



ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
DEPARTMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT UNR

**Veränderung der Habitatvielfalt in der Schwall-Sunk-Strecke der Sarine nach dem Bau
des Rossens-Staudamms (Kt. FR)**

Eine GIS-Auswertung historischer Luftbilder



Bachelorarbeit

von

Fabian Rickenbacher

Bachelorstudiengang 2014

Abgabedatum 07. September 2017

Studienrichtung Umweltingenieurwesen

Korrektoren:

Dr. Diego Tonolla: ZHAW Life Sciences und Facility Management
Grüntal, Postfach, CH-8820 Wädenswil

Dr. Michael Döring: ZHAW Life Sciences und Facility Management
Grüntal, Postfach, CH-8820 Wädenswil

Impressum

Titelbild:

Luftbildaufnahme vom Kraftwerk Hauterive (Kt. Fribourg) aus dem Jahre 1943
(Quelle: swisstopo)

Schlagwörter:

Auenlandschaft, Schwall-Sunk, Wasserkraft, Habitat Turnover, Abflussregime

Keywords:

Floodplain, hydropeaking, hydropower, floodplain change, run-off regime

Zitiervorschlag:

Rickenbacher, F. (2017). Veränderung der Habitatvielfalt in der Schwall-Sunk-Strecke der Sarine nach dem Bau des Rossens-Staudamms (Kt. FR) - Eine GIS-Auswertung historischer Luftbilder. Bachelorarbeit. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Wädenswil.

Adresse des Instituts:

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Life Science und Facility Management
Grüntal, Postfach
CH-8820 Wädenswil

Autor:

Rickenbacher Fabian
Rynetelstrasse 11
5722 Gränichen
fabian.rickenbacher@hotmail.com

Abstract

Floodplains are among the world's most vulnerable ecosystems. In Switzerland, it is estimated that more than 70 % of all floodplains have disappeared, and only a few are left in the natural state. More than half of the electricity produced in Switzerland comes from hydroelectric power, and again about 57 % of this electricity comes from storage power plants, where fluctuations in the level occur in times of increased power generation. Due to the altered run-off regime, very unstable habitats are created in time and space, and lateral cross-linking decreases, which means that important floodplain habitats are separated from the river.

Within the scope of this Bachelor thesis, the morphological changes of most important floodplain sites in the hydropeaking stretch of the Sarine/Saane were investigated by means of an evaluation of historical aerial images after the construction of the Rossens dam (Kt. FR). The Sense floodplain served as a near-natural reference at Plaffeien (Kt. FR).

The results show that as a result of dam construction and the Hauterive power plant, the Sarine drainage regime has been significantly altered and the number of flood events (HQ2 & HQ10) which are necessary for the conservation of typical floodplains habitats has declined markedly (15 HQ2 to 8-12 HQ2 and 5 HQ10 to 1-2 HQ10). The percentage change in habitat and the spatial distribution of the habitats clearly show that both the Sarine and the Sense have lost clear amounts of open gravel surface. Over the entire study period, the open gravel bars recorded a decrease of 97.2% (Sarine) and 53.9% on the Sense. In contrast, the areas of the anthropogenic structures increased significantly both in the Sarine (+313.4 %) and in the Sense (+173.4 %). Due to the lack of dynamics, the diversity of the habitats and their habitat ratios are lower at the Sarine than at the Sense, which is rendered particularly evident with increasing number of changes. While at the Sarine 15.3 % of all surfaces changed once, the share of the Sense was slightly lower at 13.8 %. However, only 7.9 % and 0.3 % of the areas on the Sarine changed three or six times, whereas 15.5 % (three changes) and 2.7 % (six changes) showed a substantially larger part of the area that has changed frequently during the period under study.

The use of the river water by the hydropower alters the flow- and bed-load regime, which as a result changes the habitat diversity. Further investigations are necessary in order to demonstrate the future changes of the two floodplains.

Zusammenfassung

Auenlandschaften gehören zu den weltweit am meisten gefährdeten Ökosystemen. In der Schweiz sind bis heute schätzungsweise mehr als 70 % aller Auenlandschaften verschwunden und von den noch vorhandenen befinden sich nur noch wenige in naturnahem Zustand. Mehr als die Hälfte des in der Schweiz produzierten Stromes stammt aus der Wasserkraft und wiederum ca. 57 % dieses Stromes stammt aus Speicherkraftwerken, bei welchen in Zeiten der erhöhten Stromproduktion Pegel- und Abflussschwankungen auftreten können, die als Schwall-Sunk bezeichnet werden. Durch das veränderte Abfluss- und Geschieberegime können zeitlich und räumlich instabile Lebensräume entstehen und wichtige Auenhabitate vom Fließgewässer abgetrennt werden.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde die morphologischen Veränderungen der wichtigsten Auenhabitate in der Schwall-Sunk-Strecke der Sarine/Saane nach dem Bau des Rossens-Staudamms (Kt. FR) mittels einer Auswertung von historischen Luftbildern untersucht. Als naturnahe Referenz diente die Senseaue bei Plaffeien (Kt. FR).

Die Resultate zeigen, dass durch den Staudammbau und das Kraftwerk Hauterive das Abflussregime der Sarine deutlich verändert wurde und die Anzahl der Hochwasserereignisse (HQ2 & HQ10), welche für die Erhaltung von typischen Auenhabitaten notwendig sind, direkt nach dem Staudammbau deutlich abnahm (15 HQ2 zu 8 - 10 und 5 HQ10 zu 1 - 2 HQ10). Die prozentuale Habitatveränderung und die räumliche Verteilung der Habitate zeigen deutlich, dass sowohl an der Sarine als auch an der Sense die unbewachsenen Kiesflächen besonders stark an Fläche verloren. Über die gesamte Untersuchungsperiode betrachtet verzeichneten die unbewachsenen Kiesflächen einen Rückgang von 97.2 % (Sarine) bzw. 53.9 % an der Sense. Im Gegensatz dazu nahmen die Flächen der anthropogenen Bauwerke sowohl an der Sarine (+313.4 %) als auch an der Sense (+173.4 %) deutlich zu. Die Diversität der Habitate und ihre Habitatturnoverraten sind an der Sarine aufgrund der fehlenden Dynamik geringer als an der Sense, besonders deutlich zeigt sich dies bei zunehmender Anzahl der Veränderungen. Während an der Sarine sich 15.3 % aller Flächen sich einmal verändert haben, war der Anteil an der Sense mit 13.8 % etwas tiefer. Aber nur noch 7.9 % bzw. 0.3 % der Flächen an der Sarine veränderten sich drei bzw. sechs Mal, während sich an der Sense mit 15.5 % (drei Veränderungen) bzw. 2.7 % (sechs Veränderungen) ein deutlich grösserer Teil der Flächen während der Untersuchungsperiode verändert hat.

Die Nutzung der Fließgewässer durch die Wasserkraft verändert das Abfluss- und Geschieberegime was eine Veränderung der Habitatvielfalt zur Folge hat. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um die zukünftigen Veränderungen der beiden Auen aufzuzeigen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich im Rahmen dieser Bachelorarbeit begleitet haben. Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Betreuern Dr. Diego Tonolla und Dr. Micheal Döring, die mich bei meiner Arbeit mit viel Engagement tatkräftig unterstützt haben, bedanken. Die kompetente Betreuung und die grosse Hilfsbereitschaft habe ich sehr geschätzt.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Martin Geilhausen und Nils Ratnaweera (Fachstelle Geoinformatik an der ZHAW) für die Geoinformatik Unterstützung bedanken.

Ein besonderer Dank gilt auch meiner Familie und Freunden, die mir beim Erstellen dieser Arbeit eine grosse Hilfe waren und mich während dieser Zeit immer unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
2	Material und Methoden.....	12
2.1	Untersuchungsgebiete	12
2.1.1	Sarine Schwall-Sunk Strecke	13
2.1.2	Sense.....	15
2.2	Luftbilder	16
2.3	Abflussdaten	18
2.4	Ökomorphologische Indikatoren.....	20
2.4.1	Habitatveränderung- und Habitat Turnover	21
2.4.2	Uferlänge	21
2.4.3	Braid-channel ratio-Index und Sinosity-Index	22
2.4.4	Wasserspiegelbreitenvariabilität.....	23
2.4.5	Shannon-Index und Evenness-Index.....	23
2.5	Breite und Fläche der aktiven Aue.....	24
3	Resultate.....	25
3.1	Sarine	25
3.1.1	Abflussdaten	25
3.1.2	Habitatveränderung.....	26
3.1.3	Habitat Turnover	29
3.1.4	Uferlänge	31
3.1.5	Braid-channel ratio-Index und Sinosity-Index	31
3.1.6	Wasserspiegelbreitenvariabilität.....	32
3.1.7	Shannon-Index und Evenness-Index.....	32
3.1.8	Breite und Fläche der aktiven Aue.....	33
3.2	Sense.....	34

3.2.1	Abflussdaten	34
3.2.2	Habitatveränderung.....	35
3.2.3	Habitat Turnover	38
3.2.4	Uferlänge	39
3.2.5	Braid-channel ratio-Index und Sinuosity-Index	39
3.2.6	Wasserspiegelbreitenvariabilität.....	40
3.2.7	Shannon-Index und Evenness-Index.....	41
3.2.8	Breite und Fläche der aktiven Aue.....	41
4	Diskussion.....	42
4.1	Luftbilder	42
4.2	Abflussdaten	43
4.3	Ökomorphologische Indikatoren.....	43
4.4	Schlussfolgerungen.....	47
4.5	Ausblick.....	48
5	Literaturverzeichnis	50
	Anhang.....	58

Abkürzungsverzeichnis

Art.	Artikel
Abs.	Absatz
BAFU	Bundesamt für Umwelt
HQ	Hochwasserabfluss
GIS	Geoinformatiksystem
GSchG	Gewässerschutzgesetz
GschV	Gewässerschutzverordnung
MHQ	Mittlerer jährlicher Hochwasserabfluss
Q*	Hochwasserschwellenwert
RGB	Rot, Grün und Blau (Photometrie)
RMS-Error	Root Mean Square (RMS) – Mass für den mittleren Lagefehler nach einer Georeferenzierung

1 Einleitung

Auenlandschaften sind in natürlichem Zustand aussergewöhnlich heterogene und dynamische Ökosysteme, die sich aus verschiedenen aquatischen (z.B. Haupt- und Nebengerinne mit verschiedenen Rinnen, Furten und Schnellen, temporäre Tümpel) und terrestrischen (z.B. Uferwälder, Inseln, Kiesbänke) Habitaten zusammensetzen. Aufgrund von natürlichen Abflussschwankungen und verschiedenen Hochwasser sowie durch Erosions- und Ablagerungsprozesse verändert sich im Laufe der Zeit die Anordnung der Lebensräume durch Ausdehnung, Fragmentierung oder Rückgänge in den longitudinalen, lateralen und vertikalen Dimensionen (Stanley et al., 1997; Ward et al., 2002; Malard et al., 2006; Doering et al., 2007; Poole et al., 2008). Gemäss «shifting habitat steady state concept» (Bormann & Likens, 1979; Ward et al., 2002; Hohensimmer et al., 2005) bleibt die Anzahl der Habitattypen und das Verhältnis der Habitatflächen zur gesamten Auenfläche bei natürlichen Auen trotz den natürlichen Veränderungen über mehrere ökologische Perioden relativ konstant. Aufgrund ihrer hohen natürlichen Abfluss- und Geschiebedynamik bieten Auen wichtige Räume für Tier- und Pflanzenarten und sind dadurch wichtig für die Aufrechterhaltung der Biodiversität (Doering et al., 2013). Allerdings gehören Auenlandschaften zu den weltweit am meisten gefährdeten Ökosystemen. Oft werden sie durch anthropogene Eingriffe (z.B. Flussverbauungen, Wasserentnahmen, Wasserkraftwerke, Staudämme), sowie durch weitere Umwelteinflüsse (z.B. Klimawandel, Feuer) beeinflusst und die natürliche Habitatverteilung sowie die Gewässerökologie können beeinträchtigt werden (Whited et al., 2007; Doering et al., 2012). In der Schweiz sind bis heute schätzungsweise bereits mehr als 70% aller Auenlandschaften verschwunden und von den noch vorhandenen befinden sich nur wenige in naturnahem Zustand (Lachat et al., 2010).

Rund 59% des im Jahr 2016 produzierten Stroms in der Schweiz wurde durch die Wasserkraft gewonnen, wovon wiederum rund 57% aus Speicherkraftwerken stammt (Schweizerische Elektrizitätsstatistik, 2016). Speicherkraftwerke nutzen Querbauwerke wie Dämme oder Talsperren. Diese beeinträchtigen die Längsvernetzung der Fliessgewässer und beeinflussen Abflussregime und Geschiebehalt (Weber & Schmid, 2014). Gemäss Vörösmarty et al. (2003) bleiben in Gewässern mit grossen Dämmen gut 50 % des Geschiebes im Staubereich liegen, wodurch der Geschiebetransport unterbrochen wird und in flussabwärtsliegenden Gewässerabschnitten das Geschiebe fehlt. Dies kann zur Eintiefung der Sohle sowie zu einer Vergrößerung des Sohlenmaterials führen (Kondolf, 1997). Weiter wird durch die Nutzung der Wasserkraft die Abflussmenge der Flussabschnitte unterhalb eines Staudamms reduziert, man spricht von Restwasser (Weber & Schmid, 2014). Als Folge davon nimmt die seitliche Vernetzung ab und ökologisch wichtige Auenhabitate werden vom Fliessgewässer abgetrennt (Jungwirth et al., 2002). Durch das Ausbleiben von Hochwasser- und Geschiebedynamiken ist eine Abnahme von typischen Auenhabitaten wie offenen Kiesflächen und Weichholzauenwäldern zu beobachten

(Doering et al., 2012). Zusätzlich entstehen durch die Produktion von Spitzenstrom, der in Zeiten des erhöhten Bedarfs meist in Speicherkraftwerken produziert wird, unterhalb des Kraftwerkes bei der Wasserrückgabe regelmässige und kurzfristige Abfluss- und Pegelschwankungen, die als Schwall-Sunk bezeichnet werden. Durch den Betrieb von ca. 100 bis 120 Speicherkraftwerken sind in der Schweiz schätzungsweise 1'000 km Fließgewässer wesentlich beeinträchtigt (Bundesamt für Umwelt 2015, unveröffentlicht). Die stark schwankenden Abflüsse führen zu zeitlich und räumlich äusserst instabilen Lebensräumen, in welchen sich Strömungsgeschwindigkeiten, Wassertiefen sowie die vom Wasser benetzte Fläche mit den Abflussschwankungen rasch verändern (Person, 2013; Bruder et al., 2016; Tonolla, Bruder & Schweizer, 2017). Für die aquatischen Lebewesen sind diese Habitate äusserst schwierig zu besiedeln, da sie oft durch Abdrift bei Schwallbetrieb (bodenbewohnende Insektenlarven; Bruno et al., 2012) oder Strandung bei Sunkbetrieb (Jungfische; Person, 2013) gefährdet sind.

Die Schweiz hat erkannt, dass ein beträchtlicher Teil unserer Fließgewässer und Auen durch verschiedene anthropogene Einflüsse gefährdet ist und hat entsprechende Gesetze und Verordnungen eingeführt, welche den Schutz und die Erhaltung dieser Lebensräume zum Ziel haben. Die rechtliche Grundlage zum Gewässerschutz in der Schweiz bildet das Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG) vom 24. Januar 1991 (Stand am 1. Juni 2014) und die Gewässerschutzverordnung (GSchV) vom 28. Oktober 1998 (Stand am 1. Mai 2017). Durch die Revision des Gewässerschutzgesetzes im Jahre 2011 werden Betreiber von Wasserkraftwerken aufgefordert unter anderem die wesentlichen negativen Auswirkungen von Schwall-Sunk (Art. 39a GSchG) zu beseitigen und den Geschiebehaushalt wieder zu reaktivieren (Art. 43a GSchG). Die geforderten Massnahmen müssen bis zum Jahre 2030 umgesetzt werden. Die Gesetzgebung zur Sicherung angemessener Restwassermengen ist seit 1992 in Kraft. Die gesetzeskonforme Abgabe der Restwassermenge ist durch Art. 29 bis Art. 36 GSchG geregelt. Auenhabitate sind zudem durch die Verordnung über den Schutz der Auengebiete von nationaler Bedeutung (Auenverordnung) vom 28. Oktober 1992 (Stand am 1. Januar 2008), welche auf Art. 18a Abs. 1 und 3 des Bundesgesetzes über den Natur- und Heimatschutz (NHG) vom 1. Juli 1966 (Stand am 1. Januar 2017) gestützt ist, geschützt. Gemäss Art 4. Abs. 1 Auenverordnung sind auentypische einheimische Pflanzen und Tiere zu schützen und die natürliche Dynamik des Gewässer- und Geschiebehaushalts soll ungeschmälert erhalten und soweit sinnvoll wiederhergestellt werden.

Diese Bachelorarbeit ist ein Bestandteil des interdisziplinären SNF NRP 70 Forschungsprojektes «Hydroecology and Floodplain Sustainability in Application (HyApp)» mit dem Ziel, die nachhaltige Entwicklung der Wasserkraft zu unterstützen und die Ökosystemleistungen – primär in Auenlandschaften - zu erhalten und zu optimieren. Im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit wird mittels Analysen von historischen und aktuellen Luftbildern der Einfluss des Rossens Staudamms und des Kraftwerks Hauterive auf die raumzeitliche morphologische Veränderung der wichtigsten Auenhabitats in der Schwall-Sunk Strecke der Sarine (dt. Saane) untersucht. Als naturnahe Referenzstrecke dient die Aue an der Sense bei Plaffeien im Kanton Freiburg. Ähnliche Untersuchungen in der Restwasserstrecke der Sarine unterhalb des Rossens Staudammes wurden im Rahmen der Bachelorarbeit von Friedli (2017) durchgeführt.

Folgende Hypothesen werden untersucht:

- i. Die Habitatvielfalt hat durch den Staudammbau und das Kraftwerk Hauterive in der Schwall-Sunk-Strecke abgenommen.
- ii. Die prozentuale- und flächenmassige Verteilung der Habitate hat sich an der Sarine und der Sense unterschiedlich verändert.
- iii. Die Habitatsänderungsrate (Turnover rate) wird durch die Wasserkraftnutzung beeinflusst.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiete

Die Untersuchung der Auswirkungen des Staudamms bei Rossens und des Kraftwerks Hauterive auf die morphologische Veränderung der Auenhabitate in einer Schwall-Sunk-Strecke erfolgte an der durch Wasserkraft beeinflussten Sarine (Saane) im Kanton Fribourg sowie an der Sense an der Kantonsgrenze zwischen den Kantonen Fribourg und Bern, einer Referenzstrecke mit mehrheitlich natürlichem Abfluss- und Geschieberegime (Hettrich & Ruff 2011) (Abbildung 1).

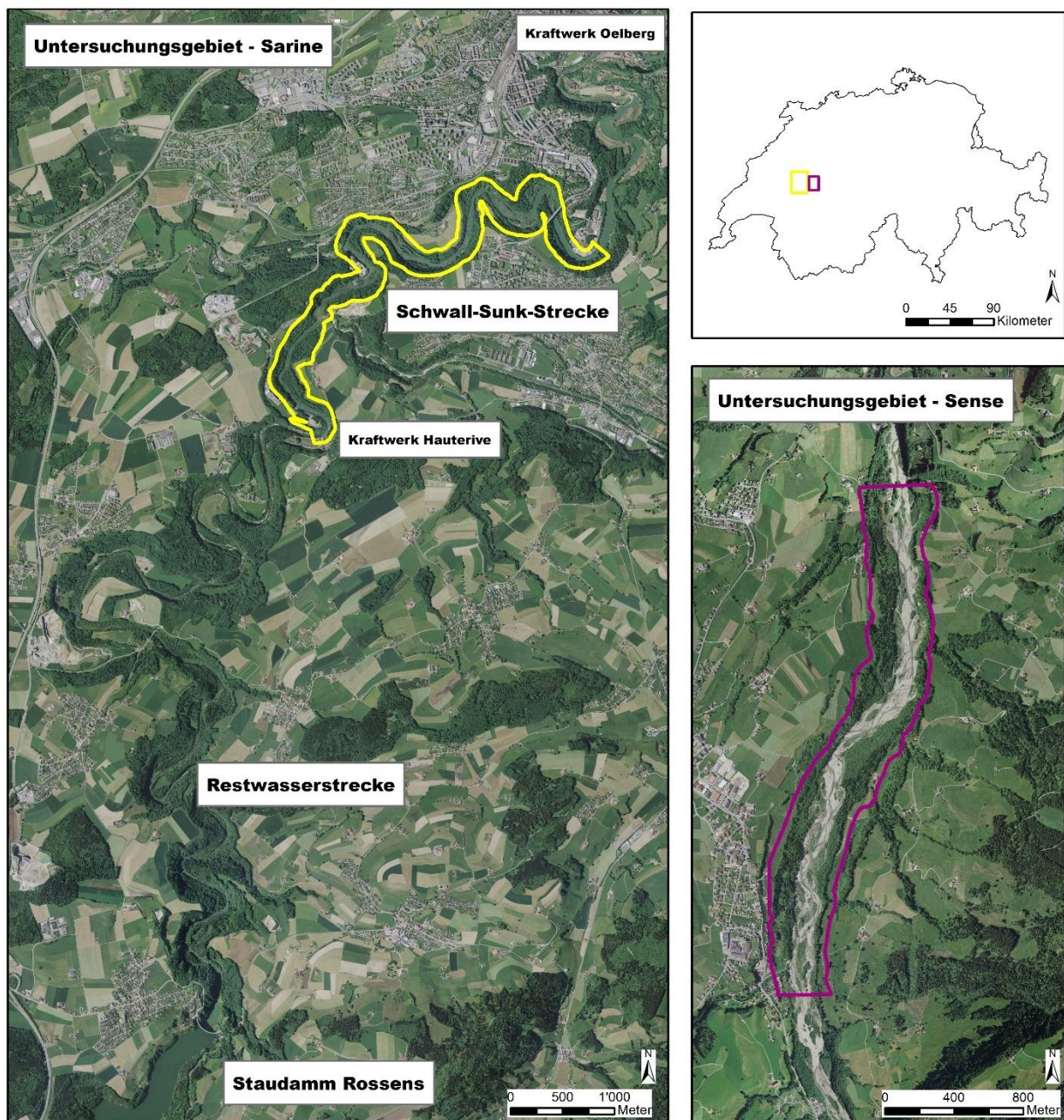


Abbildung 1: Übersichtskarte zu den beiden Untersuchungsgebieten an der Sarine und der Sense. In gelb bzw. violett sind die jeweiligen Untersuchungsperimeter eingezeichnet. Quelle Hintergrundkarten Swisstopo (2017) und Auenperimeter BAFU (2007, plus 50m Puffer).

2.1.1 Sarine Schwall-Sunk Strecke

Die Aue «La Sarine: Rossens-Fribourg» wurde 1992 in das Bundesinventar der Auengebiete von nationaler Bedeutung aufgenommen (2003 revidiert) und weist eine Gesamtfläche von 267 ha auf (BAFU, 2017). Die Sarine entwässert ein Einzugsgebiet von rund 1900 km² und entspringt im Diableretsgebiet auf Walliser Boden (Dubler, 2012). Bereits im Jahre 1902 wurde die Sarine ca. drei Kilometer oberhalb des heutigen Staudamms bei der Thusy-Brücke (Gemeinde Pont-la-Ville) mit einem Damm gestaut und das Wasser der Sarine im Kraftwerk Hauterive zur Stromerzeugung genutzt (Group-e, 2016). Gemäss der Zeitschrift Schweizer Ingenieur und Architekt (1998) wurde die Talsperre Rossens (Koordinaten 575050 / 174150) am 14. Oktober 1948 nach einer vier jährigen Bauzeit offiziell eingeweiht. Das im Lac de la Gruyère (dt. Greyerzersee) gespeicherte Wasser stammt aus einem insgesamt 1'269 km² grossen Einzugsgebiet und wird seither durch einen 6'040 m langen Stollen ins Kraftwerk Hauterive geleitet, welches zum Zeitpunkt des Staudammbaus renoviert und ausgebaut wurde. Durch den Rückstau der Sarine und die dadurch erfolgten Eingriffe in das natürliche Abflussregime ging die natürliche Auendynamik verloren. Es bildeten sich an der Sarine eine Restwasser- sowie eine Schwall-Sunk-Strecke und die natürliche Geschiebe- und Hochwasserdynamik der Aue wurde erheblich reduziert (Tabelle 1).

Die ca. 13.3 km lange Restwasserstrecke (Abbildung 1) verläuft in Haupt- und Seitenkanälen in einem tief eingeschnittenen, mit Wald bewachsenen Tal zwischen Sandsteinfelsen. Sie befindet sich auf circa 566 - 608 m. ü. M. und weist ein Gefälle von 0.03‰ auf. Der heutige Abfluss der Restwasserstrecke setzt sich aus einer konstanten, über den Grundablass des Sees zugeführten Restwassermenge zusammen und wurde bis zum Jahr 1975 nicht dotiert. In der Zeitperiode 1976 - 2006 betrug die Restwassermenge 1 m³/s (Groupe-e, 2008). Seit der Neudotierung im März 2006 bis heute beträgt die Restwassermenge im Winter 2.5 m³/s und im Sommer 3.5 m³/s (Group-e, 2016) (Anhang III).

Die Schwall-Sunk-Strecke beginnt etwas unterhalb des Kraftwerks Hauterive und weist bis zur «Fischfarm» (ca. 700 m unterhalb der Brücke Pont de Pérolles) eine Länge von ca. 6.5 km auf. Morphologisch ist dieser Gewässerabschnitt geprägt von flachen Kiesbänken (Abbildung 2), welche regelmässig bei Schwallbetrieb überflutet werden, und steilen, felsigen Prallhängen. Gemäss Groupe-e (2008) kann seit 1994 bei Schwall bis zu 75 m³/s Wasser durch die Turbinen in das Fliessgewässer eingeleitet werden. Bei Sunk geht die Menge meist auf 0 m³/s zurück und es fliesst nur noch die vom Staudamm abgegebene



Abbildung 2: offene Kiesbank in der Schwall-Sunk Strecke. Quelle: D. Tonolla (2017).

Restwassermenge. Die beiden Zuflüsse La Gérine und La Glâne münden ca. 1.5 bzw. 2.5 km unterhalb des Kraftwerks in die Schwall-Sunk-Strecke ein. Die mittleren Jahresabflüsse bei der Einmündung in die Sarine betragen im Jahre 2016 für La Gérine, gemessen bei Marly (FR), 3.5 m³/s und für La Glâne, gemessen bei Matran (FR) rund 0.9 m³/s (Hydrique, 2017). Ihr Anteil am mittleren Gesamtabfluss der Sarine für das Jahr 2016 (46.8 m³/s), gemessen an der Messstation in Fribourg (BAFU), beträgt somit 7.5 bzw. 1.9 %. Die Gesamtfläche des Schwall-Sunk Untersuchungsperimeters beträgt rund 158 ha bei einer Untersuchungsbreite zwischen 170 und 370 m (Abbildung 1).

Tabelle 1: Übersichtstabelle zum Aufwertungsbedarf der Aue «La Sarine: Rossens-Fribourg» in Bezug auf Geschiebe, Abfluss, Schwall-Sunk und Revitalisierungen. Rot = starke Beeinträchtigung, gelb = mittlere Beeinträchtigung, blau = keine oder nur sehr geringe Beeinträchtigung. Quelle: Hanus et al., (2014; verändert).

InvObjNr	Name	Gewässer	Kanton	Geschiebe defizit	% des natürlichen Abflusses	Schwall-Sunk	Revitalisierung
62 (Schwall-Sunk Strecke)	La Sarine: Rossens-Fribourg	La Sarine	FR	81-100% ^A	0-20%	nicht betroffen	nicht nötig ^A
62.2 (Restwasserstrecke)	La Sarine: Rossens-Fribourg	La Sarine	FR	81-100% ^A	81-100%	betroffen	Teilweise nötig ^B

A = sichere Datenlage

B = unsichere Datenlage

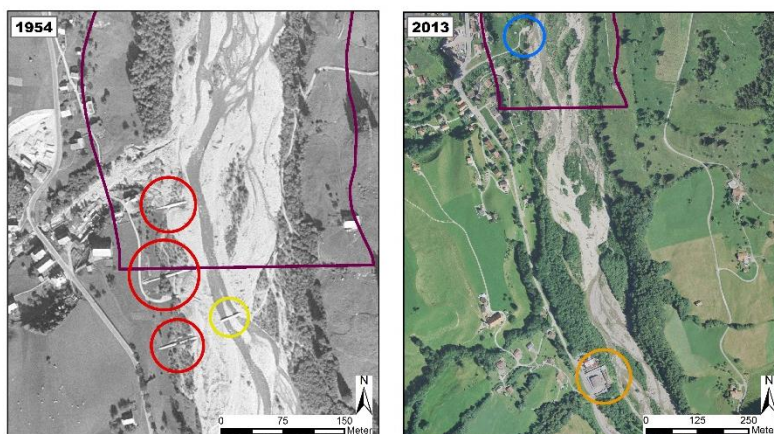
2.1.2 Sense

Die Senseaue wurde 1992 in das Bundesinventar der Auengebiete von nationaler Bedeutung aufgenommen und weist eine Gesamtfläche von 307 ha auf, wovon 166 ha zum Kanton Bern gehören und 141 ha im Kanton Fribourg liegen (BAFU, 2017). Die Sense entwässert ein Einzugsgebiet von rund 430 km², weist eine Gesamtlänge von



Abbildung 3: Verzweigtes Gerinne bei Plaffeien. Quelle: Geisser et al., (2014).

ca. 43 km auf und entspringt im Gebiet Gantrisch-Schwarzsee. Das Abfluss- und Geschieberegime ist im Gegensatz zu dem an der Sarine weitestgehend natürlich (Tabelle 2). Das Abflussregime wird aufgrund von ausgeprägten Spitzen bei den mittleren Monatsabflüssen zur Zeit der Schneeschmelze in den Monaten April und Mai als «nivo-pluvial préalpin» bezeichnet (Geisser et al., 2014). Die ca. 3.3 km lange Referenzstrecke befindet sich auf einer Höhe von 828 – 770 m. ü. M östlich vom Dorf Plaffeien (FR), weist ein Gefälle von 1.8% auf und ist gemäss Hettrich & Ruff (2011) Teil des natürlichsten Flusses im nördlichen Alpenraum. Trotzdem sind bereits auf dem Luftbild aus dem Jahr 1954 deutlich anthropogene Eingriffe zu sehen. Es handelt sich dabei um Ufersicherungen durch Buhnen und eine Brücke, welche Mitte des 20. Jahrhunderts gebaut wurden. Im Jahr 2005 wurde oberhalb des Untersuchungsperimeters bei



der Deponie «Kloster» ebenfalls eine Ufersicherung verbaut (Abbildung 4). Beim Parkplatz «Rufenen» war eine Ufersicherung geplant, ob diese eingebaut wurde, ist nicht bekannt (schriftliche Mitteilung, Dr. Lukas Hunzinger, Flussbau AG).

Abbildung 4: Bekannte Verbauungen an der Sense. 1954: Untersuchungsperimeter (violett), die zur Ufersicherung eingebauten Buhnen (Mitte 20. Jh., rot) und eine Brücke (Mitte 20. Jh., gelb). 2013: Untersuchungsperimeter (violett), Ufersicherung bei der Deponie «Kloster» (2005, orange) und die geplante Ufersicherung beim Parkplatz «Rufenen» (nicht bekannt ob realisiert, blau). Quelle Hintergrundkarten Swisstopo (2017) und Auenperimeter BAFU (2007, plus 50 m Puffer).

Unterhalb des Untersuchungsperimeters im sogenannten Sensetal ist die Sense deutlich geprägt durch morphologische Flussverbauungen und Kanalisierungen (Geisser et al., 2014). Die Gesamtfläche des Untersuchungsperimeters beträgt rund 112 ha bei einer Untersuchungsbreite

zwischen 303 und 426 m (Abbildung 1). Unterhalb von Plaffeien hat sich ein bis zu 100 m breites Bachbett tief in die hohen Sandsteinfelsen gegraben und bildet ein Gerinnesystem mit Kies- und Schotterbänken, welche durch natürliche Prozesse von Zeit zu Zeit umgelagert oder von Pioniervegetation (Bsp. *Salix sp.*) besiedelt werden (Strub, 2016). Die mittlere jährliche Abflussmenge an der Sense, gemessen an der Messstation Thörishaus, Sensematt für die Zeitperiode 1928 - 2016 beträgt rund 8.6 m³/s.

Tabelle 2: Übersichtstabelle zum Aufwertungsbedarf der «Senseaue» in Bezug auf Geschiebe, Abfluss, Schwall-Sunk und Revitalisierungen. Blau = keine oder nur sehr geringe Beeinträchtigung. Quelle: Hanus et al., (2014; verändert).

InvObjNr	Name	Gewässer	Kanton	Geschiebe defizit	% des natürlichen Abflusses	Schwall-Sunk	Revitalisierung
55	Senseauen	Sense	BE/FR	0-20% ^A	100%	nicht betroffen	nicht nötig ^A

A = sichere Datenlage

2.2 Luftbilder

In der vorliegenden Arbeit wurden historische Luftbilder und aktuelle Orthofotos aus dem Zeitintervall (1938 - 2013) der zwei Auen verwendet, um die Habitatveränderungen in den letzten 70 - 75 Jahren aufzuzeigen und zu charakterisieren (Tabelle 3). Sämtliche verwendeten Bilder wurden beim Bundesamt für Landestopografie (Swisstopo, 2017) in digitaler Form bestellt. Die Bilder aus den Jahren 2007 und 2013 sind Swissimage RGB Orthofotomosaik mit einer Auflösung von 25 cm, während die Bilder von 1981 und 1993 panchromatische Orthofotomosaik mit einer Auflösung von 50 cm sind. Die vertikal panchrometrischen Bilder der Zeitreihen 1943, 1952, 1968 bei der Sarine und 1938, 1954, 1969 bei der Sense mussten für die Datenauswertung fotogrammetrisch aufbereitet und orthorektifiziert werden. Für die Aufbereitung wurden insgesamt drei Schritte benötigt, welche mit der Software IMAGINE Photogrammetry 2014 von ERDAS IMAGINE 2014[®] von Martin Geilhausen (ZHAW, Geoinformatik) durchgeführt wurden. In einem ersten Schritt wurde die Innenausrichtung der Bilder mit Hilfe der Brennweite und Referenzpunkten berechnet. Da für die Zeitreihen 1938 und 1943 die Brennweiten der Bilder nicht bekannt waren, wurden diese, wie in Tabelle 3 angegeben, berechnet. Die Aussenausrichtung wurde mittels Triangulation von mindestens sieben und maximal vierzehn Bodenkontrollpunkten (Bsp. Strassenkreuzungen, Felsbrocken, etc.) und automatisch generierten Punkten in den übereinandergelegten Bildern ermittelt. Die Koordinaten der Bodenpunkte wurden anhand von den Orthofotomosaiken aus den Jahren 2013 und dem digitalen Terrain Model SwissALTI3D (vertikale Genauigkeit von ± 50 cm) bestimmt. Um die relative Genauigkeit sicherzustellen,

wurden in allen Bildern der sieben Jahrgänge dieselben Bodenkontrollpunkte verwendet. Im dritten Schritt wurden die historischen Luftbilder mit dem oben erwähnten digitalen Terrain Model zu Orthofotomosaiken mit einer Auflösung von 30 cm verarbeitet. Der aus dieser Bearbeitung resultierende mittlere RMS-Error für die Innenausrichtung beträgt für die sechs Zeitreihen $1,2 \pm 0.2$ Pixel und bei den Kontrollpunkten resultierte ein totaler RMS-Error von 33.2 ± 18.6 cm.

Tabelle 3: Datenüberblick zu den verwendeten Luftbildern für die Sarine und die Sense.

	Aufnahmedatum	Anz. Bilder	Flughöhe (m)	Original Masstab	Brennweite (mm)	Endauflösung des Mosaiks (m)
Sarine	30.08.1943	6	3000	1:14100 -1:14700	204.08 – 212.77 ¹	0.30
	08.04.1952	6	4300	1:16900 -1.17400	210.38 ²	0.30
	25.06.1968	3	4200	1:23500	152.87 ²	0.30
	01.06.1981	2	4306 – 4314	1:22900 – 1:23500	153.02	0.50
	30.07.1993	1	5899	1:32000	152.52	0.50
	31.07.2007	1	2500	NA	NA	0.25
	07.06.2013	1	2500	NA	NA	0.25
Sense	04.06.1938	2	3450	1:15600 – 1:15900	216.98 – 221.15	0.30
	24.09.1954 & 14.10.1954*	2	4500 - 5000	1:16900 -1.19200	210.1 ²	0.30
	14.07.1969	1	4500	1:23500	152.87 ²	0.30
	01.06.1981	1	4762	1:235000	153.02	0.50
	29.07.1993	1	4819	1:24800	152.52	0.50
	01.08 & 21.09 & ev. 13.09.2007*	1	2500 - 5000	NA	NA	0.25
	07.06. & ev. 31.07.2013*	1	2500	NA	NA	0.25

¹ berechnet als $f = \text{Original Masstab} \times \varnothing \text{ Flughöhe (m)} \times 1000 \text{ (m/mm)}$

² auf den historischen Bildern angegeben

* das genaue Aufnahmedatum konnte nicht eruiert werden

NA = Not available (Information nicht verfügbar)

2.3 Abflussdaten

Die in dieser Arbeit verwendeten Abflussdaten stammen aus den Messstationen Fribourg und Thörishaus, Sensematt, welche vom BAFU betrieben werden (Tabelle 4). Bei den Abflussdaten aus dem Jahr 2016 handelt es sich um provisorische Daten.

Die Messungen der Abflussmessstation Fribourg zeichnen nebst der Abflussmenge der Sarine auch die Abflüsse von der Gérine und der Glâne auf und werden zusätzlich durch die Kraftwerke Hauterive und Oelberg beeinflusst. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden diese zusätzlichen Faktoren nicht berücksichtigt, da sie nur einen geringen Einfluss auf die für diese Arbeit relevanten Hochwasserabflüsse (\geq HQ2) haben (schriftliche Mitteilung, Dr. Diego Tonolla).

Die Abflussdaten für die naturnahe Referenzstrecke der Sense wurden bei der Abflussmessstation Thörishaus, Sensematt gemessen. Nebenflüsse (z.B. Schwarzwasser, Scherlibach, etc.), welche unterhalb der Referenzstrecke aber noch vor der Messstation die Abflussmenge der Sense erhöhen, werden wie bei der Sarine beschrieben nicht weiter berücksichtigt.

Tabelle 4: Übersichtstabelle zu den Abflussmessstationen in Fribourg und Thörishaus, Sensematt.

Flussname	Messstation	Koordinaten	Höhe (m. ü. M.)	Eizugsgebiet (km ²)	Messperiode
Sarine	Fribourg	579420/183670	532	1'269	01.01.1911 – 31.12.2016
Sense	Thörishaus, Sensematt	593350/193020	553	352	01.01.1928 – 31.12.2016

Bei beiden Abflussmessstationen wurden über die längsten verfügbaren Messperioden (Tabelle 4) die mittleren täglichen Abflüsse sowie die höchsten jährlichen Abflüsse zusammengebracht, die statistischen Hochwasser \geq HQ2 und \geq HQ10 sowie der mittlere jährliche Hochwasserabfluss (MHQ; Gleichung 1) und der Hochwasserswellenwert (Q^* ; Gleichung 2) nach Pfandler et al. (2011) bestimmt.

$$MHQ = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n Q_{d, max, j} \quad (1)$$

$Q_{d, max}$ = Jahreshochwasserabfluss (maximaler Abfluss-Tagesmittelwert eines Jahres)

n = Anzahl Jahre

$$Q^* = 0.6 * MHQ_r \quad (2)$$

MHQ_r = Mittlerer jährlicher Hochwasserabfluss (Tagesabflüsse) des Referenzzustands

Hochwasserabflüsse mit einer Wiederkehrperiode von etwa 2 bis 5 Jahren werden als bettbildende Hochwasser bezeichnet und können, in gehölzfreien Bereichen, morphologische Veränderungen durch Abtrag und Neubildung von Kiesflächen und -bänken verursachen. Abflüsse mit $HQ \geq 10$ gelten als gerinnebildende Abflüsse, die das Flussbett umlagern und neu formen können; Auenwälder können bei diesen Abflüssen abgetragen werden (schriftliche Mitteilung, Dr. Diego Tonolla).

MHQ ist der langjährige Mittelwert der Jahreshochwasserabflüsse, also des jeweils maximalen Abfluss-Tagesmittelwertes, der während eines Kalenderjahres auftritt (Pfaundler et al., 2011). Q^* bezeichnet die Abfluss-Grössenordnung des Referenzzustands, bei der angenommen wird, dass Geschiebetrieb und Sohlenumlagerungen auftreten und damit die ökologisch wichtigen Aspekte eines Hochwassers gegeben sind (Pfaundler et al., 2011)

Die Abflusswerte zu den Zeitpunkten der Luftbildaufnahmen können aus Tabelle 5 entnommen werden und entsprechen den mittleren Tagesabflusswerten der Abflussmessstation. Wie im Kapitel 2.2 beschrieben konnten nicht für alle Luftbildaufnahmen die genauen Daten eruiert werden, deshalb sind in der Tabelle 5 sämtliche zu den möglichen Aufnahmedaten gemessenen Abflussmengen aufgeführt. Die auffallend grossen Abweichungen der gemessenen Abflussmengen in der Sarine sind nebst den jahreszeitlichen Unterschieden bei den Aufnahmen auf die Auswirkungen der Wasserkraftwerke (Schwall-Sunk) zurückzuführen. Im Gegensatz zur Sarine weisen die Abflussmengen an der Sense eine deutlich geringere Abweichung auf.

Tabelle 5: Mittlere tägliche Abflussmenge zum Zeitpunkt der Luftbildaufnahmen an der Sarine und der Sense.

Sarine		Sense	
Aufnahmedatum	Abflussmenge (m ³ /s)	Aufnahmedatum	Abflussmenge (m ³ /s)
30.08.1943	10.9	04.06.1938	9.9
08.04.1952	67.2	24.09.1954 & 14.10.1954	2.3 & 3.5
25.06.1968	34.5	14.07.1969	7.2
01.06.1981	66.0	01.06.1981	10.8
30.07.1993	45.2	29.07.1993	5.0
31.07.2007	48.4	01.08 & 21.09 & ev. 13.09.2007	6.8 & 5.8 & 3.3
07.06.2013	88.7	07.06. & ev. 31.07.2013	10.1 & 5.9

2.4 Ökomorphologische Indikatoren

Um verschiedene ökomorphologische Indikatoren zu bestimmen wurden die aufgearbeiteten Luftbilder mit dem GIS Programm ArcMap 10.4 von Esri (Redlands, Californien, USA) eingelesen und mit Hilfe der Auenperimeter vom BAFU (BAFU, 2007) unter Verwendung der acht Habitattypen aus Tabelle 6 digitalisiert. Da die BAFU Auenperimeter in gewissen Zeitreihen innerhalb des Hauptkanals der Auen verliefen, wurden diese mit einem Puffer von 50 m versehen und an die kleinste verfügbare Bildausdehnung angepasst. Für alle sieben Zeitreihen der Sarine sowie für die Sense wurden die gleichen Perimeterflächen digitalisiert, sodass Veränderungen in den Habitaten zwischen den verschiedenen Zeitreihen miteinander vergleichbar sind. Nebst den in der Tabelle 6 aufgeführten Habitattypen wurden grosse Findlinge im Fliessgewässer als Wasser digitalisiert und nur wenn diese Vegetation aufwiesen, den Kategorien «Vegetated sand and gravel bars» oder «Island» zugeteilt. Schattenflächen, welche aufgrund der Vegetation sowie den Aufnahmezeitpunkten der Bilder entstanden sind, wurden mit Hilfe von den nächst älteren oder jüngeren Bildaufnahmen klassifiziert und den entsprechenden Habitattypen zugeordnet.

Tabelle 6: Charakterisierung der terrestrischen und aquatischen Habitattypen (Doering et al., 2012; verändert).

Habitattyp	Habitatbeschreibung
Water	Stehendes oder fliessendes Wasser
Island	Dichte Vegetationsstellen mit Hartholzbaumgruppen umschlossen von Wasser oder Sand/Kies Flächen ¹
Open sand and gravel bars	Offene, unbewachsene Sand-, Kies- und Schotterflächen
Vegetated sand and gravel bars	Sand-, Kies- und Schotterflächen mit spärlich oder reichlich vorhandener Pioniervegetation wie Gras oder Sträucher (Bsp. <i>Salix spp.</i>) sowie Weichhölzern. Schwemmholtzansammlungen im Wasser oder auf den Bänken, sowie alleinstehende ältere Bäume
(Riparian) Forest	Etablierte Waldflächen (inkl. Auenwald)
Pasture and grassland	Wies-, Weide- und Ackerflächen
Other structures	Anthropogene Strukturen, wie z.B. Wege und Strassen, Häuser und andere Bauwerke, Aufforstungsgebiete und Industrieflächen (z.B. Kieswerke)
Cliff	Felsen und Felswände, welche freigelegt und deshalb sichtbar sind

¹ wenn eine direkte Verbindung zu Waldflächen bestand, wurden diese Habitate als Wald digitalisiert.

Für die weitere Darstellung sowie Analysen wurden die digitalisierten Polygone in Raster umgewandelt (1 m cell size) und anschliessend wieder in Polygone zurückgewandelt. Dadurch wurden kleine Lücken (<1 m) zwischen den Polygonen geschlossen und doppelt digitalisierte Flächen, welche entlang von Polygongrenzen entstehen können, entfernt.

2.4.1 Habitatveränderung- und Habitat Turnover

Für jeden Habitattyp wurde der Flächenanteil an der gesamten Perimeterfläche berechnet. Dies ermöglichte es, die Veränderungen der relativen Häufigkeit der Habitate zwischen den zeitlich verschiedenen Orthofotomosaiken zu quantifizieren. Die Darstellung der Anzahl Veränderungen einer digitalisierten Fläche in Bezug zu deren Habitattyp (Habitat Turnover Rate) wurde mit Hilfe des MS-Offices Programmes «Microsoft Excel 2016» berechnet, indem jeweils die Habitattypen der Polygone aus einem Jahr (z.B. 1943) mit den Habitattypen derselben Polygone in der darauffolgenden Zeitreihe (z.B. 1952, usw.) miteinander verglichen wurden. Als Ergebnis wurde die Anzahl Veränderungen für jedes einzelne Polygon dargestellt. Ein Polygon konnte sich somit insgesamt maximal sechs Mal verändern über die gesamte Untersuchungsperiode.

2.4.2 Uferlänge

Die Uferlänge beschreibt die laterale Vernetzung zwischen Wasser und Land und ist damit ein Indikator für die geomorphologische Komplexität eines Flussabschnittes. Die Uferlänge wird auch als Indikator für die Verfügbarkeit von terrestrischen und aquatischen Uferhabitaten verwendet (Woolsey et al., 2005). Die Uferlänge wurde gemäss Gleichung 3 berechnet und in km pro Fluss-km ausgewertet.

$$Uferlänge = \frac{Uferlinie (km)}{Länge des Hauptkanals (km)} \quad (3)$$

Die Uferlinie wurde im GIS als Umfang des Wasseroberflächen Polygons erfasst. Die Länge des Hauptkanals basiert auf der «centerline», welche mittels der Toolbox «Fluvial Params» (ZHAW, 2017, unveröffentlicht) und manuellen Anpassungen extrahiert wurde. Als Hauptkanal wurde jeweils das Gerinne mit der grössten Breitenausdehnung bestimmt. Die Länge des Hauptkanals entspricht dem Fliessweg des Hauptgerinnes und basiert auf der «centerline», welche mittels der Toolbox «Fluvial Params» (ZHAW, 2017, unveröffentlicht) und manuellen Anpassungen extrahiert wurde.

2.4.3 Braid-channel ratio-Index und Sinosity-Index

Der Braid-channel ratio-Index (B) ist ein Indikator für die Komplexität und die Struktur eines Gewässers und misst die Tendenz eines Gewässers Verzweigungen und Seitenarme auszubilden. Dieser wurde nach Friend & Sinha (1993) berechnet (Gleichung 4) und zeigt das Verhältnis der Länge aller Fliesswege zur Länge des Hauptgerinnes auf. Ein kanalisiertes Flusssystem hätte gemäss Arscott et al. (2002) einen Wert nahe 1 und ein verzweigtes Gerinne einen Index Wert zwischen 2 und 6.

$$\text{Braid – channel ratio index (B)} = \frac{\text{Länge aller Fliesswege (m)}}{\text{Länge des Hauptkanals (m)}} \quad (4)$$

Der Sinosity-Index (S) ist ein Indikator für die Intensität des Mäandrierens eines Fliessgewässers. Dieser wurde nach Friend & Sinha (1993) berechnet (Gleichung 5) und zeigt das Verhältnis der Länge des Hauptkanals zur Länge des gesamten Flusssystem, gemessen anhand der direkten Luftlinie vom Start- bis zum Endpunkt des Systems. Ein gerades, linienförmiges Flusssystem erhält somit den Wert 1. Je stärker ein Fluss mäandriert, desto höher wird der Sinosity-Index.

$$\text{Sinosity – Index (S)} = \frac{\text{Länge des Hauptkanals (m)}}{\text{Länge des Flusssystem (m)}} \quad (5)$$

Die Länge des Hauptkanals wurde mit demselben Vorgehen wie bei der Uferlänge extrahiert. Die Länge aller Fliesswege wurde im GIS als «centerline» des Gewässerlaufes mittels der Toolbox «Fluvial Params» (ZHAW, 2017, unveröffentlicht) und manuellen Anpassungen extrahiert. Die Länge des Flusssystem wurde aus den Luftbildern der Jahre 1943 (Sarine) und 1938 (Sense) für sämtliche Zeitreihen mit einer Länge von 3'308 m bzw. 3'001 m als konstant angenommen.

2.4.4 Wasserspiegelbreitenvariabilität

Die Wasserspiegelbreitenvariabilität ist ein Indikator für die Qualität des Lebensraumes eines Fließgewässers. In kanalisierten Flussläufen liegen die Wasserspiegelbreiten nahe dem Mittelwert, während sie in komplexeren Systemen stärker um den Mittelwert streuen (Woolsey et al., 2005). Die Wasserspiegelbreiten wurden mit der GIS Toolbox «Fluvial Params» (ZHAW, 2017, unveröffentlicht) aus den Polygonen der Wasseroberflächen mittels Querprofilen («cross-section», welche alle 30 m entlang der «centerline» des Gewässerlaufes gelegt wurden, extrahiert. Diese wurden anschliessend manuell bearbeitet und mit den Polygonen der Wasseroberflächen verschnitten. Zur Bewertung der Wasserspiegelbreitenvariabilität wurde der Variationskoeffizient VC_b nach Gleichung 6 bestimmt.

$$VC_b = \frac{\sigma_b}{\mu_b} * 100\% \quad (6)$$

σ_b = Standardabweichung der Wasserspiegelbreiten; μ_b = Mittelwert der Wasserspiegelbreiten

2.4.5 Shannon-Index und Evenness-Index

In der Landschaftsanalyse ist der Shannon-Index (SHDI) ein relatives Mass für die Lebensraumzusammensetzung. Er berücksichtigt sowohl die Anzahl der Habitate als auch deren jeweilige Abundanz. Liegt der SHDI Wert nahe bei 0 bedeutet dies, dass sämtliche Habitatflächen des Untersuchungsgebietes demselben Habittyp angehören. Der SHDI wurde gemäss McGarigal & Marks (1994) bestimmt (Gleichung 7) und mit dem Patch Analyst Tool in GIS berechnet.

$$SHDI = -\sum_{i=1}^m (P_i * \ln P_i) \quad (7)$$

$P_i = \frac{\text{Spezifische Fläche eines Habittyps}}{\text{Gesamtfläche des Perimeters}}$

Der Evenness-Index (SHEI) wurde in Kombination mit dem SHDI nach McGarigal & Marks (1994) mit dem Patch Analyst Tool in GIS berechnet (Gleichung 8)

$$SHEI = \frac{-\sum_{i=1}^m (P_i * \ln P_i)}{\ln m} \quad (8)$$

$\ln m$ = natürlicher Logarithmus der Anzahl Habitate

Der SHEI gibt an, wie gleichmässig die Habitatflächen verteilt sind, oder ob ein Habittyp dominiert. Die Werte liegen zwischen 0 und 1, dabei gilt:

- i. Je näher SHEI bei 0 ist, desto dominanter ist ein einzelner Habittyp. In Bezug auf dessen Flächenausdehnung.
- ii. Je näher SHEI bei 1 ist, desto gleichmässiger sind die Habitatflächen verteilt. In Bezug auf deren Flächenausdehnung.

2.5 Breite und Fläche der aktiven Aue

Als Habitate der aktiven Aue wurden im Rahmen dieser Bachelorarbeit die Habitate Wasser und Inseln sowie bewachsene und unbewachsene Sand-, Kies- und Schotterflächen definiert (schriftliche Mitteilung, Dr. Diego Tonolla). Der Auenwald ist normalerweise ebenfalls ein Bestandteil der aktiven Aue. Dieser konnte in den vorhandenen Luftbildern optisch nicht immer von den etablierten Waldflächen abgetrennt werden und wurde deshalb in dieser Arbeit nicht zur aktiven Auenfläche gezählt. Die Breite der aktiven Aue wurde mit der GIS Toolbox «Fluvial Params» (ZHAW, 2017, unveröffentlicht) aus den Polygonen der aktiven Aue mittels Querprofilen, welche alle 30 m entlang der «centerline» des Polygons der aktiven Aue gelegt wurden, extrahiert. Diese wurden anschliessend manuell bearbeitet und mit den Polygonen der aktiven Aue verschnitten.

Die maximale aktive Auenfläche wurde im GIS berechnet und vereint die Flächen der Habitate der Habitate Wasser und Inseln sowie bewachsene und unbewachsene Sand-, Kies- und Schotterflächen über alle sieben Luftbilder der Untersuchungsperiode.

3 Resultate

3.1 Sarine

3.1.1 Abflussdaten

Beurteilt über die gesamte Messperiode verzeichnete die Sarine einen mittleren täglichen Minimalabfluss von $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ und am 10. Oktober 1930 einen mittleren täglichen Maximalabfluss von $544 \text{ m}^3/\text{s}$ (Anhang IV). Am 22. August 2005 wurde der bisher höchste Maximalabfluss der gesamten Messperiode mit einem Abfluss von $750 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht (Abbildung 5), was einem HQ100 entspricht und während der gesamten Messperiode nur einmal erreicht wurde. Der mittlere jährliche Hochwasserabfluss (MHQ) liegt bei $219.7 \text{ m}^3/\text{s}$.

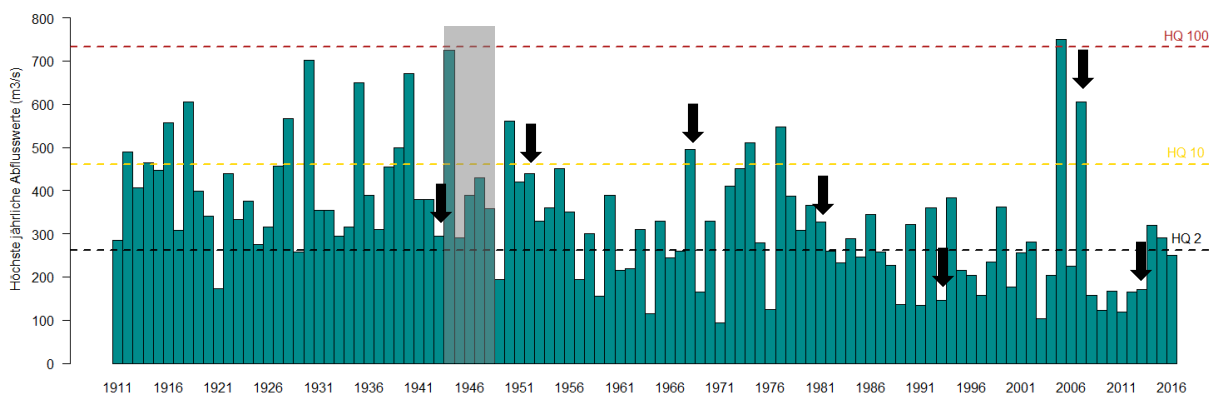


Abbildung 5: Abflussganglinie der höchsten jährlichen Abflüsse an der Station Fribourg für die Periode 1.1.1911 bis 31.12.2016. Schwarz, Gelb und Rot eingezeichnet die Hochwasserabflüsse der Jährlichkeiten 2 ($262 \text{ m}^3/\text{s}$), 10 ($461 \text{ m}^3/\text{s}$) und 100 ($733 \text{ m}^3/\text{s}$). Die schwarzen Pfeile symbolisieren die Jahre der Luftbildaufnahmen, der graue Balken die Bauzeit des Rossens Staudamms.

Der Hochwasserschwelldwert (Q^*) beträgt für die Referenzperiode vor dem Staudammbau (1911 - 1943) $163.4 \text{ m}^3/\text{s}$. In der Zeitperiode zwischen 1928 und 1952 blieb die Anzahl bettbildender Ereignisse ($\geq \text{HQ2}$) mit etwa einem Ereignis pro Jahr konstant (Tabelle 7; Abbildung 5). Wobei vier der acht HQ2 Ereignisse und eines der zwei gerinnebildenden Ereignissen ($\geq \text{HQ10}$) vor der Vollendung des Staudamms stattfanden. Nach 1952 nahm die Anzahl HQ2 und HQ10 Ereignisse ab. Eine Ausnahme bildet die Periode 1969 bis 1981 in welcher die Anzahl Ereignisse pro Jahr einen ähnlich hohen Wert wie zwischen 1944 und 1952 erreichte. Die Periode 2008 bis 2013 verzeichnete nur noch zwei Ereignisse mit HQ2 und kein HQ10 Ereignis (Tabelle 7; Abbildung 5).

Tabelle 7: Hochwasserereignisse \geq HQ2 und \geq HQ10 an der Sarine während der Zeitperiode 1928 – 2013, getrennt nach Periode der Luftaufnahmen.

Wiederkehrperiode	Zeitperiode						
	1928 - 1943	1944 - 1952	1953 - 1968	1969 - 1981	1982 - 1993	1994 - 2007	2008 - 2013
2-Jährig (262 m³/s)							
Anzahl Ereignisse	15	8	9	10	4	5	2
Mittlere Anzahl Ereignisse pro Jahr	0.9	0.9	0.6	0.8	0.3	0.4	0.2
10-Jährig (461 m³/s)							
Anzahl Ereignisse	5	2	1	2	0	2	0
Mittlere Anzahl Ereignisse pro Jahr	0.3	0.2	0.1	0.2	0.0	0.1	0.0

3.1.2 Habitatveränderung

Die Anzahl der Habitattypen veränderte sich über die gesamte Untersuchungsperiode nicht, aber bei der Grösse der Habitatflächen und somit auch bei der prozentualen Verteilung der Habitate traten Veränderungen auf. In der ersten Periode von 1943 bis 1952 stieg die Ausdehnungen der Wasserflächen und der Inseln von 17.7 % auf 25.4 %, respektive von 1.6 % auf 2.6 %, während die Flächen der offenen Sand- und Kiesbänke sowie der Sand- und Kiesbänke mit Pioniervegetation von 11.4 % auf 4.1 % und von 3.9 % auf 3.6 % sanken (Abbildung 6; Anhang IV). Die Wasserfläche erreichte somit 1952 ihre grösste Ausdehnung. In der Periode 1952 bis 1981 zeigten besonders die Waldhabitate offensichtliche Habitatveränderungen und dehnten ihren prozentualen Flächenanteil von 46.8 % auf 56.7 % aus. Im Gegensatz dazu sank die Flächenausdehnung der Inseln von 2.6 % auf 0.6 %. Bei den offenen- und den mit Pioniervegetation bewachsenen Sand- und Kiesbänken resultierte eine Abnahme von 4.1 % auf 2.9 % bzw. 3.6 % auf 1.9 %. Die anthropogenen Strukturen vergrösserten ihren Flächenanteil von rund 2.8 % auf 4.5 %, während Wies-, Weide- und Ackerland rund 2.2 % ihres Flächenanteils verloren (Abbildung 6; Anhang IV). Zwischen 1981 und 2013 verlor das Wies-, Weide- und Ackerland weitere 1.9 % seines Flächenanteils. Besonders drastisch war die Abnahme der offenen Sand- und Kiesflächen, welche von 2.9 % auf nur noch 0.3 % sanken. Im Gegensatz zu dieser Abnahme konnten sich die mit dichter Vegetation bewachsenen Inseln und die mit Pioniervegetation bewachsenen Sand- und Kiesbänke von 0.6 % auf 2.3 % bzw. 1.9 % auf 2.7 % ausdehnen.

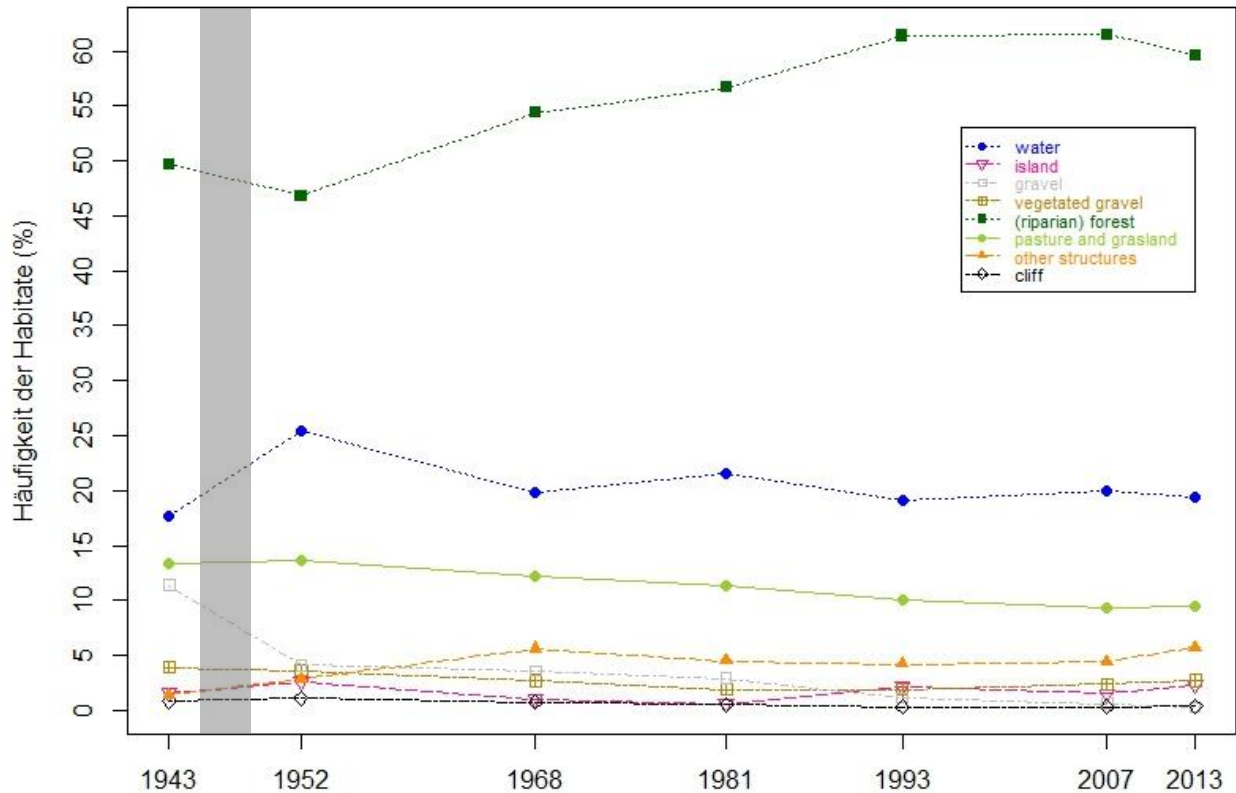


Abbildung 6: Prozentuale Veränderung der Häufigkeit der Habitate an der Sarine zwischen 1943 und 2013, der graue Balken symbolisiert die Bauzeit des Rossens Staudamms.

Über die gesamte Untersuchungsperiode nahm die relative Ausdehnung einiger Habitate (Flächenvergleich der Jahre 1943 und 2013) im Bereich zwischen 29 % (Wies-, Weide- und Ackerland) und 97 % (offene Sand- und Kiesflächen) drastisch ab. Während sich in derselben Zeitperiode die Inseln um 43 % und die anthropogenen Bauwerke um total 313 % ausdehnten (Abbildung 6 & 7; Anhang IV).

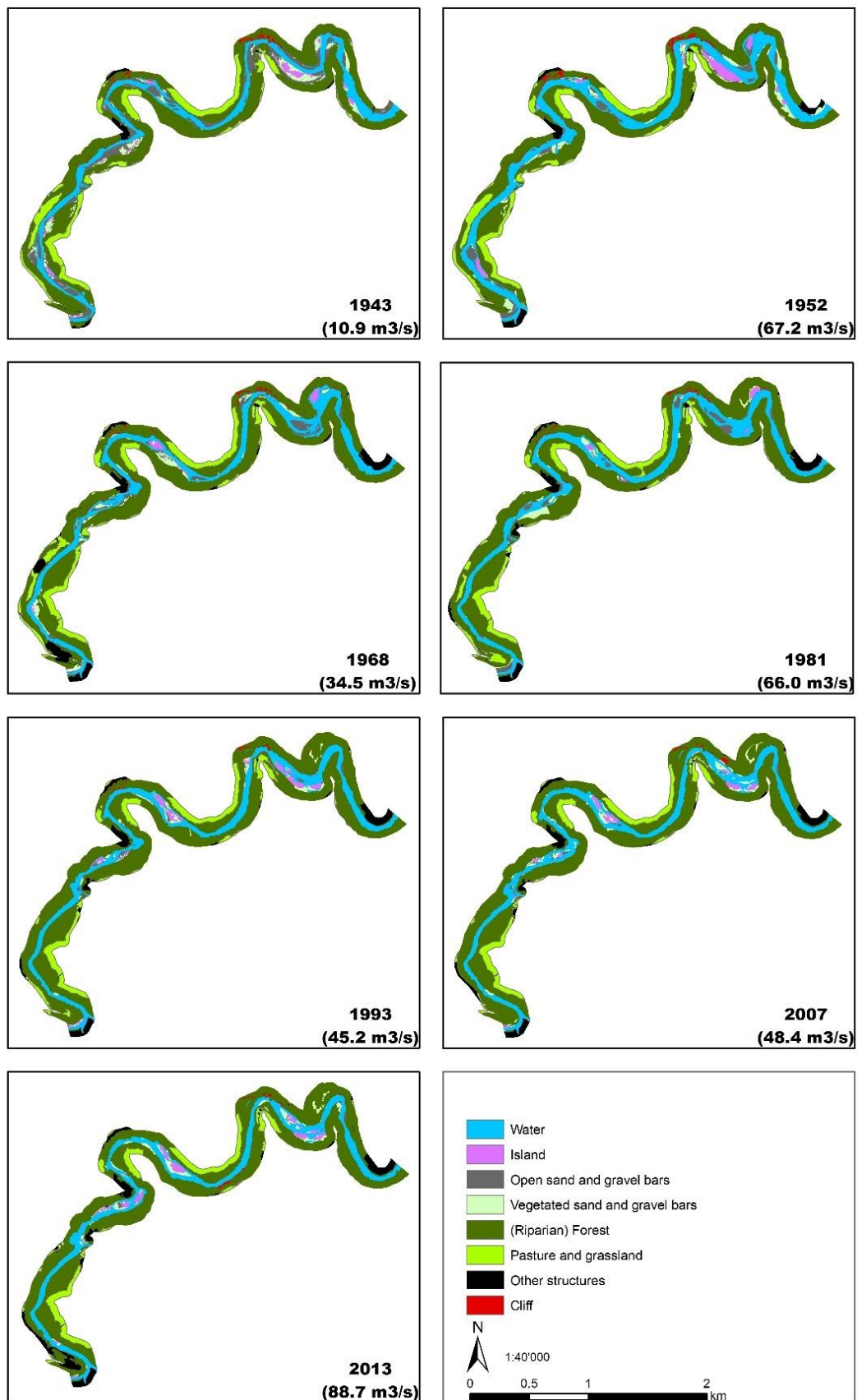


Abbildung 7: Habitatsklassifizierung im Untersuchungsperimeter der Aue «La Sarine: Rossens-Fribourg» in der Zeitperiode vor dem Staudammbau (1943) und nach der Regulierung (1952, 1968, 1981, 1993, 2007 und 2013). In Klammer die mittlere tägliche Abflussmenge zum Zeitpunkt der Luftbildaufnahmen.

3.1.3 Habitat Turnover

Die räumliche Verteilung der Habitate zwischen 1943 und 2013 veränderte sich wesentlich (Abbildung 9). Trotzdem blieb etwas mehr als die Hälfte (55.3 %) der gesamten Untersuchungsfläche über die gesamte Zeitperiode stabil und veränderte sich nicht (Anhang IV). Dabei handelt es sich vor allem um Habitate im äusseren Bereich des Untersuchungsperimeters. Etwa ein Drittel (30.3 %) der Untersuchungsfläche veränderte sich ein oder zwei Mal. Dabei handelt es sich mehrheitlich um Habitate im und am Uferbereich. Drei oder vier Mal verändert haben sich noch 12.6 % der Fläche und nur 1.9 % der Fläche wechselten den Habitattyp mehr als fünf Mal (Abbildung 9; Anhang IV). Die Flächen, welche sich mehr als drei Mal verändert haben, liegen zu einem grossen Teil entlang der Haupt- und Nebengerinne der Sarine. Die Lagen der Haupt- und Nebengerinne (digitalisierte Wasserfläche) haben sich über die 70-jährige Untersuchungsperiode ebenfalls sichtbar verändert (Abbildung 8).

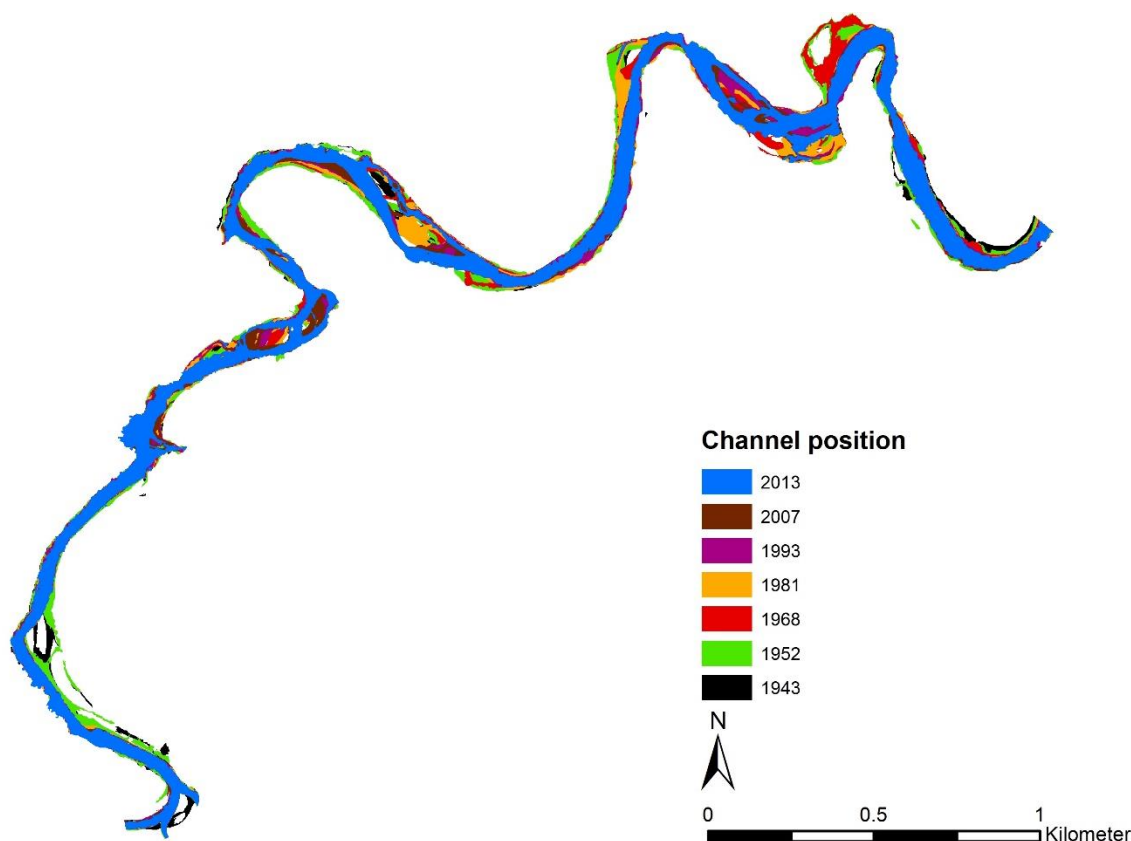


Abbildung 8: Lage des Haupt- und Nebengerinnes zu sieben verschiedenen Zeitpunkten während 1943 und 2013.

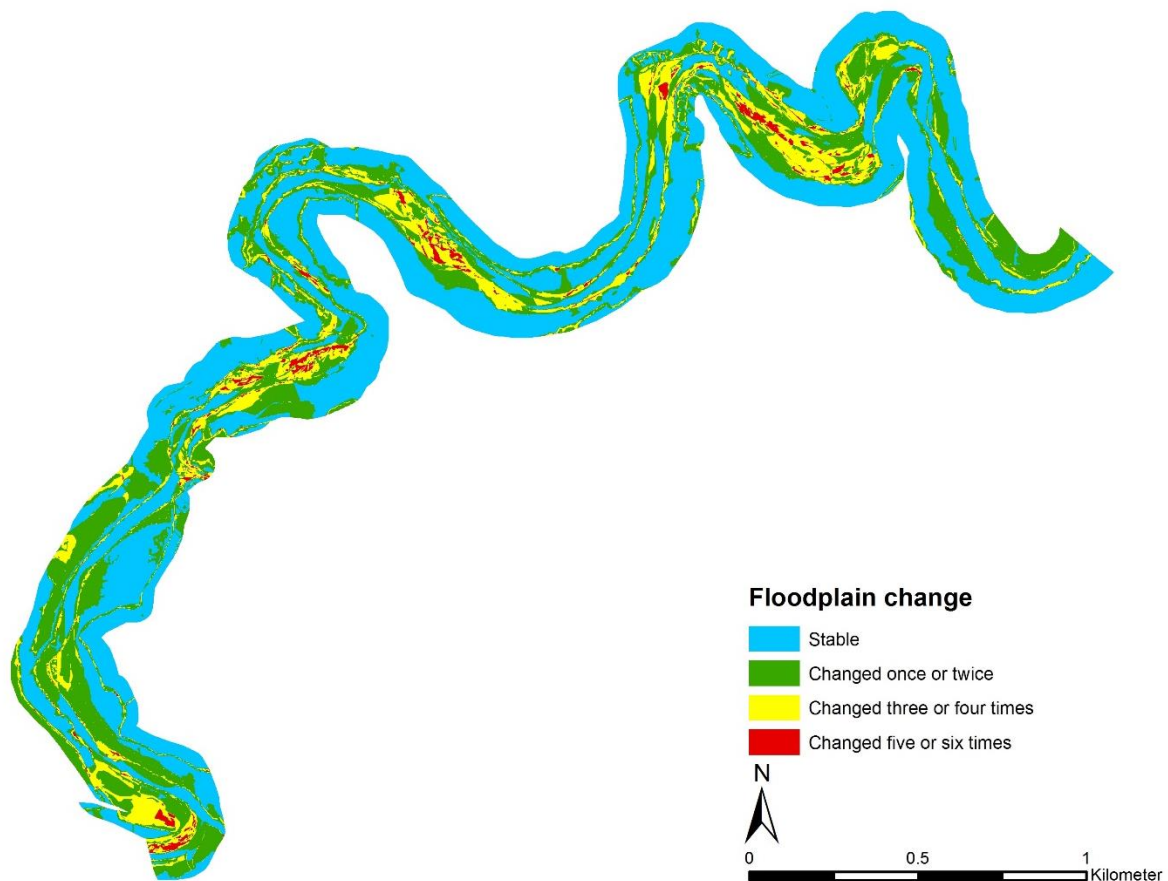


Abbildung 9: (B) Darstellung der Habitat Turnover Rate. Blaue Flächen veränderten sich nicht (z.B. wenn eine Fläche während der ganzen Zeitperiode immer eine Waldfläche blieb), während die grün, gelb und rot eingefärbten Flächen Veränderungen der Habitattypen (z.B. offene Sand- und Kiesfläche welche durch Pioniervegetation besiedelt wurde) aufzeigen.

In den Zeitperioden 1943 bis 1952 und 1952 bis 1968, welche die Verhältnisse vor- und nach dem Staudambau aufzeigen, betrug die Turnoverrate der Habitatflächen, welche sich verändert haben, jeweils rund 23 % am Anteil der gesamten Untersuchungsfläche (Tabelle 8). Ab 1968 zeigt sich eine kontinuierliche Abnahme der Turnoverrate, die in der Zeitperiode 2007 bis 2013 ihren vorläufigen Tiefpunkt erreichte. Nur noch 134'625 m² oder 8.5 % der Gesamtfläche veränderten in dieser Zeit den Habitattyp.

Tabelle 8 Turnoverrate (%), sowie Grösse der Flächen (m²) an der Sarine, welche zwischen den Untersuchungsperioden Veränderungen aufzeigten, oder stabil blieben.

Zeitperiode	1943 - 1952	1952 - 1968	1968 - 1981	1981 - 1993	1993 - 2007	2007 - 2013
Habitatfläche, stabil (m ²)	1'215'492.0	1'214'320.1	1'293'735.9	1'370'973.5	1'411'178.2	1'447'314.0
Habitatfläche, verändert (m ²)	366'447.5	367'619.5	288'203.6	210'966.1	170'761.3	134'625.5
Turnoverrate (%)	23.2	23.2	18.2	13.3	10.8	8.5

3.1.4 Uferlänge

Die Uferlänge in der Zeitperiode 1943 bis 2013 veränderte sich nur geringfügig (Tabelle 9). Im Jahr 1981 wurde die geringste Uferlänge (2.6 km pro Fluss-km) gemessen, danach stieg die Uferlänge wieder an und verzeichnete im Jahr 2013 die grösste Ausdehnung mit 3.1 km pro Fluss-km (Tabelle 9; Anhang IV).

Tabelle 9: Veränderung der Uferlänge (km pro Fluss-km) an der Sarine in der Untersuchungsperiode 1943 bis 2013.

Jahr	1943	1952	1968	1981	1993	2007	2013
Uferlänge (km pro Fluss-km)	3.0	3.0	3.1	2.6	2.7	2.9	3.1

3.1.5 Braid-channel ratio-Index und Sinuosity-Index

Der Braid-channel ratio-Index in der Zeitperiode 1943 bis 2013 veränderte sich nur geringfügig (Tabelle 10). Im Jahre 1968 sowie im Jahr 2013 verzeichnete die Sarine die tiefsten gemessenen Werte (1.2) der gesamten Periode. Vor dem Staudammbau sowie in den Jahren 1952 und 1993 wurden die höchsten Werte (1.4) verzeichnet. Der Sinuosity-Index blieb über die gesamte untersuchte Zeitperiode fast unverändert und schwankte zwischen 2.0 und 2.1 (Tabelle 10).

Tabelle 10: Veränderung des Braid-channel ratio-Index und des Sinuosity-Index an der Sarine in der Untersuchungsperiode 1943 bis 2013.

Jahr	1943	1952	1968	1981	1993	2007	2013
Braid-channel ratio-Index	1.4	1.4	1.2	1.3	1.4	1.3	1.2
Sinuosity-Index	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.1	2.1

3.1.6 Wasserspiegelbreitenvariabilität

Die mittlere Wasserspiegelbreite, gemessen vor dem Staudammbau im Jahr 1943, betrug 34.5 m. In den darauffolgenden Zeitperioden (1952 - 1968) veränderte sich diese nicht oder nur sehr geringfügig (Tabelle 11). Im Jahr 1981 erreichte die mittlere Wasserspiegelbreite ihre maximale Ausdehnung mit 40.6 m. In der Zeitperiode 1981 bis 2013 verzeichnete die mittlere Wasserspiegelbreite konstant abnehmende Werte und verringerte sich auf 35.2 m (Tabelle 11). Der Variationskoeffizient veränderte sich über die gesamte Zeitperiode betrachtet nur marginal (Tabelle 11).

Tabelle 11: Veränderung der Wasserspiegelbreitenvariabilität an der Sarine in der Untersuchungsperiode 1943 bis 2013.

Jahr	1943	1952	1968	1981	1993	2007	2013
Minimale Breite (m)	2.0	3.4	2.9	7.8	3.0	2.4	2.6
Maximale Breite (m)	91.3	127.1	93.1	109.0	95.9	68.6	87.2
Mittlere Breite (m)	34.5	34.5	34.4	40.6	38.2	35.6	35.2
Standardabweichung	16.4	20.9	16.5	16.9	16.4	14.3	14.7
Variationskoeffizient	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4

3.1.7 Shannon-Index und Evenness-Index

Die Abundanz der Lebensraumzusammensetzung (Shannon-Index) war für die gesamte Untersuchungsperiode in der Zeitperiode vor und kurz nach dem Staudammbau (1943 - 1952) am grössten (Tabelle 12). In den darauffolgenden Zeitperioden (1968 - 2007) nahmen die Werte des Shannon-Indexes kontinuierlich ab und zeigten erst im Jahr 2013 wieder einen leicht höheren Wert. Da die Verteilung der Habitatflächen (Evenness-Index) mit dem Shannon index korreliert, verzeichnet die Verteilung dieselben Ab- und Zunahmen gesehen über die gesamte Zeitperiode wie die Abundanz der Lebensraumzusammensetzung (Tabelle 12).

Tabelle 12: Veränderung des Shannon-Index und des Evenness-Index an der Sarine in der Untersuchungsperiode 1943 bis 2013.

Jahr	1943	1952	1968	1981	1993	2007	2013
Shannon-Index	1.46	1.47	1.37	1.27	1.20	1.18	1.24
Evenness-Index	0.70	0.71	0.66	0.61	0.58	0.57	0.60

3.1.8 Breite und Fläche der aktiven Aue

Von 1943 bis im Jahr 1952, vier Jahre nach dem Staudammbau, verzeichnete die Auenfläche die grösste Ausdehnung und erreichte 85.2 - 87.8 % der maximal aktiven Auenfläche (Tabelle 13). Danach nahm die aktive Auenfläche relativ konstant ab und erreichte zwischen 1968 und 1981 66.3 % und zwischen 1993 und 2013 59.2 - 60.8 % der maximal aktiven Auenfläche. Die Werte der mittleren Breite korrelieren mit den für die Auenfläche beschriebenen Veränderungen (Tabelle 13).

Tabelle 13: Breite und Fläche der aktiven Aue «La Sarine: Rossens-Fribourg» in der Untersuchungsperiode 1943 bis 2013.

Jahr	1943	1952	1968	1981	1993	2007	2013
Aktive Auenfläche (m ²)	548'757	565'565	427'149	427'312	381'619	386'421	391'907
Minimale Breite (m)	22.8	32.7	17.5	28.6	20.1	16.8	15.0
Maximale Breite (m)	181.9	180.0	176.8	160.4	152.5	147.9	151.5
Mittlere Breite (m)	81.1	84.1	62.9	62.6	56.0	56.8	57.1
Standardabweichung	31.7	32.9	30.3	28.7	26.6	28.8	27.2
Maximal aktive Auenfläche (m ²)	644'383						

3.2 Sense

3.2.1 Abflussdaten

Beurteilt über die gesamte Messperiode verzeichnete die Sarine einen mittleren täglichen Minimalabfluss von $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ und am 22. August 2005 einen mittleren täglichen Maximalabfluss von $147.2 \text{ m}^3/\text{s}$ (Anhang V). Der bisher höchste Maximalabfluss der Messperiode wurde am 29. Juli 1990 mit einem Abfluss von $489.2 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht (Abbildung 10), dies entspricht einem HQ100 und wurde während der gesamten Messperiode nur einmal erreicht. Der mittlere jährliche Hochwasserabfluss (MHQ) und der Hochwasserschwellenwert (Q^*) für die Zeitperiode (1928 - 2016) liegen bei $71.1 \text{ m}^3/\text{s}$ respektive $42.7 \text{ m}^3/\text{s}$.

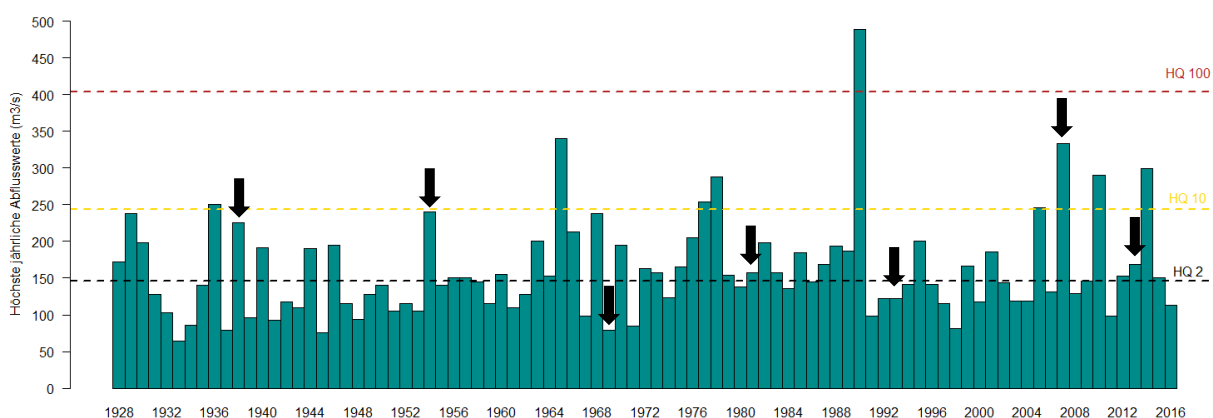


Abbildung 10: Abflussganglinie der höchsten jährlichen Abflüsse an der Station Thörishaus, Sensematt, für die Periode 1.1.1928 bis 31.12.2016. Schwarz, Gelb und Rot eingezeichnet sind die Hochwasserabflüsse der Jährlichkeiten 2 ($146 \text{ m}^3/\text{s}$), 10 ($244 \text{ m}^3/\text{s}$) und 100 ($404 \text{ m}^3/\text{s}$). Die schwarzen Pfeile symbolisieren die Jahre der Luftbildaufnahmen.

Über die Messperiode variierten die HQ2 Ereignisse zwischen einem Minimum von 0.3 Ereignissen pro Jahr (1939 - 1954) und einem Maximum von 0.7 Ereignissen pro Jahr (1970 - 1981 und 2008 - 2013). Die HQ10 Ereignisse variierten nur gering, zwischen einem Minimum von 0 Ereignissen pro Jahr (1939 - 1954) und einem Maximum von 0.2 Ereignissen pro Jahr (1970 - 1981 und 2008 - 2013). Zwischen 1928 und 1954 variierte die Anzahl bettbildender Ereignisse ($\geq \text{HQ}2$) nur sehr gering. Zwischen 1955 und 1993 erhöhte sich die Anzahl der Ereignisse mit 2-jähriger Wiederkehrperiode, es wurden insgesamt 24 Ereignisse aufgezeichnet. In der Messperiode 1994 bis 2013 wurden noch insgesamt 11 Ereignisse ($\geq \text{HQ}2$) gemessen. Die Anzahl an gerinnebildenden Ereignissen ($\geq \text{HQ}10$) betrug für die Periode 1928 bis 1969 zwei und für die Periode 1970 bis 2013 sieben. In der Periode 1939 - 1954 wurde kein HQ10 Ereignis verzeichnet (Tabelle 14; Abbildung 9).

Tabelle 14: Übersichtstabelle zu den Ereignissen der Stufe HQ2 und HQ10 an der Sense während der Zeitperiode 1928 – 2013.

Wiederkehrperiode	Zeitperiode						
	1928 - 1938	1939 - 1954	1955 - 1969	1970 - 1981	1982 - 1993	1994 - 2007	2008 - 2013
2-Jährig (146 m3/s)							
Anzahl Ereignisse	5	4	8	9	7	5	6
Mittlere Anzahl Ereignisse pro Jahr	0.5	0.3	0.5	0.7	0.6	0.4	0.7
10-Jährig (244 m3/s)							
Anzahl Ereignisse	1	0	1	2	1	2	2
Mittlere Anzahl Ereignisse pro Jahr	0.1	0.0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2

3.2.2 Habitatveränderung

Die Anzahl der Habitattypen veränderte sich über die gesamte Untersuchungsperiode nicht, aber bei der Grösse der Habitatflächen und somit auch bei der prozentualen Verteilung der Habitate traten Veränderungen auf. In der ersten Periode von 1938 bis 1954 stieg die Ausdehnung der mit Pioniervegetation bewachsenen Sand- und Kiesbänke und der Waldhabitate von 5.5 % auf 12.3 %, respektive von 31.1 % auf 40.6 %, während die Flächen der offenen Sand- und Kiesflächen sowie der Inseln mit dichter Vegetation von 27.9 % auf 15.5 % und von 5.3 % auf 3.3 % sanken (Abbildung 10). Die restlichen Habitattypen blieben in dieser Periode mehr oder weniger gleich gross. In der Periode 1954 bis 1981 verzeichneten die offenen Sand- und Kiesbänke und die Waldhabitate die grössten flächenmässigen Zunahmen (Abbildung 11). Ihre prozentuale Verteilung stieg von 15.5 % auf 19.7 % bzw. von 40.6 % auf 43.8 %. Die mit Vegetation bewachsenen Sand- und Kiesflächen und das Gras- und Weideland verzeichneten die grössten Rückgänge und sanken von 12.3 % auf 7.8 % und von 19.1 % auf 17.3 %. Die anthropogenen Einflüsse durch Bauwerke steigen um 0.3 % und verzeichneten einen Anteil von 0.8 % an der gesamten Auenfläche. In der Periode 1981 bis 2013 verzeichneten die mit Vegetation bewachsenen Sand- und Kiesflächen eine prozentuale Flächenzunahme von 7.8 % auf 14.5 %, während die offenen Sand- und Kiesflächen drastisch an Fläche verloren und im Jahr 2013 nur noch 12.9 % der Auenfläche ausmachten (Abbildung 10). Die Waldhabitate und die anthropogenen Strukturen verzeichneten leichte Zunahmen von 43.8 % auf 45.7 % bzw. von 0.8 % auf 1.4 %, wodurch beim Gras- und Weideland eine Abnahme von 17.3 % auf 15.2 %

resultierte. Die restlichen Habitate (Wasser, Inseln und Felsen) blieben in ihren Flächenanteilen mehr oder weniger unverändert (Abbildung 11; Anhang V).

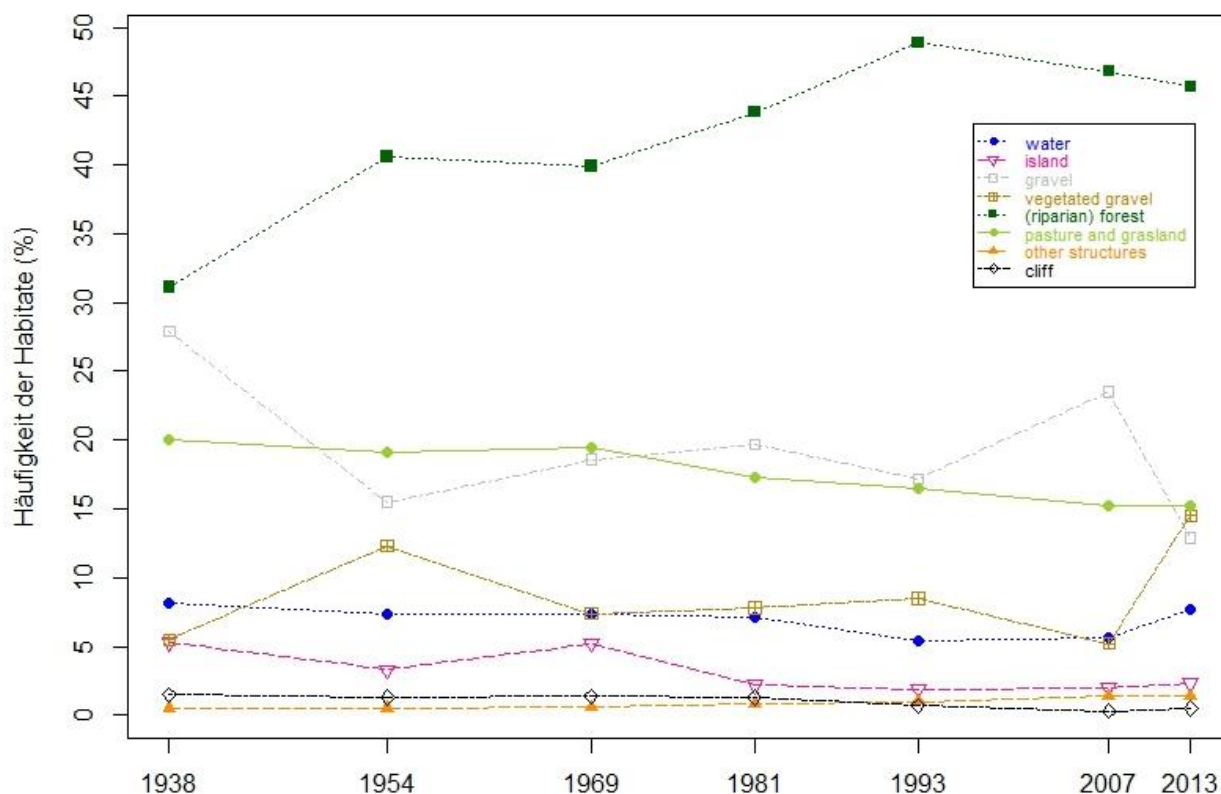


Abbildung 11: Prozentuale Veränderung der Häufigkeit der Habitate an der Sense zwischen 1938 und 2013.

Über die gesamte Untersuchungsperiode (1938 - 2013) nahmen die relativen Ausdehnungen der Wasserflächen (-5.4 %), Inseln (-57.4%), offenen Sand- und Kiesflächen (-53.9 %), Weide- und Graslandflächen (-24 %) und Felsflächen (-70.8 %) ab, während sich die bewachsenen Sand- und Kiesflächen (+163.3 %), die Waldflächen (+46.8 %) und die anthropogenen Bauwerke (+173.4 %) ausdehnten. Die relative Habitatveränderung der bewachsenen- und unbewachsenen Kiesbänke zeigt über die gesamte Untersuchungsperiode betrachtet einen entgegengesetzten Trend auf. Die Flächenanteile beider Habitate zusammengezählt erreichten im Jahr 1938 einen Anteil von 33.4 % an der gesamten Untersuchungsfläche und damit ihre grösste Ausdehnung. In den Jahren 1954 bis 2013 nahm der Anteil ab und schwankte zwischen 25 und 28 % (Abbildung 11; Anhang V)

Abbildung 12 zeigt die prozentualen Veränderungen aus der Abbildung 11 optisch dargestellt auf. Besonders auffallend ist die Zunahme der bewachsenen Sand- und Kiesflächen, welche im Jahr 2013 ihre grösste Ausdehnung erreichten. Ebenfalls auffällig ist, dass die Felsflächen im Laufe der Zeitperiode optisch verschwinden und von Waldflächen besiedelt werden. Bereits erkennbar ist, dass sich die Fliesswege der Haupt- und Nebengerinne im Laufe der Zeit verändert haben (Abbildung 13A).

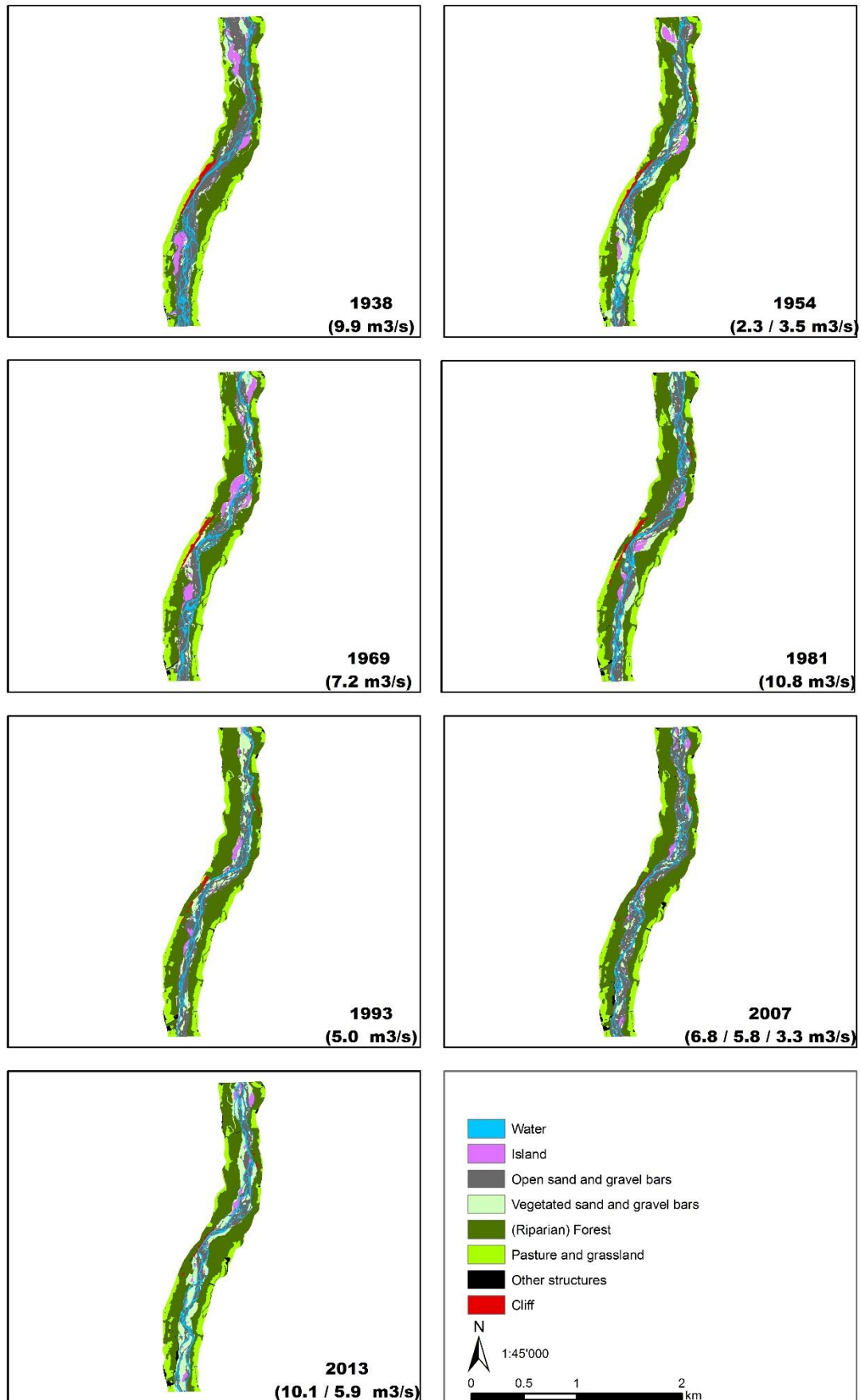


Abbildung 12: Habitatsklassifizierung im Untersuchungsperimeter der «Senseaeue» für die Jahre 1938, 1954, 1969, 1981, 1993, 2007 und 2013. In Klammer die tägliche Abflussmenge zum Zeitpunkt der Luftbildaufnahmen.

3.2.3 Habitat Turnover

Nicht nur die Nebengerinne, sondern auch die Hauptgerinne haben sich in der Untersuchungsperiode mehrmals verändert (Abbildung 13A). Die räumliche Veränderung der Habitate zeigt, dass ca. ein Drittel der Fläche (32.8 %) in der Zeitperiode 1938 bis 2013 stabil blieb und sich nicht veränderte (Abbildung 13B; Anhang V). Rund 27.6 % der Flächen veränderten sich ein oder zwei Mal. Drei oder vier Mal geändert haben sich im Laufe der Periode etwa 28.0 % der Flächen. Rund 11.6 % der Habitatflächen veränderten sich mehr als fünf Mal. Deutlich zu sehen ist, dass sich die Flächen, welche sich mehr als drei Mal geändert haben, meist entlang der verschiedenen Fliesswege der Sense, im aktivsten Teil der Aue, liegen (Abbildung 13A & 13B).

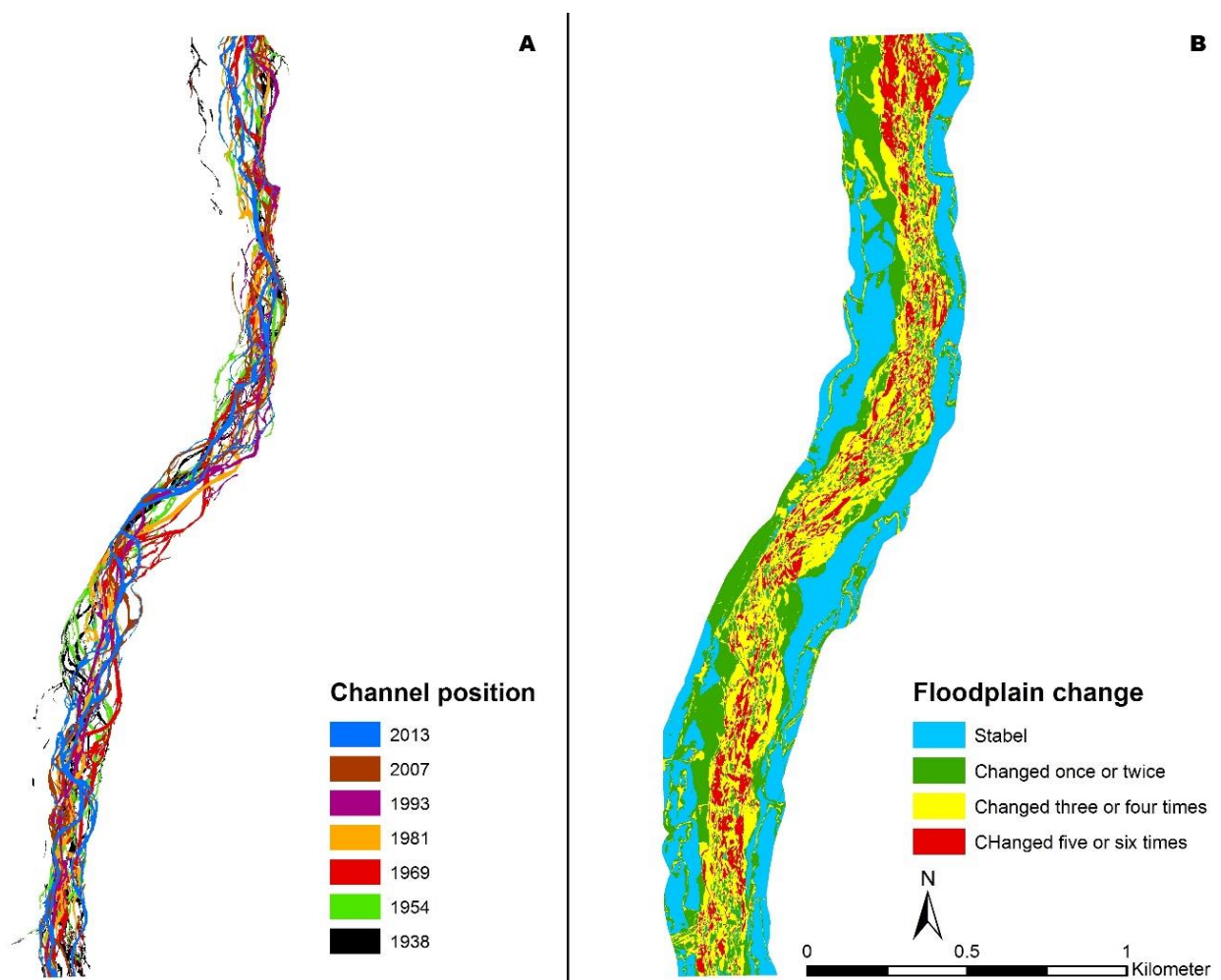


Abbildung 13: (A) Lage der Haupt- und Nebengerinne zu sieben verschiedenen Zeitpunkten während 1938 und 2013. (B) Darstellung der Habitat Turnover Rate. Blaue Flächen veränderten sich nicht (z.B. wenn eine Fläche während der ganzen Untersuchungsperiode immer eine Waldfläche blieb), während die grün, gelb und rot eingefärbten Flächen Veränderungen der Habitattypen (z.B. offene Sand- und Kiesfläche welche durch Pioniervegetation besiedelt wurde) aufzeigen.

Die Habitatturnoverraten der verschiedenen Zeitperioden zeigen, dass der Anteil der Habitate, welche sich jeweils zwischen den Zeitperioden verändert haben, weder kontinuierlich ab- noch zunahm (Tabelle 15). In der Zeitperiode 1954 bis 1969 verzeichnete die Sense die höchste Habitatturnoverrate der Untersuchungsperiode. Rund 61 % der Flächen zeigten eine Habitatveränderung auf, während in der letzten Zeitperiode (2007 - 2013) nur noch 487'664 m² oder rund 43 % der Flächen eine Habitatveränderung aufzeigten (Tabelle 15).

Tabelle 15: Turnoverrate (%), sowie Grösse der Flächen (m²) an der Sense, welche zwischen den Untersuchungsperioden Veränderungen aufzeigten, oder stabil blieben.

Zeitperiode	1938 -1954	1954 - 1969	1969 - 1981	1981 - 1993	1993 -2007	2007 -2013
Habitatfläche, stabil (m ²)	628'360.8	439'888.6	568'040.4	524'569.3	450'282.8	636'005.0
Habitatfläche, verändert (m ²)	495'307.8	683'780.0	555'628.2	599'099.3	673'385.7	487'663.5
Turnoverrate (%)	44.1	60.9	49.4	53.3	59.9	43.4

3.2.4 Uferlänge

Die Uferlänge in der Untersuchungsperiode 1938 bis 2013 veränderte sich teilweise wesentlich (Tabelle 16). Im Jahr 1938 verzeichnete die Sense mit 10.7 km pro Fluss-km die mit Abstand grösste Uferlänge. Bis zum Jahr 1993 nahm diese trotz mehr oder weniger gleichbleibenden Längen des Hauptkanals ab und betrug 5.2 km pro Fluss-km (Anhang V). Zwischen 1993 und 2013 nahm die Uferlänge wieder zu und erreichte im Jahr 2013 einen Wert von 7.6 km pro Fluss-km (Tabelle 16).

Tabelle 16: Veränderung der Uferlänge (km pro Fluss-km) an der Sense in der Untersuchungsperiode 1938 bis 2013.

Jahr	1938	1954	1969	1981	1993	2007	2013
Uferlänge (km pro Fluss-km)	10.7	8.3	6.5	5.6	5.2	5.9	7.6

3.2.5 Braid-channel ratio-Index und Sinuosity-Index

Der Braid-channel ratio-Index war im Jahr 1938 mit einem Wert von 5.0 am höchsten (Tabelle 17). In der Zeitperiode 1938 bis 1993 nahm der Wert um fast 50 % ab und befand sich 1993 bei 2.7, dem tiefsten Wert der gesamten Untersuchungsperiode. Ab 2007 zeigte der Braid-channel ratio-Index einen ansteigenden Wert und war bis zum Ende der Untersuchungsperiode (2013) bei einem Wert von 4.0 (Tabelle 17).

Der Sinuosity-Index blieb über die gesamte Untersuchungsperiode fast unverändert und schwankte zwischen 1.1 und 1.2 (Tabelle 17).

Tabelle 17: Veränderung des Braid-channel ratio-Index und des Sinuosity-Index an der Sense in der Untersuchungsperiode 1938 bis 2013.

Jahr	1938	1954	1969	1981	1993	2007	2013
Braid-channel ratio-Index	5.0	4.4	3.3	3.1	2.7	2.8	4.0
Sinuosity-Index	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1

3.2.6 Wasserspiegelbreitenvariabilität

Die mittlere Wasserspiegelbreite für die Zeitperiode 1938 bis 1954 betrug an der Sense rund 5.4 m. In den Jahren 1969 und 1981 verbreiterte sich die mittlere Wasserspiegelbreite auf 7.5 bzw. 8.0 m und erreichte damit im Jahr 1981 den grössten gemessenen Wert der Untersuchungsperiode (Tabelle 18). Im Jahr 1993 ergab sich eine mittlere Wasserspiegelbreite von 6.9 m, welche sich nur noch geringfügig veränderte bis zum Jahr 2013 (Tabelle 18). Die grösste maximale Wasserspiegelbreite hingegen wurde im Jahr 1938 gemessen. Der Variationskoeffizient veränderte sich nur geringfügig und schwankte zwischen 0.6 und 0.9 (Tabelle 18).

Tabelle 18: Veränderung der Wasserspiegelbreitenvariabilität an der Sarine in der Untersuchungsperiode 1938 bis 2013.

Jahr	1938	1954	1969	1981	1993	2007	2013
Minimale Breite (m)	0.4	0.7	0.4	0.9	0.8	1.3	0.5
Maximale Breite (m)	44.3	24.6	37.5	31.3	22.3	22.8	23.1
Mittlere Breite (m)	5.4	5.4	7.5	8.0	6.9	6.4	6.6
Standardabweichung	4.7	4.0	5.1	4.6	4.1	3.6	4.4
Variationskoeffizient	0.9	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.7

3.2.7 Shannon-Index und Evenness-Index

Die Anzahl der Lebensräume und deren Abundanz (Shannon-Index) veränderte sich in der Zeitperiode 1938 bis 1969 nur marginal (Tabelle 19). In den Jahren 1993 bis 2007 waren die Shannon-Index Werte am tiefsten und stiegen bis zum Jahr 2013 wieder auf 1.55 an und erreichten dadurch den selben Wert wie im Jahr 1981. Da die Verteilung der Habitatflächen (Evenness-Index) mit dem Shannon-Index korreliert, verzeichnet die Verteilung dieselben Ab- und Zunahmen gesehen über die gesamte Zeitperiode wie die Abundanz der Lebensraumzusammensetzung (Tabelle 19).

Tabelle 19: Veränderung des Shannon-Index und des Evenness-Index an der Sense für die Untersuchungsperiode 1938 bis 2013.

Jahr	1938	1954	1969	1981	1993	2007	2013
Shannon-Index	1.65	1.62	1.63	1.55	1.47	1.45	1.55
Evenness-Index	0.79	0.78	0.78	0.75	0.71	0.70	0.75

3.2.8 Breite und Fläche der aktiven Aue

Im Jahr 1938 verzeichnete die Auenfläche die grösste Ausdehnung mit 526'125 m² und erreichte damit 82.7 % der maximal aktiven Auenfläche (Tabelle 20). In der Zeitperiode 1954 bis 1981 sowie 2007 bis 2013 blieb die Grösse der Auenfläche fast konstant gleich und schwankte zwischen 64.1 - 68.3 % der maximal aktiven Auenfläche. 1993 wurde mit einem Anteil von 58.4 % an der maximal aktiven Auenfläche die kleinste Auenflächenausdehnung verzeichnet. Die Werte der maximalen und mittleren Breiten der aktiven Aue korrelieren mit den für die aktive Auenfläche beschriebenen Veränderungen (Tabelle 20).

Tabelle 20: Breite und Fläche der aktiven «Senseaue» in der Untersuchungsperiode 1938 bis 2013.

Jahr	1938	1954	1969	1981	1993	2007	2013
Aktive Auenfläche (m ²)	526'125	433'486	434'121	414'232	371'231	407'908	418'795
Minimale Breite (m)	71.6	65.8	70.6	65.4	74.7	64.1	63.2
Maximale Breite (m)	326.5	232.4	242.1	198.7	172.6	195.7	215.5
Mittlere Breite (m)	157.9	128.5	133.5	130.7	117.7	129.8	131.7
Standardabweichung	50.9	31.8	32.0	26.1	21.3	27.5	31.9
Maximal aktive Auenfläche (m ²)	635'936						

4 Diskussion

4.1 Luftbilder

Fernerkundung mittels Satelliten, Flugzeugen oder Drohnen bietet eine Methode zur quantitativen Bewertung von lateralen und longitudinalen Landschaftselementen und ist damit eine Alternative zu den klassischen, aufwendigen Feldaufnahmen in grösseren Flusssystemen (Johnson & Gage, 1997; Bryant & Gilvear, 1999; Fausch et al., 2002). Die Luftbildaufnahme an der Sarine für das Jahr 1952 fand bereits im Frühling, anfangs April statt, alle anderen Aufnahmen der Sarine und der Sense wurden im Sommer oder Herbst (Juni - September) aufgenommen. Der Aufnahmezeitpunkt hat einen Einfluss auf das Vegetationsstadium und damit indirekt auch auf den Schattenwurf, welcher durch die Vegetation verursacht werden kann. Die auf den Aufnahmen teilweise stark ausgedehnten Schattenwürfe werden ausserdem durch die meteorologischen Bedingungen wie Höhe und Einstrahlungswinkel der Sonne sowie durch den Flugwinkel und die Flughöhe beeinflusst. Schattenwürfe und überhängende Vegetation können damit eine genaue Erfassung der verschiedenen Habitate erschweren. Diese Probleme könnten etwas entschärft werden, wenn die Aufnahmen ausserhalb der Vegetationsperiode stattfinden und durch den Einsatz von zusätzlichen Sensoren wie z.B. thermisches Infrarot, welches eine verbesserte Unterscheidung der Wasserhabitate ermöglicht (Smikrud et al., 2008), erweitert werden. Um Verfälschungen in Habitatsklassifizierung zu reduzieren, könnten Schattenbereiche mit einer im GIS erstellten Maske von allen Luftbildern entfernt werden (Garófano-Gómez et al., 2013).

Für die quantitative Erfassung der Habitatveränderungen in der 70 bis 75-jährigen Untersuchungsperiode war es notwendig, alle Luftbilder die vor den 80er Jahren aufgenommen wurden, zu orthorektifizieren. Nach dieser z.T. aufwendigen Aufbereitung wurden die Habitate in den gesamten Untersuchungsperimetern manuell digitalisiert. Manuelle Digitalisierungen wurden bereits in früheren Studien verwendet um Habitatsklassifizierungen durchzuführen (Whited et al., 2007; Doering et al., 2012; Garófano-Gómez et al., 2013). Nebst der Auflösung der Luftbilder (Pixelgrösse; Smikrud et al., 2008) ist das limitierende Element für die Genauigkeit einer manuellen Digitalisierung die visuelle Betrachtung und die Genauigkeit der Person, welche die Habitate digitalisiert. Deshalb wurden in dieser Arbeit die Digitalisierungen durch Dr. Diego Tonolla gegenkontrolliert und dadurch die Genauigkeit erhöht. Um die Vergleichbarkeit von Luftbildern mit verschiedenen Farbinformationen (panchromatisch vs. RGB) und unterschiedlichen Auflösungen zu verbessern, wäre eine Umwandlung der RGB-Bilder in schwarz-Weiss und eine Vereinheitlichung der Pixelgrösse vor der Habitatsklassifizierung eine weitere Möglichkeit gewesen (Garófano-Gómez et al., 2013).

Auch wenn in dieser Bachelorarbeit nicht alle bereits verwendeten Möglichkeiten ausgeschöpft wurden und dadurch verschieden mögliche «Fehler» entstanden sind, welche nicht berücksichtigt wurden, werden diese vermutlich keinen, oder nur einen geringen Einfluss auf die aufgezeigten Veränderungen der Untersuchungsperioden haben.

4.2 Abflussdaten

Das Abflussregime der Sarine wird seit dem Bau des Rossens Staudamms 1948 deutlich durch die Wasserkraft beeinflusst, weshalb die mittleren täglichen Abflussmengen an den Daten der Luftbildaufnahmen stark schwankten und sich im Bereich von 10.9 m³/s (1943) bis 88.7 m³/s (2013) bewegten. Durch die starken Abflussschwankungen kann die Ausdehnung der Habitate (Wasser, bewachsene und unbewachsene Sand-, Kies- und Schotterfläche) besonders stark beeinflusst werden, da diese in Abhängigkeit vom Pegelstand auf den Luftbildern sichtbar oder mit Wasser bedeckt sind. Dadurch kann die Genauigkeit der Habitatsklassifizierung der verschiedenen Jahrgänge beeinflusst werden. Im Gegensatz zum Abflussregime der Sarine ist das der Sense über die Untersuchungsperiode weitgehend natürlich geblieben, weshalb nur geringere Abflussschwankungen zum Zeitpunkt der Luftbildaufnahmen im Bereich zwischen 2.3 m³/s (1954) und 10.8 m³/s (1981) auftraten (Tabelle 5).

4.3 Ökomorphologische Indikatoren

Obwohl die Aue «La Sarine: Rossens-Fribourg» seit 1992 im Bundesinventar der Auengebiete von nationaler Bedeutung ist, wird sie seit Beginn des 20. Jahrhunderts durch anthropogene Bauten zur Erzeugung der Wasserkraft beeinflusst. Seit 1948 wurden nebst dem Staudammbau weitere anthropogene Bauten innerhalb des Untersuchungsperimeters erbaut (z.B. Kläranlagen, Kieswerke, Strassen, etc.). Diese Bauten wurden grösstenteils auf Wies-, Weide- und Ackerflächen aber auch auf Waldflächen und sogar in der aktiven Aue erbaut und wiesen 2013 eine um 313 % grössere Fläche auf als noch 1943. Am stärksten negativ beeinflusst durch den Staudammbau wurden die offenen, unbewachsene Sand-, Kies- und Schotterflächen, welche zu Beginn der Untersuchungsperiode (1943) 11.4 % der gesamten Untersuchungsfläche ausmachten, direkt nach dem Staudammbau stark abnahmen (4.1 % im Jahr 1952) und danach kontinuierlich an Fläche verloren und im Jahr 2013 nur noch 0.3 % der Gesamtfläche ausmachten. Die mit Pioniervegetation bewachsenen Sand-, Kies- und Schotterflächen verloren nach dem Staudammbau kontinuierlich an Fläche bis zum Jahr 1981, danach zeigte sich wieder eine leichte Erhöhung dieser Habitatflächen. Die deutliche Flächenabnahme der unbewachsenen Sand-, Kies- und Schotterflächen dürfte auf den durch den Staudamm gestörten Geschiebehauhalt und auf den Rückhalt von Geschiebe im Staubereich des Staudamms (Vörösmarty et al., 2003) und auf die ausbleibende Erosion von bewachsenen Kiesflächen zurück

zu führen sein. Die starke Abnahme der bettbildenden (\geq HQ2) und gerinnebildenden Abflüsse (\geq HQ10) direkt nach dem Staudammbau (von 15 HQ2 und 5 HQ10 zu 8 - 10 HQ2 und 1 - 2 HQ10) und die weitere Abnahme nach 1981 (0 - 5 HQ2 und 0 - 2 HQ10), aufgrund welcher der Abtrag und die Neubildung von Kiesflächen und -bänken (\geq HQ2) und die periodische Zerstörung der Auenwälder und anderen Vegetationsflächen (\geq HQ10) abgenommen haben, ist ebenfalls auf den Staudammbau zurückzuführen. Eine ähnliche Tendenz zeigen auch die Untersuchungen von Garófano-Gómez et al. (2013), welche die Auswirkungen der anthropogenen Einflüsse am Mijares (Fluss im Osten Spaniens) untersucht haben und aufgrund der fehlenden Dynamik des Abflussregimes ebenfalls eine Abnahme der offenen Sandflächen feststellten. Die Sandflächen wurden während einer Untersuchungsperiode von 60 Jahren durch Kräuter und Pioniervegetation besiedelt und bildeten schliesslich dichte und ausgewachsene Waldflächen aus. An der Sarine scheinen heutzutage sogar sehr grosse Hochwasserereignisse wie die aus den Jahren 2005 ($750 \text{ m}^3/\text{s} \triangleq$ HQ100) und 2007 ($605 \text{ m}^3/\text{s} \triangleq$ HQ30) nicht mehr in der Lage zu sein, die etablierte Vegetation zu roden und neue Kiesflächen durch Erosion und Deposition zu bilden.

Obwohl die Senseaue teilweise während der Untersuchungsperiode im- und oberhalb des Untersuchungsgebietes flussmorphologisch verbaut wurde, kann sie als naturnahe Auenlandschaft mit dynamischen aquatischen und terrestrischen Habitaten angesehen werden. Im Gegensatz zur Sarine ist an der Sense der Anteil der Wasserfläche zur gesamten Auenfläche deutlich geringer und die prozentualen Anteile der auentypischen Habitats im Verhältnis zur Auenfläche ausgeglichener. Über die gesamte Untersuchungsperiode konnte kein klarer Zu- oder Abnahmetrend der unbewachsenen und bewachsenen Sand-, Kies- und Schotterflächen festgestellt werden, die Anteile variieren von Jahr zu Jahr. Auffallend ist, dass die offenen und die bewachsenen Kiesbänke einen entgegengesetzten Trend zeigen, dies obwohl ihre totalen Anteile über die gesamte Untersuchungsperiode betrachtet, relativ konstant bleiben. Wenn beispielsweise die offenen Kiesbänke stark abnehmen, nehmen die bewachsenen Kiesbänke stark zu. Diese Tendenz weicht etwas vom «shifting habitat steady state concept» ab, welches besagt, dass in natürlichen Auen nicht nur die Anzahl der Habitattypen sondern auch das Verhältnis der Habitatflächen zur gesamten Auenfläche über mehrere ökologische Perioden relativ konstant bleibt (Bormann & Likens, 1979; Ward et al., 2002; Hohensimmer et al., 2005). Diese Abweichung kann aber teilweise durch die erhobenen Abflussdaten erklärt werden. In den Perioden, in welchen die Anzahl an bettbildenden (\geq HQ2) und gerinnebildenden Abflüssen (\geq HQ10) zunahm, nahm auch der Anteil an unbewachsenen Kiesbänken tendenziell zu und der Anteil an bewachsenen Kiesbänken ab. Nur in der Periode 1993 - 2007 nahm die Anzahl HQ2 Ereignisse ab aber der Anteil an unbewachsenen Kiesbänken stark zu. Diese Veränderung ist vermutlich auf die etwas verzögert aufgetretenen Auswirkungen des Jahrhunderthochwassers aus dem Jahre 1990 ($489.2 \text{ m}^3/\text{s}$) zurückzuführen.

Der Vergleich der Habitat Turnoverraten der Sarine und der Sense zeigt deutlich, dass sich die Verteilung der Habitattypen im Zeitraum 1938 bzw. 1943 bis 2013 verändert hat. Ebenfalls deutlich zeigt sich, dass der Bau des Staudamms negative Auswirkungen auf die zeitliche und räumliche Veränderung der Habitate hatte. Während sich bei der Sense 8.8 % aller Habitatflächen fünf Mal verändert haben, waren es an der Sarine nur noch deren 1.6%. Keine Veränderung über die gesamte Untersuchungsperiode verzeichneten an der Sense über die Hälfte aller Habitatflächen (55.3%), an der Sarine nur ein Drittel (32.8 %). An der Sarine blieb die Turnoverrate bis zum Jahr 1969 konstant (23.2 %), nahm danach aber kontinuierlich ab (8.5 % im Jahr 2013). Die deutliche Abnahme der Habitat Turnoverrate und der grosse Anteil an stabilen Flächen ohne Veränderung ist höchstwahrscheinlich eine Folge der reduzierten Abfluss- und Geschiebedynamik nach dem Bau des Staudamms. Ebenfalls durch Wasserkraft beeinflusst ist die Urbach Aue (Kt. BE), bei welcher eine ähnliche Abnahme der Turnoverraten festgestellt wurde und sich rund 48 % aller Habitatflächen einmal und rund 5 % aller Habitatflächen fünf Mal verändert haben (Doering et al., 2012). An der Sense ist kein klarer Trend ersichtlich, die Turnoverraten schwankten zwischen den Aufnahmeperioden im Bereich von 43.4 % und 60.9 % und zeigten ähnliche Zu- und Abnahmen wie die prozentualen Flächenanteile der unbewachsenen Kiesbänke.

Die Uferlänge als Indikator, welcher die Komplexität eines Flussabschnittes und dessen laterale Vernetzung aufzeigt, unterscheidet sich deutlich zwischen der Sarine und der Sense. Während an der Sarine der höchste Uferlängenwert bei 3.1 km pro Fluss-km liegt, verzeichnet die Sense einen Höchstwert von 10.7 km pro Fluss-km. Damit liegt die an der Sarine gemessene Uferlänge im Bereich der Uferlänge, welche an der Urbach Aue (Uferlänge < 3.2 km pro Fluss-km) gemessen wurde (Doering et al., 2012). Den Wert von 13.6 km pro Fluss-km, welcher durch Arscott et al. (2002) und van der Nat et al. (2003) am Tagliamento (Italien) gemessen wurde, erreichte die Sense somit zu keinem der untersuchten Zeitpunkte. Ein weiterer Index für die Komplexität eines Flussabschnittes aufzuzeigen, ist der Braid-channel-ratio-Index. Während die Sarine im Jahr 2013 einen Braid-channel-ratio Höchstwert von 1.4 aufweist, wurde an der Sense 1938 ein Höchstwert von 5.0 ermittelt. Die Tendenz Seitenarme und Verzweigungen auszubilden, hat durch den Staudambau nicht abgenommen. Trotzdem liegt der berechnete Wert (1.2 - 1.4) gemäss Arscott et al. (2002) nur leicht höher als der Wert eines kanalisierten Flusssystems. Der mäandrierende Flusslauf der Sarine ist durch die canyonartigen Felswände natürlicherweise gegeben und wird durch den Sinuosity-Index (ca. 2) bestätigt. Der Mittelwert des Braid-channel-ratio-Index der Sense über die gesamte Untersuchungsperiode steht für ein reich verzweigtes Flussgerinne (3.6), liegt aber deutlich unter dem am Tagliamento gemessenen Mittelwert (4.9) (Arscott et al., 2002). Die tieferen Sinuosity Werte an der Sense (1.1 - 1.2) im Vergleich zur Sarine

(ca. 2) sind mit den Werten des Tagliamento vergleichbar (Arscott et al., 2002) und sind auf weniger stark mäandrierende Hauptkanäle zurückzuführen.

Im Allgemeinen, blieben die ökomorphologischen Indikatoren Uferlänge, Braid-channel-ratio-Index und Wasserspiegelbreitenvariabilität an der Sarine während der gesamten Untersuchungsperiode relativ stabil, im Gegensatz dazu variierten diese an der Sense relativ stark. Gemäss Woolsey et al. (2005) ist die Wasserspiegelbreitenvariabilität kein geeigneter Indikator um Veränderungen in von Schwall-Sunk beeinflussten Fliessgewässern aufzuzeigen.

Die Habitatdiversität wiedergegeben durch den Shannon- und Evenness-Index war an der Sarine am grössten vor- und direkt nach dem Staudammbau (bis 1952), nahm danach aber kontinuierlich ab, was sehr wahrscheinlich auf die geringere Abfluss- und Geschiebedynamik zurückzuführen ist. Obwohl die Habitatdiversität an der Sense höher ist als an der Sarine, nahm diese während der Untersuchungsperiode ebenfalls ab. Die negative Veränderung war etwas weniger stark als an der Sarine.

Die deutliche Abnahme der aktiven Auenbreite und -fläche an der Sarine sind zum einen auf den Einfluss des Staudamms Rossens und das Kraftwerk Hauterive (verändertes Abfluss und Geschieberegime) zurückzuführen, welche sich besonders ab 1952 zeigt. Zum anderen auf die Zunahme der Waldfläche, welche sich aufgrund der reduzierten Hochwasserdynamik in den Uferzonen etablieren konnte. Obwohl das Abfluss- und Geschieberegime der Sense in der Untersuchungsperiode (1938 - 2013) nur geringfügig beeinflusst wurde, nahmen sowohl die mittlere, als auch die maximale Breite und die gesamte Auenfläche zwischen 1938 und 1954 ab. Die Flächenveränderung zwischen 1938 und 1954 wurde vermutlich durch die verbauten Ufersicherungen verursacht. Obwohl diese in den Luftaufnahmen ab 1969 nicht mehr zu sehen sind, nahm die Auenfläche und -breite bis zum Jahr 1993 weiter ab, konnte sich durch die ab dem Jahr 2005 vermehrt auftretenden natürlichen Hochwasserereignisse (\geq HQ2) bis zum Jahr 2013 aber wieder ausdehnen.

4.4 Schlussfolgerungen

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Habitatvielfalt in der Schwall-Sunk Strecke der Sarine durch den Einfluss des Staudamms und des Kraftwerks Hauterive abgenommen hat. Durch die starke Abnahme der bettbildenden und gerinnebildenden Abflüsse direkt nach dem Staudammbau (15 HQ2 zu 8 - 10 und 5 HQ10 zu 1 - 2 HQ10) zeigten sich bei den unbewachsenen Sand-, Kies- und Schotterflächen, welche im Jahr 1943 noch 11.4 % und im Jahr 1952 nur noch 4.1 % der Untersuchungsfläche ausmachten, ebenfalls deutliche abnahmen. Bis zum Jahr 2013 verschwanden diese Habitatflächen fast gänzlich (Anteil von 0.3 % an der gesamten Untersuchungsfläche). Im Gegensatz dazu, profitierten die Inseln vom veränderten Abfluss- und Geschieberegime und erreichten direkt nach dem Staudammbau im Jahr 1952 ihren grössten prozentualen Anteil (2.6 % an der gesamten Untersuchungsfläche, 1 % mehr als im Jahr 1943). Drei Hochwasserereignisse (> HQ10) welche zwischen 1968 und 1981 auftraten, dürften verantwortlich sein dafür, dass die Inselhabitats 1981 kurzfristig an Fläche verloren (Anteil von 0.6 % der Untersuchungsfläche). Die neusten Veränderungen zeigen, dass heutzutage sogar grössere Hochwasserereignisse wie die aus den Jahren 2005 ($750 \text{ m}^3/\text{s} \cong \text{HQ100}$) und 2007 ($605 \text{ m}^3/\text{s} \cong \text{HQ30}$) nicht mehr in der Lage sind, die etablierte Vegetation zu roden und neue Kiesflächen durch Erosion und Deposition zu bilden, weshalb die Inselhabitats sich wieder ausdehnen konnten (Anteil von 2.3 % der Untersuchungsfläche im Jahr 2013). Nebst den Inselhabitats (+43 %) verzeichneten die anthropogenen Strukturen (+313 %) die grössten Flächenausdehnungen im Vergleich der Flächen von 1943 und 2013. Im Gegensatz zur Sarine ist an der Sense kein eindeutiger Trend festzustellen, da die Anteile der unbewachsenen Sand-, Kies- und Schotterflächen während der gesamten Untersuchungsperiode von Jahr zu Jahr (Anteile zwischen 12.9 und 27.9 % der gesamten Untersuchungsfläche) variierten. Auffallend ist, dass die unbewachsenen und die bewachsenen Kiesflächen einen entgegengesetzten Trend zeigen, welcher vermutlich durch die mehr oder weniger regelmässig auftretenden Hochwasserereignisse (neun Ereignisse > als HQ10 in der Untersuchungsperiode) verursacht wird. Dadurch entsteht in Abhängigkeit des Abfluss- und Geschieberegimes eine dynamische Aue, in der sich die verschiedenen Habitats zeitlich und räumlich verändern und sich z.B. nur wenige Inseln bilden, da sich nur wenig Vegetation auf den Kiesflächen ansiedeln und etablieren kann. Einen weiteren, deutlichen Einfluss hat der Staudammbau auf die Veränderung der Habitatsturnoverrate. Während an der Sarine 15.3 % aller Flächen sich einmal verändert haben, waren es an der Sense mit 13.8 % etwas weniger. Mit zunehmender Anzahl Veränderungen (ab drei Veränderungen) zeigt sich der Einfluss des veränderten Abfluss- und Geschieberegimes aber besonders deutlich. An der Sarine veränderten sich 7.9 % der Flächen drei Mal und 0.3 % sechs Mal, während sich an der Sense mit 15.5 % (drei Veränderungen) bzw. 2.7 % (sechs Veränderungen) deutlich mehr Veränderungen der Flächen während der Untersuchungsperiode

auftraten. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass in der naturnahen «Senseaue» und in der durch Wasserkraft beeinflussten Aue «La Sarine: Rossens-Fribourg» unterschiedliche Habitatveränderungen stattgefunden haben. Ob sich die Verteilung der Habitate an der Aue «La Sarine: Rossens-Fribourg» ohne den Einfluss der Wasserkraft ähnlich wie die Habitatverteilung der «Senseaue» verändert hätte, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht aufgezeigt werden.

Für zukünftige Arbeiten, welche ebenfalls die Veränderung der Habitatvielfalt in Auen oder grösseren Fließsystemen untersuchen wollen, empfehlen sich besonders die Auswertung der prozentualen- und flächenmässigen Habitatveränderung und die Auswertung der Habitatturnoverraten der verschiedenen Jahrgänge als geeignete Indikatoren. Beide Indikatoren zeigen deutlich, wie dynamisch sich ein Untersuchungsgebiet verändert. Unter Einbezug der im Untersuchungsgebiet erhobenen Abflussdaten lassen sich ein grosser Teil der Veränderungen und Trends aus den Resultaten interpretieren. Weitere Indikatoren, welche in anderen Studien angewendet wurden und mittels Feldaufnahmen die Vegetationsveränderungen aufzeigen, wären eine mögliche Ergänzung zu den in dieser Arbeit verwendeten Indikatoren und würden zusätzlich den direkten Einfluss der Habitatveränderungen auf die Flora aufzeigen.

4.5 Ausblick

Dass sich sowohl die Aue «La Sarine: Rossens-Fribourg» als auch die «Senseaue», in Bezug auf deren Habitatvielfalt, während der Untersuchungsperiode verändert haben, zeigen die Resultate dieser Studie deutlich auf. Wie stark und in welcher Form sich die beiden Auen in naher und ferner Zukunft weiter verändern werden, ist sowohl von natürlichen Einflüssen (Hochwasserereignissen, Bränden, etc.) als auch von anthropogenen Einflüssen (Wasserkraft, Bauten, etc.) abhängig. Um die Einflüsse durch die Wasserkraft auf die Auen in der Schweiz zukünftig möglichst gering zu halten, sieht die Revision des Gewässerschutzgesetzes (GschG) vor, dass nebst der Reaktivierung des Geschiebehaltungs (Art. 43 a GSchG) auch die negativen Auswirkungen von Schwall-Sunk (Art. 39a GSchG) bis zum Jahr 2030 durch geeignete Massnahmen behoben werden müssen. Weiter zeigen die Resultate dieser Arbeit am Beispiel der Aue «La Sarine: Rossens-Fribourg» auf, in welchen Bereichen sich eine durch Wasserkraft beeinflusste Aue verändern kann (Erosion und Deposition), wo hohe Habitatturnoverraten auftreten, an welchen Stellen die Dynamik fehlt und bilden damit eine Grundlage, auf der geeignete Massnahmen für die geforderten Abfluss- und Geschieberegime Sanierungen diskutiert werden können. Eine mögliche Massnahme solche Sanierungen durchzuführen, sind künstliche Hochwasser, bei welchen die Abflussmengen über eine gewisse Zeit unterhalb des Staudamms massiv erhöht werden und somit natürliche Hochwasserereignisse simuliert werden. In Kombination mit im Voraus eingebrachten zusätzlichen Kiesschüttungen, entstehen neue Kiesflächen, bewachsene Kiesflächen sowie Uferbereiche werden dabei teilweise erodiert und

an neuen Stellen wieder abgelagert. An der Sarine wurden durch die Forschungsgruppe Ökohydrologie der ZHAW im September 2016 bereits künstliche Hochwasserversuche durchgeführt. Die Resultate werden zeigen, welchen Einfluss auf die Habitatvielfalt erzeugt werden konnte und welche Habitatveränderungen stattgefunden haben.

Da in Zukunft die Habitatsklassifizierung aufgrund neuer Technologien und Entwicklungen zur Aufnahmen der Luftbilder (Drohnen, bessere Bildauflösungen, etc.) mittels Einsatz von GIS-Programmen erleichtert sein dürfte, bietet sich die Auswertung von Luftbildern weiterhin als geeignete Massnahme an, um zukünftige Veränderungen der Habitatvielfalt, als auch die Auswirkungen von durchgeführten Massnahmen in Auen und Flusssysteme, aufzuzeigen.

5 Literaturverzeichnis

- Arcott, D.B., Tockner, K., van der Nat, D., & Ward, J.V. (2002). Aquatic Habitat Dynamics a Braided Alpine River Ecosystem (Tagliamento River, Northeast Italy). *Ecosystems*, 5(8): 802-814.
- BAFU. (2007). Bundesinventar der Auengebiete von nationaler Bedeutung. Bundesamt für Umwelt, Bern, Schweiz. Abgerufen am 29. Juli 2017 von <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>
- BAFU. (2017). *Aueninventar: Objektbeschreibungen*. Abgerufen am 21. Juli 2017 von <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/biodiversitaet/fachinformationen/massnahmen-zur-erhaltung-und-foerderung-der-biodiversitaet/oekologische-infrastruktur/biotope-von-nationaler-bedeutung/aueninventar--objektbeschreibungen.html>
- Bormann, F.H., & Likens, G.E. (1979). *Pattern and process in a forested ecosystem*. Springer-Verlag: New-York.
- Bruder, A., Tonolla, D., Schweizer, S., Vollenweider, S., Langhans, S.D., & Wüest, A. (2016). A conceptual framework for hydropeaking mitigation. *Science of the Total Environment* 568: 1204-1212.
- Bruno, M.C., Siviglia, A., Carolli, M., & Maiolini, B. (2012). Multiple drift responses of benthic invertebrates to interacting hydropeaking and thermopeaking waves. *Ecohydrology* 6: 511-522.
- Bryant, R.G., & Gilvear, D.J. (1999). Quantifying geomorphic and riparian land cover changes either side of a large flood event using airborne remote sensing: River Tay, Scotland, *Geomorphology*, 29: 307-321.
- Doering, M., Uehlinger, U., Rotach, A., Schlaepfer, D.R., & Tockner, K. (2007). Ecosystem expansion and contraction dynamics along a large Alpine alluvial corridor (Tagliamento River, Northeast Italy). *Earth Surface Process and Landforms* 32: 1693-1704.
- Doering, M., Blaurock, M., & Robinson C.T. (2012). Landscape transformation of an Alpine floodplain influenced by humans: historical analyses from aerial images. *Hydrol. Process.* 26: 3319-3326.

- Doering, M., Schweizer, S., Blaurock, M., Oppliger, S., Fuchs, M., & Robinson C.T. (2013). *Hydroökologie und nachhaltiges Auenmanagement. Die Sandey-Aue als Modellökosystem für eine Konzeptstudie*. «Wasser Energie Luft», Heft 1, Baden.
- Dubler, A.M. (2012). *Historisches Lexikon der Schweiz, Saane (Fluss)*. Abgerufen am 21. Juli 2017 von <http://www.hls-dhs-dss.ch/textes/d/D8754.php>
- Fausch, K.D., Torgersen, C.E., Baxter, C.V., & Li, H.W. (2002). Landscapes to riverscapes: Bridging the gap between research and conservation of stream fishes, *Bioscience* 52 (6): 483-498.
- Friedli, S. (2017). Veränderung der Habitatvielfalt in der Restwasserstrecke der Sarine nach dem Bau des Rossens-Staudamms (Kt. FR) - Eine GIS-Auswertung historischer Luftbilder. Bachelorarbeit, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, ZHAW Wädenswil (unveröffentlicht).
- Friend, P.F., & Sinha, R. (1993). Braiding and meandering parameters. *Braided Rivers*, J.L. Best and C.S. Bristow (ed.), Geological Society, London: 105-111.
- Garófano-Gómez, V., Martínez-Capel, F., Bertoldi, W., Gurnell, A., Estornell, J., & Segura-Beltrán, F. (2013). Six decades of changes in the riparian corridor of a Mediterranean river: a synthetic analysis based on historical data sources. *Ecohydrol.* 6, 536-553.
- Geisser, S., Stalder, S., & Hunziker, L. (2014). *Gewässerentwicklungskonzept Sense21. Systembeschreibung. Grundlagenbericht Flussmorphologie und Wasserbau*. Bern: Tiefbauamt Kanton Bern, Oberingenieurkreis II.
- Groupe-e. (2008). *Aménagement de Rossens – Hauterive*.
- Groupe-e. (2016). *Barrage de Rossens. Einige technische Daten*. Abgerufen am 18. Juli 2017 von <http://100.groupe-e.ch/upload/Panneaux%20Rossens.pdf>.
- Hanus, E., Roulier, C., Paccaud, G., Bonnard, L., & Fragnière, E. (2014). *Aufwertungsbedarf in den Auen von nationaler Bedeutung. Sanierung von Geschiebehalt, Restwasser und Schwall-Sunk. Revitalisierung*. BIOP Support.
- Hettrich, R., & Ruff, A. (2011). *Freiheit für das wilde Wasser. Die WWF-Alpenflussstudie. Status und Perspektiven nordalpiner Wildflusslandschaften aus naturschutzfachlicher Sicht*. Berlin: WWF Deutschland (Hrsg.).
- Hohensinner, S., Haidvogel, G., Jungwirth, M., Muhar, S., Preis, S., & Schmutz, S. (2005). Historical analysis of habitat turnover and age distributions as a reference for restoration of Austrian Danube floodplains. *River Basin Management III* 83: 489-502.

- Hydrique. (2017). *Abflussdaten La Gérine und La Glâne*. Abgerufen am 29. Juli 2017 von <http://www.fribourg.swissrivers.ch/appSite/index/site/fribourg>
- Johnson, L.B., & Gage, S.H. (1997). Landscape approaches to the analysis of aquatic ecosystems, *Freshwater Biology*, 37: 113-132.
- Jungwirth, M., Muhar, S., & Schmutz, S. (2002). Re-establishing and assessing ecological integrity in riverine landscapes. *Freshwater Biol.* 47: 867-887.
- Kondolf, G.M. (1997). Hungry Water. Effects of Sand and Gravel Mining on River Channels. *Environ. Manage.* 21: 533-551.
- Lachat, T., Pauli, D., Gonseth, Y., Klaus, G., Scheidegger, C., Vittoz, P., & Walter, T. (2010). Wandel der Biodiversität in der Schweiz seit 1900. Ist die Talsohle erreicht? Zürich, Bristol-Stiftung.
- Malard, F., Uehlinger, U., Zah, R., & Tockner, K. (2006). Flood pulse and riverscape dynamics in a braided glacial river. *Ecology* 87: 704-716.
- McGarigal, K., & Marks, B.J. (1994). Fragstats. Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Corvallis, OR.
- Person, E. (2013). Impact of Hydropeaking on Fish and their Habitat. Thèse no 5812. *Laboratoire de constructions hydrauliques. Ecole polytechnique fédérale, Lausanne.*
- Pfaundler, M., Dübendorfer, C., & Zysset, A. (2011). *Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer. Hydrologie – Abflussregime. Stufe F (flächendeckend)*. Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU. Umwelt-Vollzug Nr. 1107.
- Poole, G.C., O' Daniel, S.J., Jones, K.L., Woessner, W.W., Bernhardt, E.S., Helton, A.M., Stanford, J.A., Boer, B.R., & Beechie, T.J. (2008). Hydrologic spiralling: The role of multiple interactive flow paths in stream ecosystems. *River Research and Applications* 26: 242-260.
- Schweizer Ingenieur und Architekt. (1998). Schweizerische Bauzeitung, Band 116, Heft 47, Verlags-AG der akademischen technischen Vereine (Hrsg.).
- Schweizerische Elektrizitätsstatistik. (2016). Abgerufen am 22. Juli 2017 von https://www.bundespublikationen.admin.ch/cshop_mimes_bbl/8C/8CDCD4590EE41ED797FF3D9EAD3B79B3.pdf
- Smikrud, K.M., Prakash, A., & Nichols, J.V. (2008). Decision-Based Fusion for Improved Fluvial Landscape Classification Using Digital Aerial Photographs and Forward Looking Infrared Images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 74, No. 7: 903-911.
-

- Stanley, E.H., Fisher, S.G., & Grimm, N.B. (1997). Ecosystem expansion and contraction in streams. *Bioscience* 47: 427-435.
- Strub, A. (2016). *Erfassung und Bewertung von Auendynamik mit Hilfe von Fernerkundungsdaten*. Bachelorarbeit ZHAW, unveröffentlicht.
- Swisstopo. (2017). *Historische Luftbilder und Ortofotomosaiks*. Bundesamt für Landestopographie. Wabern, Schweiz.
- Tonolla, D., Bruder A., & Schweizer, S. (2017). Evaluation of mitigation measures to reduce hydropeaking impacts on river ecosystems – a case study from the Swiss Alps. *Science of the Total Environment* 574: 594-604.
- Van der Nat, D., Tockner, K., Edwards, P.J., & Ward, J.V. (2003). Habitat change in braided flood plains (Tagliamento, NE-Italy). *Freshwater Biology* 48: 1799-1812.
- Vörösmarty, C.J., Meybeck, M., Fekete, B., Sharma, K., Green, P., & Syvitsky, J.P.M. (2003). Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. *Glob. Planet. Chan.* 39: 169-190.
- Ward, J.V., Tockner, K., Arscott, D.B., & Claret C. (2002). Riverine landscape diversity. *Freshwater Biology* 47: 517-539.
- Weber, C., & Schmid, M. (2014) *Wasserkraftnutzung im Wasserschloss Schweiz: Herausforderung aus ökologischer Sicht*. Forum für Wissen 210: 15-23
- Whited, D. C., Lorang, M. S., Harner, M. J., Hauer, R. F., Kimball, J S., & Stanford, J A. (2007). Climate, hydrologic disturbance, and succession: drivers of floodplain pattern. *Ecology* 88: 940-953.
- Woolsey, S., Weber, C., Gonser, T., Hoehn, E., Hostmann, M., Junker, B., Roulier, C., Schweizer, S., Tiegs, S., Tockner, K., & Peter, A. (2005). Handbuch für die Erfolgskontrolle bei Fliessgewässerrevitalisierungen. *Publikation des Rhone-Thur Projektes*. Eawag, WSL, LCH-EFPL, VAW-ETHZ.
- ZHAW. (2017). Toolbox «Fluvial Params», Geoinformatik, unveröffentlicht.

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Übersichtskarte zu den beiden Untersuchungsgebieten an der Sarine und der Sense. In gelb bzw. violett sind die jeweiligen Untersuchungsperimeter eingezeichnet. Quelle Hintergrundkarten Swisstopo (2017) und Auenperimeter BAFU (2007, plus 50m Puffer). 12
- Abbildung 2: offene Kiesbank in der Schwall-Sunk Strecke. Quelle: D. Tonolla (2017). 13
- Abbildung 3: Verzweigtes Gerinne bei Plaffeien. Quelle: Geisser et al., (2014). 15
- Abbildung 4: Bekannte Verbauungen an der Sense. 1954: Untersuchungsperimeter (violett), die zur Ufersicherung eingebauten Bühnen (Mitte 20 Jh., rot) und eine Brücke (Mitte 20 Jh., gelb). 2013: Untersuchungsperimeter (violett), Ufersicherung bei der Deponie «Kloster» (2005, orange) und die geplante Ufersicherung beim Parkplatz «Rufenen» (nicht bekannt ob realisiert, blau). Quelle Hintergrundkarten Swisstopo (2017) und Auenperimeter BAFU (2007, plus 50 m Puffer). 15
- Abbildung 5: Abflussganglinie der höchsten jährlichen Abflüsse an der Station Fribourg für die Periode 1.1.1911 bis 31.12.2016. Schwarz, Gelb und Rot eingezeichnet die Hochwasserabflüsse der Jährlichkeiten 2 (262 m³/s), 10 (461 m³/s) und 100 (733 m³/s). Die schwarzen Pfeile symbolisieren die Jahre der Luftbildaufnahmen, der graue Balken die Bauzeit des Rossens Staudamms. 25
- Abbildung 6: Prozentuale Veränderung der Häufigkeit der Habitate an der Sarine zwischen 1943 und 2013, der graue Balken symbolisiert die Bauzeit des Rossens Staudamms. 27
- Abbildung 7: Habitatsklassifizierung im Untersuchungsperimeter der Aue «La Sarine: Rossens-Fribourg» in der Zeitperiode vor dem Staudammbau (1943) und nach der Regulierung (1952, 1968, 1981, 1993, 2007 und 2013). In Klammer die mittlere tägliche Abflussmenge zum Zeitpunkt der Luftbildaufnahmen. 28
- Abbildung 8: Lage des Haupt- und Nebengerinnes zu sieben verschiedenen Zeitpunkten während 1943 und 2013. 29
- Abbildung 9: (B) Darstellung der Habitat Turnover Rate. Blaue Flächen veränderten sich nicht (z.B. wenn eine Fläche während der ganzen Zeitperiode immer eine Waldfläche blieb), während die grün, gelb und rot eingefärbten Flächen Veränderungen der Habitattypen (z.B. offene Sand- und Kiesfläche welche durch Pioniervegetation besiedelt wurde) aufzeigen. 30
- Abbildung 10: Abflussganglinie der höchsten jährlichen Abflüsse an der Station Thörishaus, Sensematt, für die Periode 1.1.1928 bis 31.12.2016. Schwarz, Gelb und Rot eingezeichnet sind

die Hochwasserabflüsse der Jährlichkeiten 2 (146 m³/s), 10 (244 m³/s) und 100 (404 m³/s). Die schwarzen Pfeile symbolisieren die Jahre der Luftbildaufnahmen. 34

Abbildung 11: Prozentuale Veränderung der Häufigkeit der Habitats an der Sense zwischen 1938 und 2013. 36

Abbildung 12: Habitatsklassifizierung im Untersuchungsperimeter der «Senseaue» für die Jahre 1938, 1954, 1969, 1981, 1993, 2007 und 2013. In Klammer die tägliche Abflussmenge zum Zeitpunkt der Luftbildaufnahmen. 37

Abbildung 13: (A) Lage der Haupt- und Nebengerinne zu sieben verschiedenen Zeitpunkten während 1938 und 2013. (B) Darstellung der Habitat Turnover Rate. Blaue Flächen veränderten sich nicht (z.B. wenn eine Fläche während der ganzen Untersuchungsperiode immer eine Waldfläche blieb), während die grün, gelb und rot eingefärbten Flächen Veränderungen der Habitattypen (z.B. offene Sand- und Kiesfläche welche durch Pioniervegetation besiedelt wurde) aufzeigen..... 38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersichtstabelle zum Aufwertungsbedarf der Aue «La Sarine: Rossens-Fribourg» in Bezug auf Geschiebe, Abfluss, Schwall-Sunk und Revitalisierungen. Rot = starke Beeinträchtigung, gelb = mittlere Beeinträchtigung, blau = keine oder nur sehr geringe Beeinträchtigung. Quelle: Hanus et al., (2014; verändert).	14
Tabelle 2: Übersichtstabelle zum Aufwertungsbedarf der «Senseaue» in Bezug auf Geschiebe, Abfluss, Schwall-Sunk und Revitalisierungen. Blau = keine oder nur sehr geringe Beeinträchtigung. Quelle: Hanus et al., (2014; verändert).	16
Tabelle 3: Datenüberblick zu den verwendeten Luftbildern für die Sarine und die Sense.	17
Tabelle 4: Übersichtstabelle zu den Abflussmessstationen in Fribourg und Thörishaus, Sense matt.	18
Tabelle 5: Mittlere tägliche Abflussmenge zum Zeitpunkt der Luftbildaufnahmen an der Sarine und der Sense.	19
Tabelle 6: Charakterisierung der terrestrischen und aquatischen Habitattypen (Doering et al., 2012; verändert).	20
Tabelle 7: Hochwasserereignisse \geq HQ2 und \geq HQ10 an der Sarine während der Zeitperiode 1928 – 2013, getrennt nach Periode der Luftaufnahmen.	26
Tabelle 8 Turnoverrate (%), sowie Grösse der Flächen (m ²) an der Sarine, welche zwischen den Untersuchungsperioden Veränderungen aufzeigten, oder stabil blieben.	31
Tabelle 9: Veränderung der Uferlänge (km pro Fluss-km) an der Sarine in der Untersuchungsperiode 1943 bis 2013.	31
Tabelle 10: Veränderung des Braid-channel ratio-Index und des Sinuosity-Index an der Sarine in der Untersuchungsperiode 1943 bis 2013.	31
Tabelle 11: Veränderung der Wasserspiegelbreitenvariabilität an der Sarine in der Untersuchungsperiode 1943 bis 2013.	32
Tabelle 12: Veränderung des Shannon-Index und des Evenness-Index an der Sarine in der Untersuchungsperiode 1943 bis 2013.	32
Tabelle 13: Breite und Fläche der aktiven Aue «La Sarine: Rossens-Fribourg» in der Untersuchungsperiode 1943 bis 2013.	33
Tabelle 14: Übersichtstabelle zu den Ereignissen der Stufe HQ2 und HQ10 an der Sense während der Zeitperiode 1928 – 2013.	35

Tabelle 15: Turnoverrate (%), sowie Grösse der Flächen (m ²) an der Sense, welche zwischen den Untersuchungsperioden Veränderungen aufzeigten, oder stabil blieben.	39
Tabelle 16: Veränderung der Uferlänge (km pro Fluss-km) an der Sense in der Untersuchungsperiode 1938 bis 2013.	39
Tabelle 17: Veränderung des Braid-channel ratio-Index und des Sinuosity-Index an der Sense in der Untersuchungsperiode 1938 bis 2013.	40
Tabelle 18: Veränderung der Wasserspiegelbreitenvariabilität an der Sarine in der Untersuchungsperiode 1938 bis 2013.	40
Tabelle 19: Veränderung des Shannon-Index und des Evenness-Index an der Sense für die Untersuchungsperiode 1938 bis 2013.	41
Tabelle 20: Breite und Fläche der aktiven «Senseaue» in der Untersuchungsperiode 1938 bis 2013.	41

Anhang

Anhang I	Plagiatserklärung
Anhang II	Poster
Anhang III:	Auflistung der verwendeten Turbinen im Kraftwerk Hauterive
Anhang IV:	Mittlere tägliche Abflüsse an der Sarine
	Prozentuale Veränderung der Habitate an der Sarine
	Flächenverteilung der Habitate an der Sarine
	Habitatturnover an der Sarine
	Uferlängen der Sarine
Anhang V:	Prozentuale Veränderung der Habitate an der Sense
	Flächenverteilung der Habitate an der Sense
	Habitatturnover an der Sense
	Uferlängen der Sense
Anhang VI	GIS Ordner- und Datenstruktur

Anhang I:

PLAGIATSERKLÄRUNG

Betreffend das selbstständige Verfassen einer Bachelorarbeit im Departement Life Sciences und Facility Management

Mit der Abgabe dieser Bachelorarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat.

Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle verwendeten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt ausgewiesen sind, d.h. dass die Bachelorarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art treten Paragraph 39 und Paragraph 40 der Rahmenprüfungsordnung für die Bachelor- und Masterstudiengänge an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften vom 29. Januar 2008 sowie die Bestimmungen der Disziplinarmaßnahmen der Hochschulordnung in Kraft.

Ort, Datum:

Gränichen, 6.9.2017

Unterschrift:



Veränderung der Habitatvielfalt in der Schwall-Sunk-Strecke der Sarine nach dem Bau des Rossens-Staudamms (Kt. FR) Eine GIS-Auswertung historischer Luftbilder

Bachelorarbeit | Fabian Rickenbacher | Studiengang Umweltingenieurwesen 2014



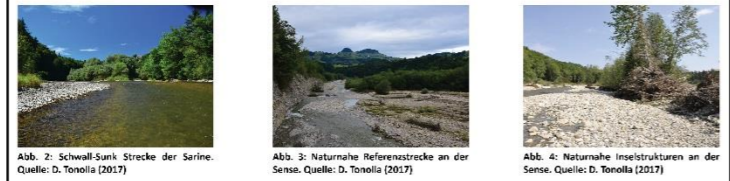

1 Ausgangslage

Auenlandschaften gehören zu den weltweit am meisten gefährdeten Ökosystemen. Oft werden sie durch anthropogene Einflüsse (z.B. Flussverbauungen, Staudämme), sowie durch weitere Umwelteinflüsse (z.B. Klimawandel, Feuer) beeinflusst, wodurch die natürliche Habitatverteilung beeinträchtigt werden kann [1,2]. In der Schweiz sind heute schätzungsweise bereits mehr als 70 % aller Auenlandschaften verschwunden [3] und rund 1'000 km Fließgewässer durch den Betrieb von Speicherkraftwerken wesentlich beeinträchtigt [4]. Bereits im Jahre 1902 wurde das Wasser der Sarine (dt. Saane) ca. 3 km oberhalb des heutigen Staudamms gestaut und zur Erzeugung von Wasserkraft genutzt. Durch den Bau des Rossens Staudamms entstand 1948 der Lac de la Gruyère. Dessen Wasser wird im Kraftwerk Hauterive turbinieren und unterhalb des Kraftwerks in die Schwall-Sunk Strecke der Sarine eingeleitet (Abb.1) Im Gegensatz zur Sarine wurde die Sense während der gesamten Untersuchungsperiode nur geringfügig durch anthropogene Ufersicherungen beeinflusst und kann daher als naturnahe Aue angesehen werden.



Abb. 1: Untersuchungsgebiete an der Sarine und der Sense. In gelb bzw. violett sind die Untersuchungsperimeter eingezeichnet. Quelle: Hintergrundkarten Swiss topo (2017) und Auenperimeter BAFU (2007, plus 50m Puffer).

Im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit wurde mittels Analysen von historischen und aktuellen Luftbildern der Einfluss des Rossens Staudamms und des Kraftwerks Hauterive auf die raumzeitliche morphologische Veränderung der wichtigsten Auenhabitats in der Schwall-Sunk Strecke der Sarine (Abb.2) untersucht. Als naturnahe Referenzstrecke dient die Aue an der Sense bei Plaffeien im Kanton Freiburg (Abb.3; Abb.4)



2 Methoden

- Luftbilder der Zeitreihen 1938, 1943, 1952, 1954, 1968, 1969 fotografisch aufbereiten und orthorektifizieren mit der Software IMAGINE Photogrammetry 2014 von ERDAS IMAGINE 2014®.
- Manuelle Digitalisierung der 8 Habitattypen [2, verändert] (water, island, open sand and gravel bars, vegetated sand and gravel bars, (riparian) forest, pasture and grassland, other structures and cliff) innerhalb der Untersuchungsperimeter (Abb.1).
- Auswerten der Abflussdaten der Messstationen Fribourg und Sensematt-Thörishaus (BAFU).
- Auswerten der prozentualen- und flächenmässigen Habitatveränderungen und der Habitatturnoverraten in GIS.
- Berechnen der Uferlänge [5], Braid-channel ratio index [6], Sinuosity index [6], Wasserspiegelbreitenvariabilität und der Breite und Fläche der aktiven Aue mit Toolbox «Fluvial Params» [7] in GIS.
- Auswertung von Shannon index und Eveness Index [8] mit dem Patch Analyst Tool in GIS.

Literatur
[1] Poff, N.L., Vannote, R.L., Cushing, R.M., Cummins, K.W., Grout, C.F., Hession, J.B., Johnson, R.A., King, K.W., Lamberson, R.H., Liedtke, J.L., Peterson, G.R., Richey, J.T., Sedell, J.R., Stewart, J.P., Strickland, J.D., Varley, N., Vondracek, C., Ward, S.V., West, G.B., Wilford, W.C., Wissinger, S.A., Young, B.E., Zedler, J.B.: 1997, 'The River Continuum Concept', *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 54: 1362-1369.
[2] Poff, N.L., Vannote, R.L., Cushing, R.M., Cummins, K.W., Grout, C.F., Hession, J.B., Johnson, R.A., King, K.W., Lamberson, R.H., Liedtke, J.L., Peterson, G.R., Richey, J.T., Sedell, J.R., Stewart, J.P., Strickland, J.D., Varley, N., Vondracek, C., Ward, S.V., West, G.B., Wilford, W.C., Wissinger, S.A., Young, B.E., Zedler, J.B.: 1997, 'The River Continuum Concept', *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 54: 1362-1369.
[3] Poff, N.L., Vannote, R.L., Cushing, R.M., Cummins, K.W., Grout, C.F., Hession, J.B., Johnson, R.A., King, K.W., Lamberson, R.H., Liedtke, J.L., Peterson, G.R., Richey, J.T., Sedell, J.R., Stewart, J.P., Strickland, J.D., Varley, N., Vondracek, C., Ward, S.V., West, G.B., Wilford, W.C., Wissinger, S.A., Young, B.E., Zedler, J.B.: 1997, 'The River Continuum Concept', *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 54: 1362-1369.

3 Resultate

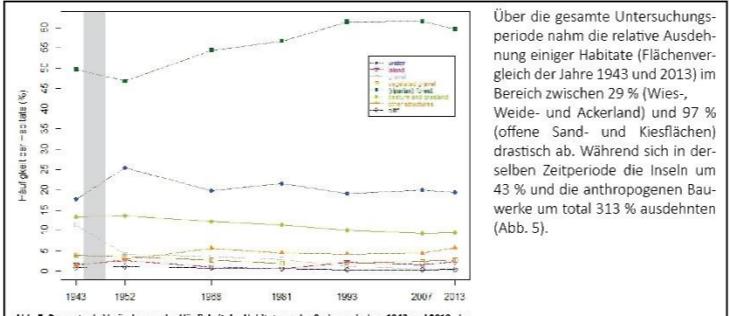


Abb. 5: Prozentuale Veränderung der Häufigkeit der Habitate an der Sarine zwischen 1943 und 2013, der graue Balken symbolisiert die Bauzeit des Rossens Staudamms.

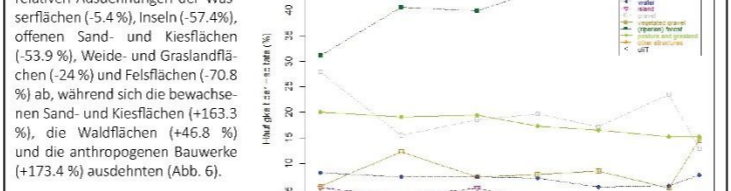
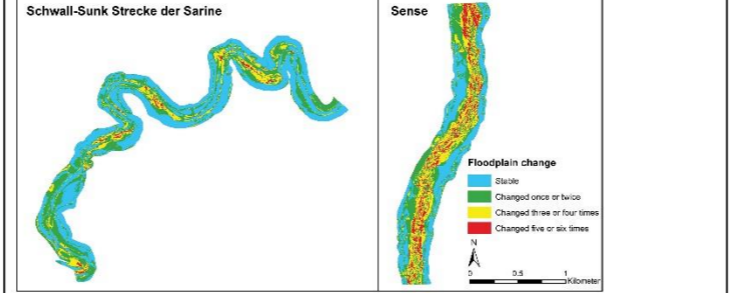


Abb. 6: Prozentuale Veränderung der Häufigkeit der Habitate an der Sense zwischen 1938 und 2013.

Deutlich höhere Habitatturnoverrate an der Sense als an der Schwall-Sunk Strecke der Sarine. Im aktiven Bereich der Aue sind die Veränderungen besonders ausgeprägt (Abb. 7).

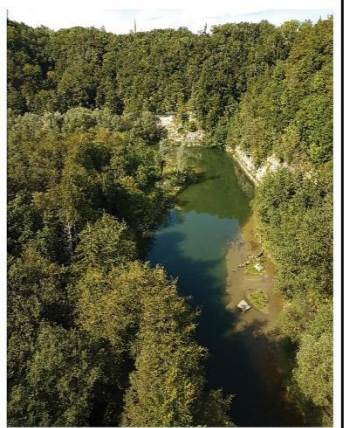


4 Interpretation

- Verändertes Abfluss- und Geschieberegime an der Sarine durch den Staudammbau.
- Starke Abnahme der bettbildenden ($\geq HQ2$) und gerinnebildenden Abflüsse ($\geq HQ10$) direkt nach dem Staudammbau.
- Anthropogene Bauwerke wurden grösstenteils auf Wies-, Weide- und Ackerflächen aber auch in der aktiven Aue erbaut.
- Offene Sand-, Kies- und Schotterflächen wurden durch den Staudammbau besonders stark beeinflusst.
- Mit zunehmender Anzahl Veränderungen zeigt sich der Einfluss des veränderten Abfluss- und Geschieberegimes besonders deutlich.
- Die ökomorphologischen Indikatoren blieben an der Sarine während der gesamten Untersuchungsperiode relativ stabil. Im Gegensatz dazu variierten diese an der Sense relativ stark.
- Die Sense weist eine höhere Habitatdiversität (Shannon- und Evenness Index) auf als die Sarine. Über die gesamte Untersuchungsperiode betrachtet verzeichneten allerdings beide einen Rückgang der Habitatdiversität.

5 Fazit

- Die quantitative Bewertung von Veränderungen der Habitatvielfalt in Auen und Fließgewässern mittels GIS und historischen Luftbildern unter Verwendung von verschiedenen Indikatoren bietet eine geeignete Alternative zu den klassischen, aufwändigen Feldaufnahmen.
- Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Habitatvielfalt in der Schwall-Sunk Strecke der Sarine durch den Einfluss des Staudamms und des Kraftwerks Hauterive abgenommen hat.
- In der naturnahen «Senseaue» und in der durch Wasserkraft beeinflussten Aue «La Sarine: Rossens-Fribourg» haben unterschiedliche Habitatveränderungen stattgefunden. Ob sich die Verteilung der Habitate an der Sarine ohne den Einfluss der Wasserkraft ähnlich wie die Habitatverteilung an der Sense verändert hätte, kann mit den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen nicht aufgezeigt werden.



Literatur
[1] Poff, N.L., Vannote, R.L., Cushing, R.M., Cummins, K.W., Grout, C.F., Hession, J.B., Johnson, R.A., King, K.W., Lamberson, R.H., Liedtke, J.L., Peterson, G.R., Richey, J.T., Sedell, J.R., Stewart, J.P., Strickland, J.D., Varley, N., Vondracek, C., Ward, S.V., West, G.B., Wilford, W.C., Wissinger, S.A., Young, B.E., Zedler, J.B.: 1997, 'The River Continuum Concept', *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 54: 1362-1369.
[2] Poff, N.L., Vannote, R.L., Cushing, R.M., Cummins, K.W., Grout, C.F., Hession, J.B., Johnson, R.A., King, K.W., Lamberson, R.H., Liedtke, J.L., Peterson, G.R., Richey, J.T., Sedell, J.R., Stewart, J.P., Strickland, J.D., Varley, N., Vondracek, C., Ward, S.V., West, G.B., Wilford, W.C., Wissinger, S.A., Young, B.E., Zedler, J.B.: 1997, 'The River Continuum Concept', *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 54: 1362-1369.
[3] Poff, N.L., Vannote, R.L., Cushing, R.M., Cummins, K.W., Grout, C.F., Hession, J.B., Johnson, R.A., King, K.W., Lamberson, R.H., Liedtke, J.L., Peterson, G.R., Richey, J.T., Sedell, J.R., Stewart, J.P., Strickland, J.D., Varley, N., Vondracek, C., Ward, S.V., West, G.B., Wilford, W.C., Wissinger, S.A., Young, B.E., Zedler, J.B.: 1997, 'The River Continuum Concept', *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 54: 1362-1369.

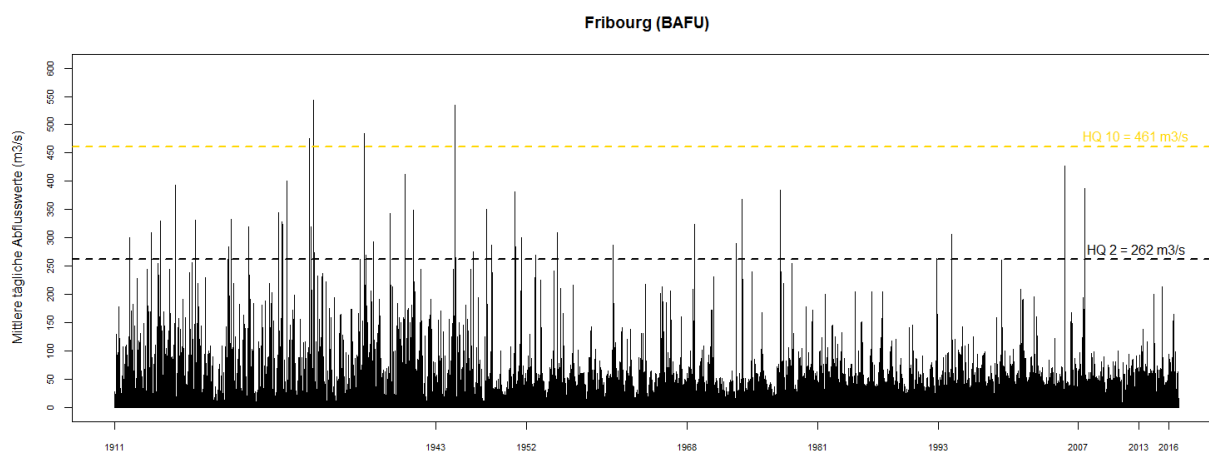
Anhang III:

Auflistung der verwendeten Turbinen im Kraftwerk Hauterive

Turbine	n°1	n°2	n°4	n°5	Dot. 1	Dot. 2
Typ	Francis					
Inbetriebnahme	1948	1948	2007	1994	1976	2005
Durchflussmenge (m ³ /s)	18.75	18.75	28	18.75	1.0	2.83
Leistung (MW)	17.48	17.48	24.50	18.11	0.71	1.70
Geschwindigkeit (t/min)	300	300	300	300	1000	750

Anhang IV:

Mittlere tägliche Abflüsse an der Sarine



Prozentuale Veränderung der Habitate an der Sarine

Habitate	1943	1952	1968	1981	1993	2007	2013	Mittelwert	Standardabweichung
Water (%)	17.7	25.4	19.8	21.6	19.1	19.9	19.4	20.4	2.3
Island (%)	1.6	2.6	1.0	0.6	2.1	1.5	2.3	1.7	0.7
Open sand and gravel bars (%)	11.4	4.1	3.6	2.9	1.1	0.6	0.3	3.4	3.5
Vegetated sand and gravel bars (%)	3.9	3.6	2.7	1.9	1.9	2.4	2.7	2.7	0.7
(Riparian) Forest (%)	49.7	46.8	54.4	56.7	61.4	61.5	59.6	55.7	5.3
Pasture and grassland (%)	13.4	13.6	12.2	11.4	10.0	9.3	9.5	11.3	1.7
Other structures (%)	1.4	2.8	5.6	4.5	4.2	4.4	5.7	4.1	1.4
Cliff (%)	0.8	1.1	0.7	0.5	0.3	0.3	0.4	0.6	0.3

Flächenverteilung der Habitate an der Sarine

Habitate	1943	1952	1968	1981	1993	2007	2013	Mittelwert
Water (m ²)	280'359	402'757	313'233	341'459	302'340	315'464	307'056	323'238
Island (m ²)	25'492	41'466	15'312	8'851	32'599	22'963	36'416	26'157
Open sand and gravel bars (m ²)	180'502	64'902	56'571	46'640	17'243	9'228	5'049	54'305
Vegetated sand and gravel bars (m ²)	62'406	56'441	42'033	30'363	29'438	38'646	43'326	43'236
(Riparian) Forest (m ²)	786'285	740'353	861'117	896'984	971'565	972'840	943'256	881'772
Pasture and grassland (m ²)	212'474	214'932	193'683	179'687	158'329	147'709	150'565	179'625
Other structures (m ²)	21'937	44'881	89'055	70'787	66'163	70'079	90'691	64'799
Cliff (m ²)	13'136	16'913	11'622	8'034	5'185	5'344	6'228	9'495

Habitatturnover an der Sarine

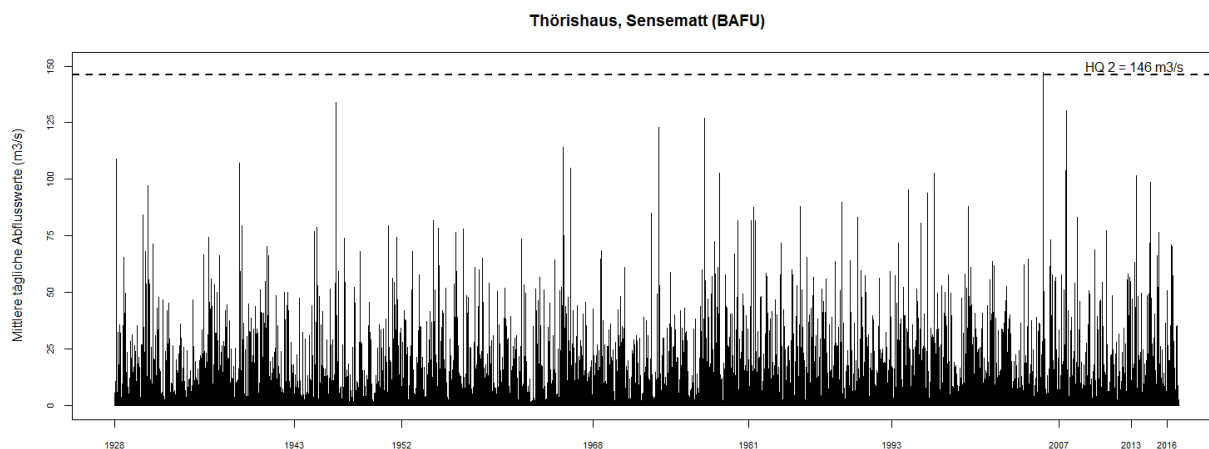
Habitat Turnover (Anz. Änderungen)	Fläche (m ²)	Anteil (%)
0	874'852.2	55.3
1	241'947.3	15.3
2	236'689.7	15.0
3	125'005.7	7.9
4	73'574.4	4.7
5	25'239.5	1.6
6	4'630.8	0.3
Totale Fläche (m ²)	1'581'939.5	

Uferlängen Tabelle der Sarine

Jahr	1943	1952	1968	1981	1993	2007	2013
Uferlinie (km)	20662.7	20771.3	21081.1	17826.4	18332.2	20050.8	21348.1
Länge des Hauptkanals (km)	6939.1	6894.4	6762.0	6731.3	6798.7	6830.4	6868.5
Uferlänge (km pro Fluss-km)	3.0	3.0	3.1	2.6	2.7	2.9	3.1

Anhang V:

Mittlere tägliche Abflüsse an der Sense



Prozentuale Veränderung der Habitate an der Sense

Habitate	1938	1954	1969	1981	1993	2007	2013	Mittelwert	Standardabweichung
Water (%)	8.1	7.4	7.4	7.1	5.4	5.6	7.7	6.2	0.9
Island (%)	5.3	3.3	5.2	2.2	1.9	2.0	2.3	2.9	1.4
Open sand and gravel bars (%)	27.9	15.5	18.6	19.7	17.2	23.5	12.9	19.3	4.7
Vegetated sand and gravel bars (%)	5.5	12.3	7.4	7.8	8.5	5.2	14.5	8.7	3.2
(Riparian) Forest (%)	31.1	40.6	39.9	43.8	48.9	46.8	45.7	42.4	5.5
Pasture and grassland (%)	20.0	19.1	19.5	17.3	16.5	15.2	15.2	17.6	1.9
Other structures (%)	0.5	0.5	0.6	0.8	1.0	1.4	1.4	0.9	0.4
Cliff (%)	1.5	1.3	1.4	1.3	0.7	0.3	0.5	1.0	0.5

Flächenverteilung der Habitate an der Sense

Habitate	1938	1954	1969	1981	1993	2007	2013	Mittelwert
Water (m ²)	91'028	83'293	83'063	79'354	61'269	63'133	86'139	78'182.7
Island (m ²)	59'534	37'354	59'002	24'869	20'989	22'388	25'406	35'649.0
Open sand and gravel bars (m ²)	313'784	174'618	208'783	221'798	193'495	264'101	144'561	217'305.5
Vegetated sand and gravel bars (m ²)	61'798	138'222	83'370	88'215	95'490	58'296	162'696	98'298.2
(Riparian) Forest (m ²)	349'887	456'119	448'118	492'126	549'520	526'057	513'606	476'490.3
Pasture and grassland (m ²)	225'183	215'276	219'300	194'504	184'993	171'035	171'226	197'359.5
Other structures (m ²)	5'699	5'302	7'128	8'937	10'713	15'539	15'581	9'842.5
Cliff (m ²)	17'384	14'120	15'638	14'485	7'838	3'745	5'068	11'182.7

Habitatturnover an der Sense

Habitat Turnover (Anz. Änderungen)	Fläche (m ²)	Anteil (%)
0	369'002.30	32.8%
1	154'863.40	13.8%
2	155'126.78	13.8%
3	173'852.06	15.5%
4	140'783.24	12.5%
5	99'179.57	8.8%
6	30'861.18	2.7%
Totale Fläche (m ²)	1123668.54	

Uferlängen der Sense

Jahr	1938	1954	1969	1981	1993	2007	2013
Uferlinie (km)	37561.7	29169.1	22857.9	19536.3	18239.6	20511.7	26463.6
Länge des Hauptkanals (km)	3629.9	3436.4	3543.1	3482.7	3456.3	3471.8	3441.9
Uferlänge (km pro Fluss-km)	10.7	8.3	6.5	5.6	5.2	5.9	7.6

Anhang VI:

GIS Ordner- und Datenstruktur

