufnahmen	0.0015	IN der AUE ! WK Glattmüli. Das Wasser wird rechtsufrig oberhalb Wehrschwelle gefasst. Restwasserstrecke von 700m.	Deutlich bis ausgeprägtes Geschiebefazit. Die Sohle zeigt eine ausgeprägt Deckschicht mit kleinen Kiesbänken. Mäander, Breite 150 m naturnahe Linienführung und Gewässerbreite	X
18	Thur	[11]	[12]		KM 73449	X	7.5 (*)	3.0 (*)	X	0.0022 aus LP Vermessung		9100	12400 max. Erhöhung der Geschiebezufuhr	Mehrheitlichkanalisiert, Uferhart verbaut, Sohle mit Schwellen. Erosion von Talflanken und Sohlen verhindert	0.0125	X	X	Vorschlag Aufweitung bei Will
55	Sense	[5]	[6]	10.0 bis 13 KM (oberhalb 13 ist sie verzweigt in Warme und Kalte Sense) Ort Durchmesser: Km 10.5 (untere Ende Aue)	KM 10.937 bis 10.400	3.0 (*)	15.5 (*)	5.2 (*)	X	0.00766 aus LP Vermessung		7'000	9'500	X	X	keine Kiesentnahme an Sense, aber an Schwarzwasser ca. 2'500m ³ /a. Keine Wasserkraftwerke.	Natürlich und heute: verzweigt	Ja. 1) IST Zustand 2) Sanierter Zustand 3) IST Zustand ohne Entnahmen Massnahmen nur an Schwarzwasser, darum leicht höhere Fracht im unteren Abschnitt der Sense
72	Kander	[1]	[2]	9.27 - 13.33 Ort Durchmesser: Kander Riechbach bei KM 13.2	KM 12728 bis 13007	7.6	28.7	11.6	Ja	0.0091 aus LP Vermessung		7'000	15'000 Szenario 2B (erhöhte Einträge und gleiche Geometrie) Annahme = naturnah	Erosion 1 bis 3 cm/Jahr	0.01	X	X	Ja. 1) Status quo 2) Erhöhung Geschiebeeintrag 3) Aufweitung
80	Lütschine	[7]	[8]		KM 8564	8.5 (*)	35 (*)	13.1 (*)	X	0.0065 aus LP Vermessung		12'500	29'000	X	X	total Weisse+Sschwarze Lütschine bis zur Aue: 25'9000 m ³ /a	Natürlich: verzweigt Aber heute: korrigiert (gerade)	X
81	Schwarze Lütschine	[7]	[10]	11.72 bis 12.55 Ort Durchmesser: 12.7 km, in Aue, oberhalb Einmündung WisseL Grindelwald	KM 11847	2.1 (*)	10.5 (*)	5.6 (*)	X	0.0169 aus LP Vermessung		7'500	18'000	X	X	SchwarzeL: Gletschersand ca. 1400 m ³ /a weisseL bei Grindelwald: 3 Standorte, Tot ca. 19'200 m ³ /a	In steilen Strecke gibt es Stufen-Becken-Abfolgen	X
344	Töss	[3]	[4]	4.2 bis 7.2 Gewäss	KM 7546 (kurz vor AUE, noch gerader Verlauf, dann Mäander)	X	7.1 (*)	3.0 (*)	X	0.0035 aus LP Vermessung		zwischen 3'000 und 4500	4'676 Mittelwert Tab 4.4 GHHS Christian Marti	Erosion bis 2.5 cm/a	0.012 bis 0.015 (für dm bzw. d90)	X	X	Ja. 4 Szenarien. Unterschiedliche Kiesentnahme/zugabe

Wenn mit (*) versehen bedeutet nicht aus Geschiebehaltstudie, sondern:

ObjNr - Gewässer	Daten	Sonstige Quelle:
18 - Thur	d ₉₀ und d _m	[13]
55 - Sense	d ₅₀ , d ₉₀ und d _m	[14]
80 - Lütschine	d ₅₀ , d ₉₀ und d _m	[15]
81 - Schwarze Lütschine	d ₅₀ , d ₉₀ und d _m	[16]
344 - Töss	d ₉₀ und d _m	[17]

Anhang C-2. Hochwasserstatistik und Dauerkurve

Tab. 24: Hochwasserstatistik, Dauerkurve und mittlerer Abfluss von der nächst liegende Messstation (MS) und Angaben zur Messperiode. Hell blau: aus Gumbelverteilung, dunkel blau: aus dem Diagramm Statistik der Jahreshochwasser abgelesen, hell rot: maximum Spitze in der Messperiode. Für die Schwarze Lütschine: Diese originellen Abflussdaten aus der Messstation sind für die flussbauliche Berechnung mit Gl. 10 korrigiert worden.

Aue 18 Thur		Aue 55 Sense		Aue 80 Lütschine		Aue 344 Töss		Aue 14 Glatt		Aue 81 Schwarze Lütschine		Aue 72 Kander	
Geschiebedefizit		Geschiebedefizit		Geschiebedefizit		Geschiebedefizit		Geschiebedefizit		Geschiebedefizit		Geschiebedefizit	
0-20%		0-20%		21-50%		21-50%		51-80%		51-80%		81-100%	
BAFU MS Thur - Jonschwil, Mühlau		BAFU MS Sense - Thörishaus, Sense matt		BAFU MS Lütschine - Gsteig		Kantonale MS ZH570		Kantonale MS Glatt - Oberbüren, Buchental (HO8401)		Kantonale MS A010		BAFU MS Kander - Hondrich	
Hochwasserstatistik		Hochwasserstatistik		Hochwasserstatistik		Hochwasserstatistik		Hochwasserstatistik		Hochwasserstatistik		Hochwasserstatistik	
Statistikperiode	1966-2015	Statistikperiode	1928-2015	Statistikperiode	1924-2015	Statistikperiode	1992-2016	Statistikperiode	1984-2014	Statistikperiode	1992-1998	Statistikperiode	1981-2015
Jahre	50	Jahre	88	Jahre	92	Jahre	25	Jahre	31	Jahre	7	Jahre	35
HQ_2	317	HQ_2	146	HQ_2	123	HQ_2	129	HQ_2	47	HQ_2	51	HQ_2	129
HQ_5	416	HQ_5	200	HQ_5	148	HQ_5	185	HQ_5	73	HQ_5	68	HQ_5	165
HQ_10	496	HQ_10	244	HQ_10	168	HQ_10	222	HQ_10	90	HQ_10	79	HQ_10	196
HQ_30	652	HQ_30	315	HQ_30	199	HQ_30	278	HQ_30	116	HQ_30	96	HQ_30	250
HQ_100	877	HQ_100	404	HQ_100	238	HQ_100	338	HQ_100	149	HQ_100	115	HQ_100	323
HQ_300	1149	HQ_300	498	HQ_300	277	HQ_300	392	HQ_300	-	HQ_300	131	HQ_300	406
Dauerkurve		Dauerkurve		Dauerkurve		Dauerkurve		Dauerkurve		Dauerkurve		Dauerkurve	
Messreihe	1966 - 2015	Messreihe	1928 - 2015	Messreihe	1924 - 2015	Messreihe	1985-2015	Messreihe	1984 - 2015	Messreihe	1992-1998	Messreihe	1981- 2015
Jahre	50	Jahre	88	Jahre	92	Jahre	31	Jahre	32	Jahre	7	Jahre	35
Abfluss sortiert	Tag im Jahr	Abfluss sortiert	Tag im Jahr	Abfluss sortiert	Tag im Jahr	Abfluss sortiert	Tag im Jahr	Abfluss sortiert	Tag im Jahr	Abfluss sortiert	Tag im Jahr	Abfluss sortiert	Tag im Jahr
[m³/s]	[Tag]	[m³/s]	[Tag]	[m³/s]	[Tag]	[m³/s]	[Tag]	[m³/s]	[Tag]	[m³/s]	[Tag]	[m³/s]	[Tag]
1.26	365	0.95	365	1.59	365	1.65	365	0.067	365	0.82	365	3.45	365
1.98	362	1.4	362	1.98	362	1.85	362	0.213	362	1.23	362	4.05	362
2.59	356	1.77	356	2.23	356	2.09	356	0.356	356	1.29	356	4.67	356
3.14	347	2.05	347	2.47	347	2.38	347	0.453	347	1.41	347	5.28	347
4.18	329	2.45	329	2.9	329	2.85	329	0.601	329	1.77	329	6.05	329
5.19	310	2.84	310	3.34	310	3.23	310	0.733	310	2.12	310	6.72	310
6.1	292	3.16	292	3.81	292	3.56	292	0.862	292	2.42	292	7.41	292
7.09	274	3.5	274	4.39	274	3.88	274	1.01	274	2.71	274	8.14	274
8.36	251	3.99	251	5.47	251	4.32	251	1.18	251	3.35	251	9.36	251
9.75	228	4.54	228	6.89	228	4.86	228	1.35	228	4.07	228	10.8	228
11.3	205	5.19	205	8.84	205	5.4	205	1.55	205	5.05	205	12.7	205
13.1	182	5.92	182	11.6	182	6.01	182	1.77	182	6.67	182	15.3	182
15.2	160	6.71	160	15.2	160	6.77	160	2.03	160	8.6	160	18.5	160
17.8	137	7.66	137	20.2	137	7.67	137	2.33	137	11.21	137	22.1	137
21.1	114	8.8	114	25.1	114	8.93	114	2.73	114	15.11	114	25.6	114
25.3	91	10.3	91	30.3	91	10.5	91	3.25	91	18.1	91	29.4	91
29.5	73	11.8	73	34.7	73	12	73	3.84	73	19.66	73	32.6	73
35	55	14	55	39.4	55	14.2	55	4.78	55	22.01	55	36	55
44.6	36	17.5	36	45.2	36	18	36	6.15	36	24.91	36	41.2	36
62.2	18	24.1	18	53.3	18	24.4	18	8.7	18	29.09	18	49.1	18
85.8	9	32.4	9	60.3	9	32.4	9	11.4	9	33.02	9	58.1	9
99.5	6	37.5	6	63.7	6	38	6	12.9	6	35.38	6	63.1	6
128	3	48	3	70.2	3	48.3	3	15.8	3	38.1	3	70.9	3
180	1	64.2	1	80.8	1	68.2	1	21.7	1	42.61	1	89.1	1
583	0	489	0	254	0	295	0	143	0	79.26	0	273	0
Mittlerer Abfluss		Mittlerer Abfluss		Mittlerer Abfluss		Mittlerer Abfluss		Mittlerer Abfluss		Mittlerer Abfluss		Mittlerer Abfluss	
[m³/s]	21	[m³/s]	8.6	[m³/s]	19	[m³/s]	8.9	[m³/s]	2.8	[m³/s]	8.9	[m³/s]	20

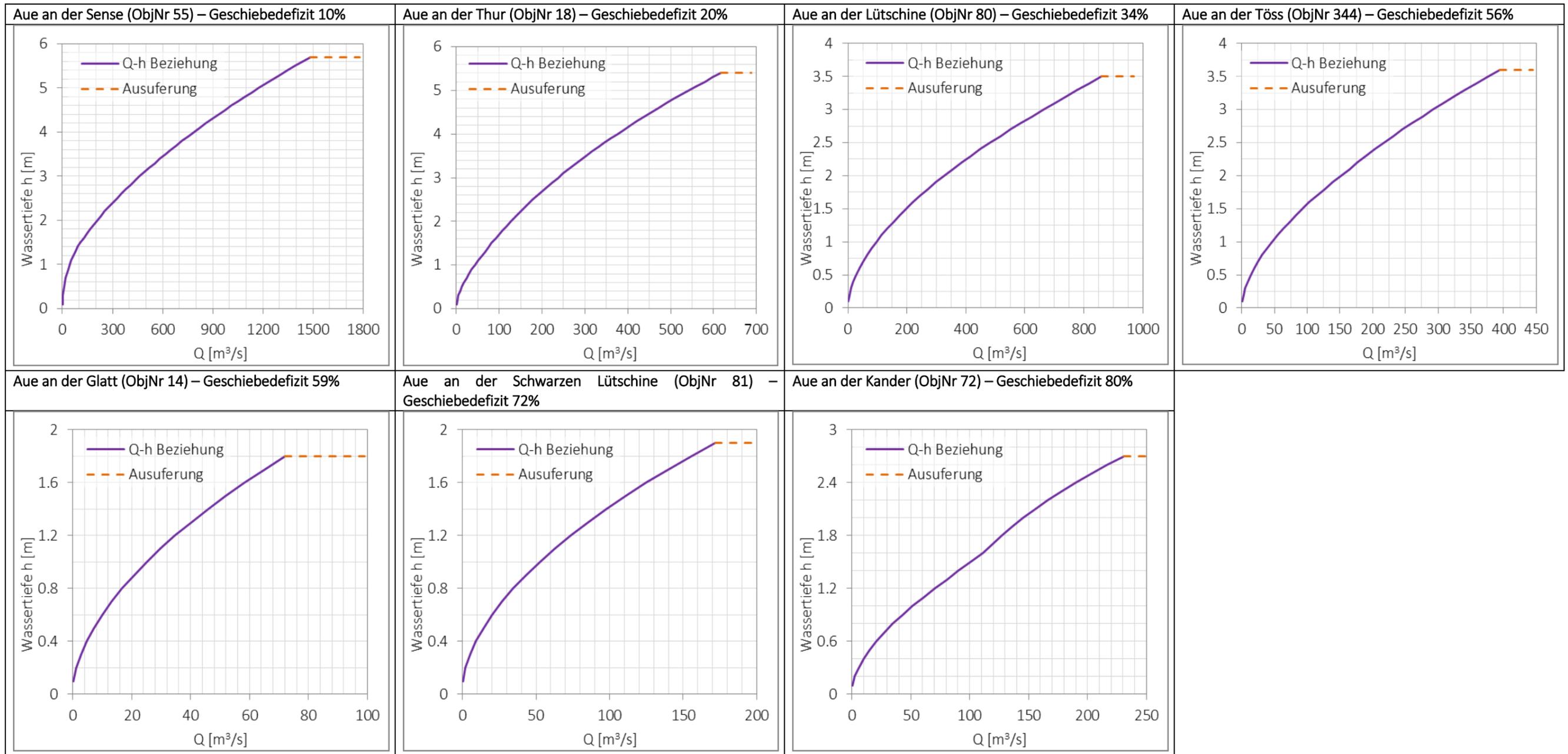
Anhang C-3. Konstanten, Querprofile, Rauigkeitsbeiwerte, Gefälle, Ausuferungsgrenze und Korndurchmesser

Tab. 25: Konstanten und Inputdaten der einzelnen Auen (Querprofiledaten, Rauigkeitsbeiwerte nach Strickler, Gefälle, Ausuferungsgrenze und charakteristischen Korndurchmesser) für die flussbauliche Berechnung in Phase III und im Rahmen dieser Arbeit berechneter Wert des Geschiebedefizits.

Aue an der Sense (ObjNr 55) – Geschiebedefizit 10%						Aue an der Thur (ObjNr 18) – Geschiebedefizit 20%						Aue an der Lütshine (ObjNr 80) – Geschiebedefizit 34%						Aue an der Töss (ObjNr 344) – Geschiebedefizit 56%					
QP 10.937						QP 73449						QP 7.585						QP 7210					
	bis Kote	Breite	kSt	z	zi		bis Kote	Breite	kSt	z	zi		bis Kote	Breite	kSt	z	zi		bis Kote	Breite	kSt	z	zi
Material	[m. ü. M]	[m]	[m ^{1/3} /s]	[m]	[m]	Material	[m. ü. M]	[m]	[m ^{1/3} /s]	[m]	[m]	Material	[m. ü. M]	[m]	[m ^{1/3} /s]	[m]	[m]	Material	[m. ü. M]	[m]	[m ^{1/3} /s]	[m]	[m]
01 Wald	563.2	14.6	20.0	5.8	4.4	01 Wald	508.6	11.3	20.0	5.5	4.4	01 Wald	641.6	2.0	35.0	3.6	0.4	01 Wald	378.3	3.5	45.0	7.1	4.4
02 Kiesbank	558.8	28.5	35.0	1.4	1.4	02 Blockwurf	504.2	1.0	25.0	1.1	1.1	02 Blockwurf	641.2	5.2	42.0	3.2	3.2	02 Blockwurf	373.9	5.0	45.0	2.7	2.7
03 Sohle	557.4	10.0	29.4	0.0	0.0	03 Sohle	503.1	29.0	32.5	0.0	0.0	03 Sohle	638.0	38.7	28.6	0.0	0.0	03 Sohle	371.2	23.0	32.8	0.0	0.0
04 Blockwurf	558.7	2.0	25.0	1.3	1.3	04 Blockwurf	504.4	0.7	25.0	1.3	1.3	04 Blockwurf	641.5	7.0	25.0	3.5	3.5	04 Blockwurf	373.2	2.0	25.0	2.0	2.0
05 Wald	563.2	4.1	20.0	5.8	4.5	05 Wald	508.6	8.9	20.0	5.5	4.1	05 Wald	641.9	2.0	25.0	3.9	0.4	05 Wald	374.9	3.2	20.0	3.7	1.7
TOT Breite =		59.2				TOT Breite =		50.9				TOT Breite =		54.9				TOT Breite =		36.7			
Gefälle	0.00766 [-]					Gefälle	0.0022 [-]					Gefälle	0.0078 [-]					Gefälle	0.0035 [-]				
Ausuferungsgr	5.79 [m]					Ausuferungsgr	5.46 [m]					Ausuferungsgr	3.56 [m]					Ausuferungsgr	3.67 [m]				
d90	0.136 [m]					d90	0.075 [m]					d90	0.160 [m]					d90	0.071 [m]				
dm	0.055 [m]					dm	0.030 [m]					dm	0.068 [m]					dm	0.030 [m]				
Aue an der Glatt (ObjNr 14) – Geschiebedefizit 59%						Aue an der Schwarzen Lütshine (ObjNr 81) – Geschiebedefizit 72%						Aue an der Kander (ObjNr 72) – Geschiebedefizit 80%						Konstanten					
QP 4 aus Geschiebehaushaltsstudie						QP 11847						QP 12728						s					
	bis Kote	Breite	kSt	z	zi		bis Kote	Breite	kSt	z	zi		bis Kote	Breite	kSt	z	zi	2.65 [-]					
Material	[m. ü. M]	[m]	[m ^{1/3} /s]	[m]	[m]	Material	[m. ü. M]	[m]	[m ^{1/3} /s]	[m]	[m]	Material	[m. ü. M]	[m]	[m ^{1/3} /s]	[m]	[m]	11 [-]					
01 Wald	530.0	2.0	27.0	3.8	2.0	01 Wald	956.0	1.0	35.0	2.0	0.1	01 Wald	697.7	9.9	20.0	2.8	1.1	9.81 [m/s ²]					
02 Blockwurf	528.0	2.0	27.0	1.8	1.8	02 Blockwurf	955.9	11.3	20.0	1.9	1.9	02 Blockwurf	696.5	2.1	25.0	1.6	1.6	2650 [kg/m ³]					
03 Sohle	526.2	13.0	28.9	0.0	0.0	03 Sohle	954.0	18.0	25.4	0.0	0.0	03 Sohle	694.9	20.6	28.4	0.0	0.0	0.05 [-]					
04 Blockwurf	528.0	6.0	27.0	1.8	1.8	04 Blockwurf	956.3	4.0	20.0	2.3	2.3	04 Blockwurf	696.2	0.3	25.0	1.3	1.3	1800 [kg/m ³]					
05 Wald	528.1	2.0	27.0	1.9	0.1	05 Wald	956.4	1.0	25.0	2.4	0.0	05 Wald	698.2	7.7	20.0	3.3	2.1	Die Lagerungsdichte wird verwendet für die Umrechnung von Gewicht ins Volumen der Geschiebefracht.					
TOT Breite =		25				TOT Breite =		35.3				TOT Breite =		40.6				Alle Konstanten wurden nach Bezzola (2016) gewählt.					
Gefälle	0.0045 [-]					Gefälle	0.0169 [-]					Gefälle	0.0091 [-]										
Ausuferungsgr	1.9 [m]					Ausuferungsgr	1.95 [m]					Ausuferungsgr	2.76 [m]										
d90	0.150 [m]					d90	0.330 [m]					d90	0.167 [m]										
dm	0.050 [m]					dm	0.110 [m]					dm	0.067 [m]										

Anhang C-4. Pegel-Abfluss-Beziehung

Tab. 26: Mit der Teilflächenmethode berechnete Pegel-Abfluss-Beziehung der sieben untersuchten Auen aufgelistet nach dem im Rahmen dieser Arbeit berechneten Wert des Geschiebedefizits.



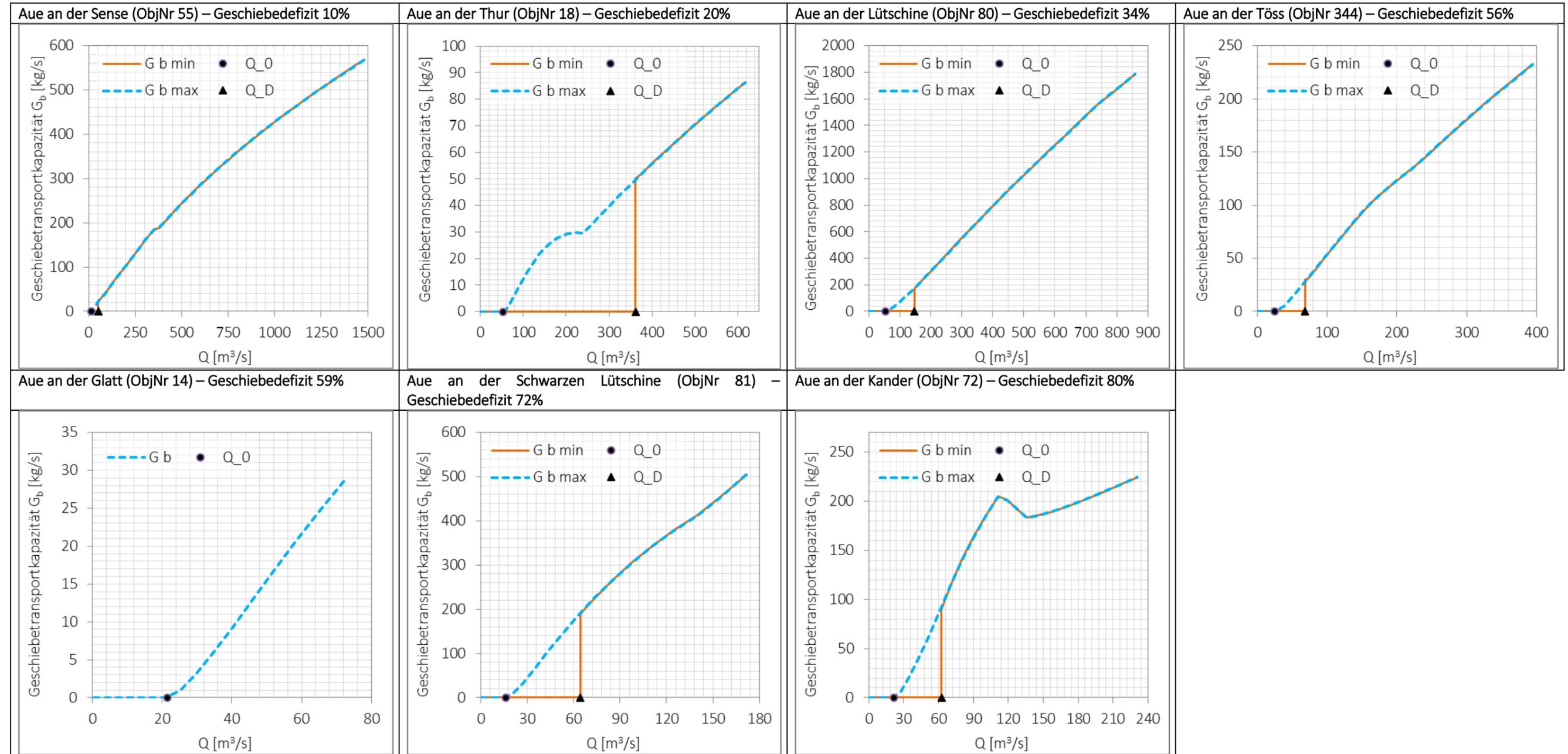
Anhang C-5. Schubspannungen und Grenzabflüsse

Tab. 27: Dimensionslose kritische Schubspannung ϑ_c , dimensionslose kritische Schubspannung der Deckschicht ϑ_{cD} , über die gesamte Flussbreite gemittelte Schubspannung ϑ_m und maximale Schubspannung ϑ_{max} im zentralen Bereich der Flusssohle in Abhängigkeit des Abflusses Q und daraus bestimmten Grenzabflüsse (Q_0 für den Transportbeginn und Q_D für das Aufbrechen der Deckschicht). Angabe zum im Rahmen dieser Arbeit berechneten Wert des Geschiebedefizits.

Aue an der Sense (ObjNr 55) – Geschiebedefizit 10%			Aue an der Thur (ObjNr 18) – Geschiebedefizit 20%			Aue an der Lütschine (ObjNr 80) – Geschiebedefizit 34%			Aue an der Töss (ObjNr 344) – Geschiebedefizit 56%		
Grenzabfluss	Zentraler Bereich	Gesamte Flussbreite	Grenzabfluss	Zentraler Bereich	Gesamte Flussbreite	Grenzabfluss	Zentraler Bereich	Gesamte Flussbreite	Grenzabfluss	Zentraler Bereich	Gesamte Flussbreite
Q_0 [m³/s]	15	22	Q_0 [m³/s]	53	68	Q_0 [m³/s]	53	56	Q_0 [m³/s]	25	28
Q_D [m³/s]	52	104	Q_D [m³/s]	134	362	Q_D [m³/s]	147	164	Q_D [m³/s]	68	84
Aue an der Glatt (ObjNr 14) – Geschiebedefizit 59%			Aue an der Schwarzen Lütschine (ObjNr 81) – Geschiebedefizit 72%			Aue an der Kander (ObjNr 72) – Geschiebedefizit 80%					
Grenzabfluss	Zentraler Bereich	Gesamte Flussbreite	Grenzabfluss	Zentraler Bereich	Gesamte Flussbreite	Grenzabfluss	Zentraler Bereich	Gesamte Flussbreite			
Q_0 [m³/s]	22	31	Q_0 [m³/s]	16	20	Q_0 [m³/s]	21	24			
Q_D [m³/s]	-	-	Q_D [m³/s]	64	115	Q_D [m³/s]	63	79			

Anhang C-6. Geschiebetransportkapazität

Tab. 28. Beziehung zwischen dem Abfluss Q und der mit der Formel nach Wong&Parker berechnete Geschiebefunktion G_b (dargestellt durch minimale und maximale Geschiebetransportkapazität) und Grenzabflüsse Q_0 für den Transportbeginn und Q_D für das Aufbrechen der Deckschicht. Angabe zum im Rahmen dieser Arbeit berechneten Wert des Geschiebedefizits.



Anhang C-7. Standorte der Feldmessungen

Übersichtsfotos aus der Begehung der vier Auen



Abb. 15: Eigene Aufnahme der Aue an der Glatt (ObjNr 14). Datum der Begehung: 6. März 2018. Standort: Kiesbank Nr. 1.



Abb. 16: Eigene Aufnahme der Aue an der Kander (ObjNr 72). Datum der Begehung: 9. März 2018. Standort: Kiesbank Nr. 1.



Abb. 17: Eigene Aufnahme der Aue an der Lüttschine (ObjNr 80). Datum der Begehung: 8. März 2018. Standort: Kiesbank Nr. 1.



Abb. 18: Eigene Aufnahme der Aue an der Sense (ObjNr 55). Datum der Begehung: 10. März 2018. Standort: Kiesbank Nr. 1.

Visualisierung der Abschnitte für die Messung der Wasserspiegelbreite und Kiesbänke als Standort für die Messung der Kolmation und der Korndurchmesser

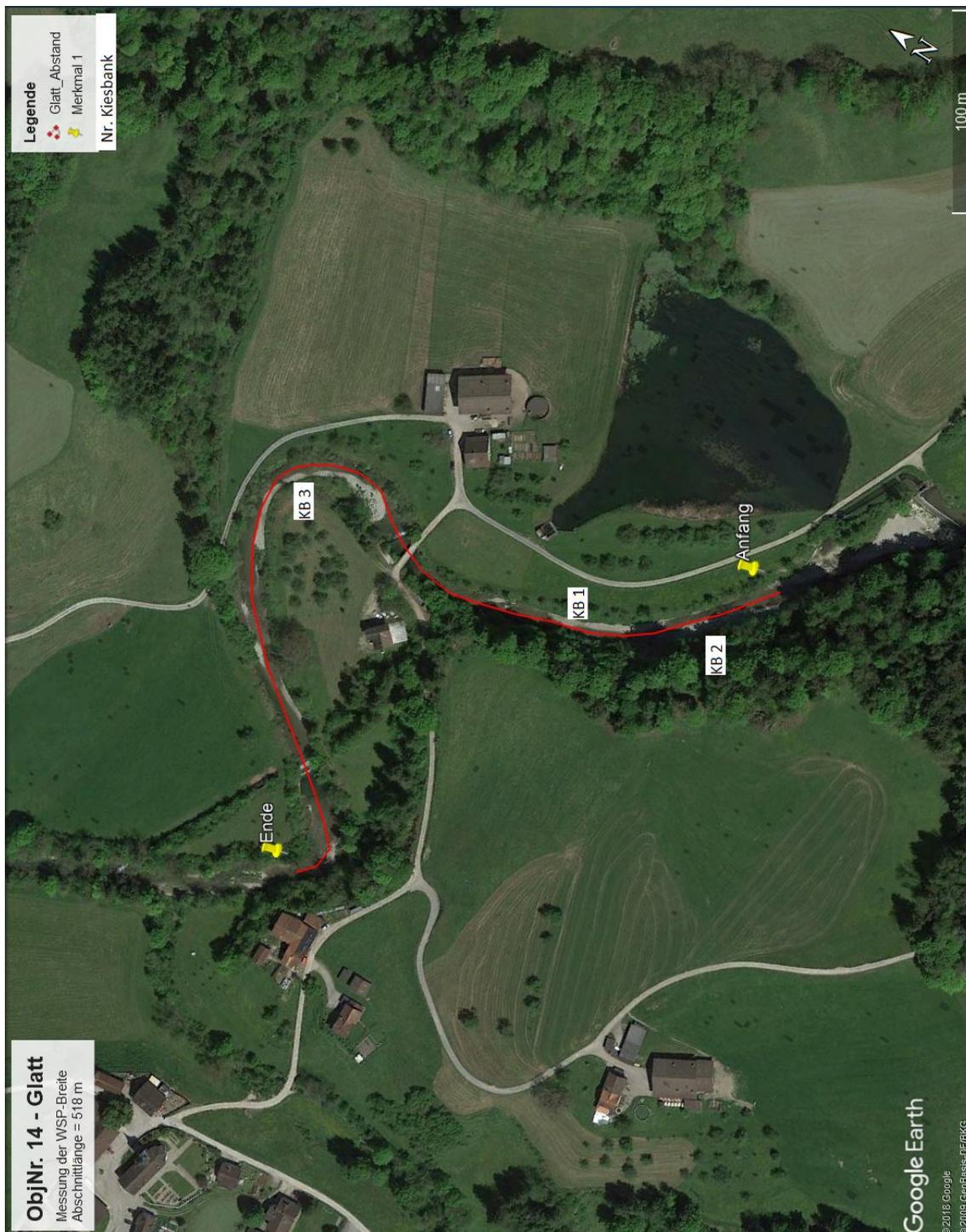


Abb. 19: Übersicht der Feldstandorte an der Glatt bei Flawil: Gewässerabschnitt für die Messung der Wasserspiegelbreite (rot) und Kiesbänke für die Messung von Korndurchmesser und Kolmation (KB Nr). Datum der Begehung: 6. März 2018.

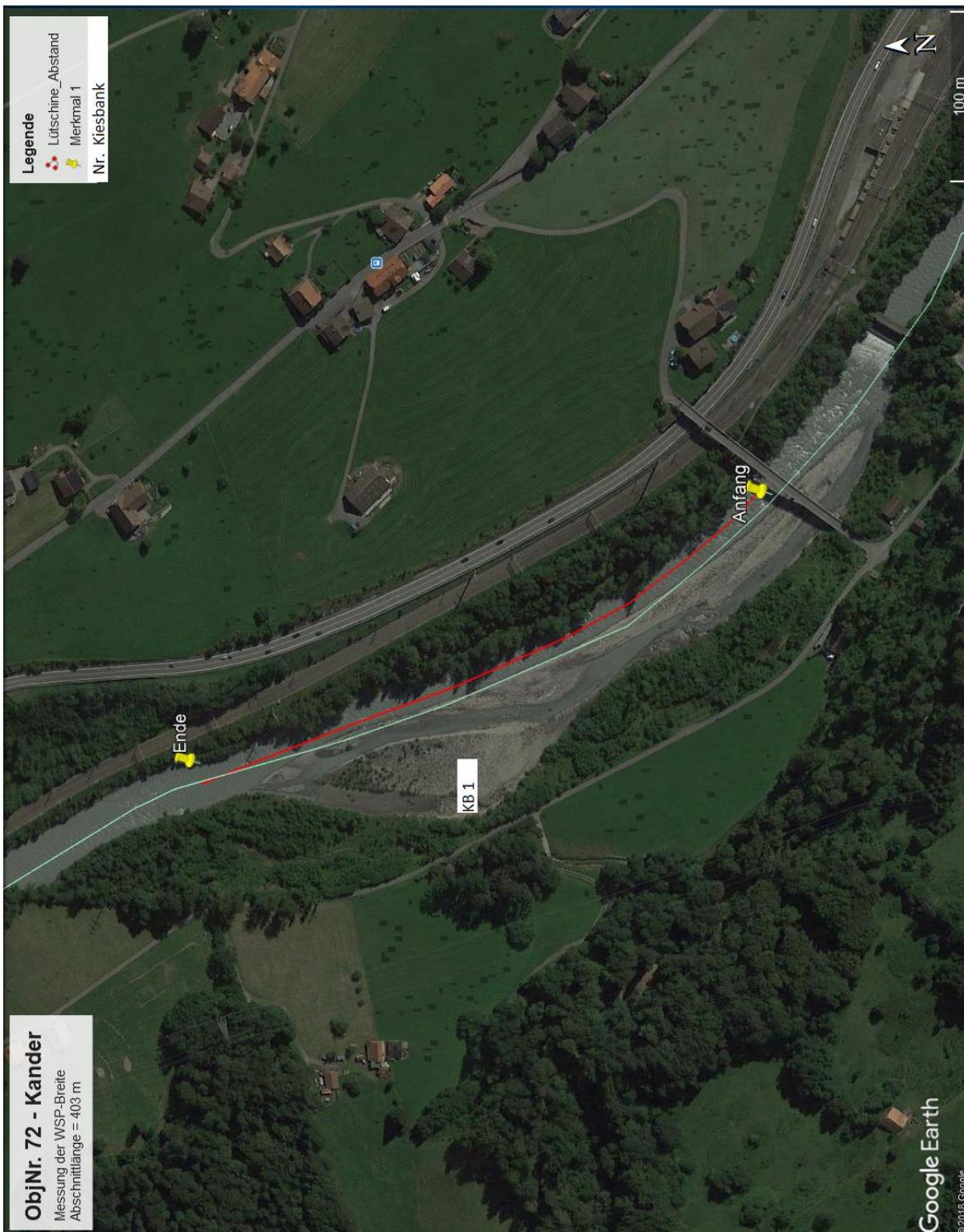


Abb. 20: Übersicht der Feldstandorte an der Kander bei Emdthall: Gewässerabschnitt für die Messung der Wasserspiegelbreite (rot) und Kiesbänke für die Messung von Korndurchmesser und Kolmation (KB Nr). Datum der Begehung: 9. März 2018.



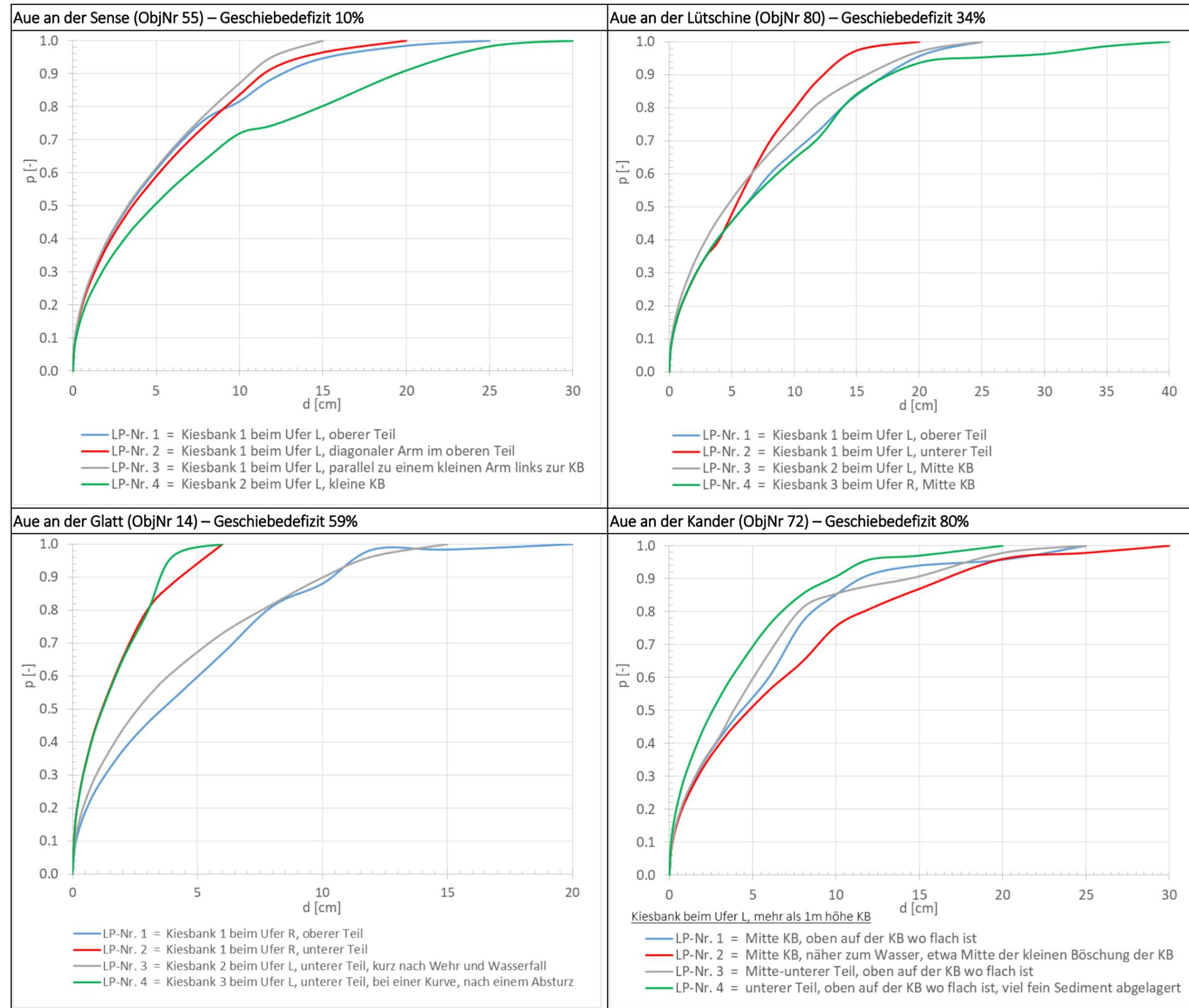
Abb. 21: Übersicht der Feldstandorte an der Lütschine bei Zweilütschinen: Gewässerabschnitt für die Messung der Wasserspiegelbreite (rot) und Kiesbänke für die Messung von Korndurchmesser und Kolmation (KB Nr). Datum der Begehung: 8. März 2018.



Abb. 22: Übersicht der Feldstandorte an der Sense bei Töhrishaus: Gewässerabschnitt für die Messung der Wasserspiegelbreite (rot) und Kiesbänke für die Messung von Korndurchmesser und Kolmation (KB Nr). Datum der Begehung: 10. März 2018

Anhang C-8. Kornverteilungen

Tab. 29: Kornverteilungen der vier gemessenen Linienproben der jeweiligen Aue mit räumlichen Angaben zum Aufnahmeort. Die gemittelten D_m und d_{90} wurden für die flussbauliche Berechnung verwendet. Für die Aue an der Kander wurden nur die Korndurchmesser der roten Linienprobe (LP-Nr.2) verwendet.



Anhang C-9. Resultate der Feldmessung der inneren Kolmation

Tab. 30: Beobachtete Kolmation an den untersuchten Auen mit Angaben zum Standort der Messung. Die Lage der jeweiligen beprobten Kiesbank ist im Anhang C-7 sichtbar).

Aue	Gewässer	Standort Nr.	Kiesbank Nr.	Ort auf Kiesbank	Kolmation	Kolmations- klasse	Standardisierter Wert
14	Glatt	1	Kiesbank 1	oben	schwach	2	0.9
14	Glatt	2	Kiesbank 1	mitte	schwach	2	0.9
14	Glatt	3	Kiesbank 1	mitte-unten	schwach	2	0.9
14	Glatt	4	Kiesbank 1	unten	keine	1	1
14	Glatt	5	Kiesbank 2	oben	mittel	3	0.5
14	Glatt	6	Kiesbank 2	mitte	stark	4	0.2
14	Glatt	7	Kiesbank 2	unten	stark	4	0.2
14	Glatt	8	Kiesbank 3	unten	keine	1	1
14	Glatt	9	Kiesbank 3	mitte	keine	1	1
14	Glatt	10	Kiesbank 3	oben	keine	1	1
80	Lütschine	1	Kiesbank 1	unten	schwach	2	0.9
80	Lütschine	2	Kiesbank 1	mitte-unten	schwach	2	0.9
80	Lütschine	3	Kiesbank 1	oben	keine	1	1
80	Lütschine	4	Kiesbank 2	unten	schwach	2	0.9
80	Lütschine	5	Kiesbank 2	mitte	schwach	2	0.9
80	Lütschine	6	Kiesbank 2	mitte-oben	schwach	2	0.9
80	Lütschine	7	Kiesbank 2	oben	mittel	3	0.5
80	Lütschine	8	Kiesbank 3	oben	mittel	3	0.5
80	Lütschine	9	Kiesbank 3	mitte	schwach	2	0.9
80	Lütschine	10	Kiesbank 3	mitte-unten	schwach	2	0.9
72	Kander	1	Kiesbank 1		schwach	2	0.9
72	Kander	2	Kiesbank 2		stark	4	0.2
72	Kander	3	Kiesbank 3		schwach	2	0.9
72	Kander	4	Kiesbank 4		mittel	3	0.5
72	Kander	5	Kiesbank 5		stark	4	0.2
72	Kander	6	Kiesbank 6		schwach	2	0.9
72	Kander	7	Kiesbank 7		stark	4	0.2
72	Kander	8	Kiesbank 8		schwach	2	0.9
72	Kander	9	Kiesbank 9		stark	4	0.2
72	Kander	10	Kiesbank 10		schwach	2	0.9
55	Sense	1	Kiesbank 1	oben, kleiner Arm	keine	1	1
55	Sense	2	Kiesbank 1	oben, Hauptfluss	keine	1	1
55	Sense	3	Kiesbank 1	Diagonal Arm	schwach	2	0.9
55	Sense	4	Kiesbank 1	mitte, kleiner Arm	stark	4	0.2
55	Sense	5	Kiesbank 1	mitte, Hauptfluss	keine	1	1
55	Sense	6	Kiesbank 1	unten, kleiner Arm	schwach	2	0.9
55	Sense	7	Kiesbank 2	mitte	schwach	2	0.9
55	Sense	8	Kiesbank 2	oben	schwach	2	0.9
55	Sense	9	Kiesbank 3	oben	schwach	2	0.9
55	Sense	10	Kiesbank 3	mitte	schwach	2	0.9

Anhang C-10. Resultate der Feldmessung der Wasserspiegelbreite

Resultate der Feldmessung

Tab. 31: Abfluss während der Feldmessung und Mittelabfluss über die Messperiode der Messstation, Länge des gemessenen Gewässerabschnittes und prozentualer Anteil zur Gesamtlänge des Auenhauptflusses. Die Lage des jeweiligen gemessenen Abschnittes ist im Anhang C-7 sichtbar).

ObjNr	Fluss	Geschiebedefizit	Q_{Messtag}	Q_m	Messstation	$L_{\text{Feldmessung}}$	Anteil zur
		[%]	[m ³ /s]	[m ³ /s]		[m]	L_{Aue}
72	Kander	80%	6.5	20.4	Hondrich	403	25.8
14	Glatt	59%	1.4	2.82	Oberbüren, Buechental	518	8.8
80	Lütschine	34%	2.7	18.8	Gsteig	387	38.3
55	Sense	10%	6.8	8.56	Töhrishaus, Sensematt	-	-

Anhang D Eigenständigkeitserklärung



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Eigenständigkeitserklärung

Die unterzeichnete Eigenständigkeitserklärung ist Bestandteil jeder während des Studiums verfassten Semester-, Bachelor- und Master-Arbeit oder anderen Abschlussarbeit (auch der jeweils elektronischen Version).

Die Dozentinnen und Dozenten können auch für andere bei ihnen verfasste schriftliche Arbeiten eine Eigenständigkeitserklärung verlangen.

Ich bestätige, die vorliegende Arbeit selbständig und in eigenen Worten verfasst zu haben. Davon ausgenommen sind sprachliche und inhaltliche Korrekturvorschläge durch die Betreuer und Betreuerinnen der Arbeit.

Titel der Arbeit (in Druckschrift):

Analyse ausgewählter Objekte des Bundesinventars der Auengebiete von nationaler Bedeutung

Verfasst von (in Druckschrift):

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich.

Name(n):

BIANCHI

Vorname(n):

ANITA

Ich bestätige mit meiner Unterschrift:

- Ich habe keine im Merkblatt „Zitier-Knigge“ beschriebene Form des Plagiats begangen.
- Ich habe alle Methoden, Daten und Arbeitsabläufe wahrheitsgetreu dokumentiert.
- Ich habe keine Daten manipuliert.
- Ich habe alle Personen erwähnt, welche die Arbeit wesentlich unterstützt haben.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die Arbeit mit elektronischen Hilfsmitteln auf Plagiate überprüft werden kann.

Ort, Datum

Zürich, 8. April 2018

Unterschrift(en)

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich. Durch die Unterschriften bürgen sie gemeinsam für den gesamten Inhalt dieser schriftlichen Arbeit.