

INSTITUT FÜR  
WASSERWIRTSCHAFT, HYDROLOGIE  
UND KONSTRUKTIVEN WASSERBAU

DEPARTMENT FÜR WASSER-ATMOSPHERE-UMWELT  
UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR

---

# Entwicklung und Bewertung schalldämpfender Maßnahmen anhand mehrdimensionaler hydrodynamischer Modellierung

---

Autor:  
Andreas PUTZ

Betreuer:  
Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn.  
Christoph HAUER  
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Helmut  
HABERSACK

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

*eingereicht von*

Andreas PUTZ

Matrikelnummer: 0740420

17. April 2014

*The fact that we live at the bottom of a deep gravity well, on the surface of a gas covered planet going around a nuclear fireball 90 million miles away and think this to be normal is obviously some indication of how skewed our perspective tends to be.*

— DOUGLAS ADAMS, THE SALMON OF DOUBT

## Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit wurde am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau der Universität für Bodenkultur (Wien) erstellt. Sie stützt sich auf die Erkenntnis, dass der Schwallbetrieb von Wasserkraftwerken eine Herausforderung für die ökologische Funktion eines Fließgewässers darstellt, und versucht anschließend, Vorschläge zur Verbesserung der Situation (in Form wasserbaulicher Maßnahmen) zu liefern.



Andreas  
PUTZ

E-Mail: [contact@andiance.com](mailto:contact@andiance.com)

Homepage: [www.andiance.com](http://www.andiance.com)



Diese Masterarbeit von Andreas Putz steht unter einer  
[Creative Commons Namensnennung 3.0 Österreich Lizenz](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/at/).

## **Danksagung**

Ich danke dem Initiator dieser Diplomarbeit, Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Helmut Habersack, für die interessante Aufgabenstellung und die Einbindung in das Projekt Schwall 2015.

Im Besonderen möchte ich mich bei Herrn Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Christoph Hauer für die kompetente und überaus kollegiale Betreuung bedanken.

Weiteren Dank bin ich jenen Menschen verpflichtet, die mich während des Studiums unterstützt und begleitet haben: meine Familie, Freunde und Studienkollegen.

Außerdem möchte ich mich noch bei jenen Personen bedanken, die mich in irgendeiner Form inspiriert, motiviert oder unterhalten haben: Galileo Galilei, Albert Einstein, Charles Darwin, Nikola Tesla, Stephen Hawking, Vince Gilligan, John Frusciante, Wes Anderson, Louis C. K., Douglas Adams, u.v.m.

## **Abstract (Deutsch)**

Die Nutzung von Wasser zur Stromerzeugung hat neben den umweltrelevanten Vorteilen auch zahlreiche Nachteile für die Fauna und Flora der genutzten Gewässer. Die EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL 2000) sieht einen modernen und damit verbunden ökologisch verträglichen Wasserbau vor und hat zum Ziel, einen möglichst naturnahen Zustand herzustellen.

Die vorliegende Arbeit behandelt die Auswirkungen von anthropogenen Eingriffen in die Gewässergeomorphologie (Regulierung und Begradigung der Flüsse) und geht der Frage nach, welche Probleme sich durch die strenge Kontrolle des Abflusses ergeben. Stark verbaute und als Lebensraum nicht optimal geeignete Fließstrecken sowie die abrupten Abflussschwankungen durch die Beaufschlagung der Kraftwerksturbinen zur Energiegewinnung während Spitzenlasten berauben die Gewässerbewohner eines Großteils ihres Lebensraumes und sind darüber hinaus auch der Auslöser problematischer Situationen für diverse Organismen (z.B. Abdrift, Stranden).

Durch strukturelle wasserbauliche Eingriffe können in beeinträchtigten Flüssen Habitate und Rückzugsmöglichkeiten geschaffen und damit die ökologische Situation verbessert werden. Diese Arbeit befasst sich mit der Planung positiv wirkender Maßnahmen, deren Einfluss und Wirksamkeit mit Hilfe moderner hydrodynamischer und Habitatmodellierung quantifiziert werden kann. Als Zeigerorganismus wird die jeweilige Leitfischart des Flussabschnitts gewählt, die als Räuber am oberen Ende der Nahrungskette zu finden ist und sich als Repräsentant für die Gesundheit der ökologischen Situation gut eignet.

Des Weiteren zeigt die Analyse im Umkehrschluss, welche Auswirkungen eine Regulierung auf bestehende wertvolle Habitatstrukturen hätte und bestätigt dadurch die Wirksamkeit von bereits umgesetzten Revitalisierungsprojekten.

## **Abstract (English)**

The use of water for power generation has –in addition to the environmental benefits– many disadvantages for the fauna and flora of the waters that are used. The EU Water Framework Directive (WRRL 2000) envisions modern and ecologically compatible methods in hydraulic engineering — its aim is a near-natural state wherever possible.

This thesis deals with the impacts of anthropogenic changes on river geometry (regulation and straightening of rivers) and explores the question what problems arise from the strict control of runoff. Straight regulated river sections which are not optimal habitats and the abrupt fluctuations in discharge –caused by the control of the turbines’ admission flow to produce energy during peak loads– rob the river inhabitants of a large part of their habitat. Furthermore, a variety of problematic situations are triggered by a hydropeaking event (e.g. drift, beaching).

By implementing structural measures, habitats and refuges can be created in degraded rivers and thus the ecological situation be improved. This thesis’s goal is to plan and develop beneficial measures whose impact and effectiveness can be quantified with the help of modern hydrodynamic and habitat modeling. The predominant fish species of the river section is selected as indicator organism — as a predator it stands at the top of the food chain and is well suited as representative of the health of the ecological situation.

Conversely, the analysis shows what impact regulating would have on existing precious habitat structures and validates the effectiveness of already implemented revitalization projects.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
1.1	Problemstellung . . . . .	4
1.2	Motivation . . . . .	5
1.3	Ziele . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Untersuchungsgebiete</b>	<b>6</b>
2.1	Drau – Strecke 2 . . . . .	6
2.1.1	Hydrologie . . . . .	7
2.2	Ill – Strecke 2 . . . . .	8
2.2.1	Hydrologie . . . . .	8
2.3	Inn – Strecke 1 . . . . .	10
2.3.1	Hydrologie . . . . .	10
2.4	Inn – Strecke 2 . . . . .	12
2.4.1	Hydrologie . . . . .	12
2.5	Inn – Strecke 4 . . . . .	14
2.5.1	Hydrologie . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>16</b>
3.1	Hydrodynamische Modellierung . . . . .	16
3.1.1	Navier-Stokes-Gleichungen . . . . .	16
3.1.2	Flachwassergleichungen . . . . .	16
3.1.3	Numerische Verfahren . . . . .	17
3.1.4	2-dimensionales Modell . . . . .	17
3.1.5	Instationärer Abfluss . . . . .	18
3.2	Ökologie . . . . .	18
3.2.1	Fische als Zeigerorganismen . . . . .	18
3.2.2	Habitate und Skala . . . . .	19
3.2.3	Auswirkungen des Schwall . . . . .	19
3.2.4	Untersuchte Organismen . . . . .	20
3.2.5	Altersstadien . . . . .	21
3.3	Habitatmodellierung . . . . .	21
3.3.1	Präferenzkurven . . . . .	22
3.3.2	Abhängigkeit von Art und Alter . . . . .	22
3.3.3	Habitat Suitability Index . . . . .	24
3.3.4	Weighted Usable Area – WUA . . . . .	24
3.3.5	Hydraulic Habitat Suitability – HHS . . . . .	24
3.4	Flussmorphologie und Feststoffhaushalt . . . . .	25
3.4.1	Stofftransport nach Meyer-Peter & Müller . . . . .	25
3.5	Statistische Kenngrößen . . . . .	26
3.5.1	Median . . . . .	26

3.5.2	Quartile und Quantile . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Methodik</b>	<b>27</b>
4.1	Digitales Geländemodell . . . . .	28
4.1.1	SMS – <i>Surface-Water Modeling System</i> . . . . .	28
4.1.2	Rauigkeiten . . . . .	29
4.2	Hydraulische Modellierung . . . . .	29
4.2.1	Hydrologische Eingangsdaten . . . . .	29
4.2.2	Hydro_AS-2D – Strömungsmodell . . . . .	30
4.3	Erarbeiten von Maßnahmen . . . . .	31
4.3.1	Istzustand . . . . .	31
4.3.2	Modellierung der Varianten . . . . .	31
4.4	Habitatmodellierung . . . . .	32
4.4.1	HEM – <i>Habitat Evaluation Model</i> . . . . .	32
4.4.2	WUA und HHS . . . . .	33
4.4.3	Untersuchte Arten . . . . .	33
4.5	Visualisierung der Ergebnisse . . . . .	33
4.5.1	Darstellung der Strömung . . . . .	33
4.5.2	Darstellung der Habitatverteilung . . . . .	34
4.6	Vergleich der Varianten . . . . .	34
4.6.1	Habitatverfügbarkeit über die Zeit . . . . .	34
4.6.2	Veränderung zum Istzustand . . . . .	35
4.6.3	Verifizierung der Wirksamkeit . . . . .	36
4.6.4	Statistischer Vergleich mit Box-Plots . . . . .	37
4.6.5	Wirksamkeit der Varianten . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>40</b>
5.1	Drau – Strecke 2 . . . . .	40
5.1.1	Istzustand . . . . .	40
5.1.2	Variante 1: steil reguliert . . . . .	44
5.1.3	Variante 2: Nebengerinne verfüllt . . . . .	48
5.1.4	Variante 3: Nebengerinne verbunden . . . . .	52
5.1.5	Habitatverfügbarkeit im Vergleich . . . . .	56
5.2	Ill – Strecke 2 . . . . .	63
5.2.1	Istzustand . . . . .	63
5.2.2	Variante 1: Bühnen hinterschnitten . . . . .	63
5.2.3	Variante 2: Umgehungsgerinne . . . . .	65
5.2.4	Variante 3: Streckenweise Aufweitung . . . . .	67
5.2.5	Habitatverfügbarkeit im Vergleich . . . . .	70
5.3	Inn – Strecke 1 . . . . .	73
5.3.1	Istzustand . . . . .	73
5.3.2	Variante: ausgedehnte Bühnenfelder . . . . .	73
5.3.3	Verlauf der WUA . . . . .	74
5.3.4	Habitatverfügbarkeit im Vergleich . . . . .	76
5.4	Inn – Strecke 2 . . . . .	79
5.4.1	Istzustand . . . . .	79
5.4.2	Variante: Schotterbänke unüberströmbar . . . . .	79

---

5.4.3	Verlauf der WUA . . . . .	80
5.4.4	Habitatverfügbarkeit im Vergleich . . . . .	82
5.5	Inn – Strecke 4 . . . . .	85
5.5.1	Istzustand . . . . .	85
5.5.2	Variante: Augebiet angebunden . . . . .	85
5.5.3	Wellenverformung im Vergleich . . . . .	86
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>89</b>
6.1	Probleme bei der Modellierung . . . . .	89
6.1.1	Erstmalige und dauerhafte Benetzung durch den Schwall . . . . .	89
6.2	Stranden der Fische . . . . .	89
6.3	Erfolgreiche Umsetzung . . . . .	89
<b>7</b>	<b>Conclusio</b>	<b>91</b>
7.1	Wenig Lebensraum für Jungfische . . . . .	91
7.2	Unterschiede zwischen Äsche und Bachforelle . . . . .	91
7.3	Strukturelle Verbesserungen möglich . . . . .	91
7.4	Aktivierung von Nebenarmen . . . . .	92
7.5	Feststoffhaushalt . . . . .	92
7.6	Positive Aussichten . . . . .	92
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>103</b>
8.1	Präferenzkurven . . . . .	103
8.1.1	Bachforelle . . . . .	103
8.1.2	Europäische Äsche . . . . .	104
8.2	Drau – Strecke 2 . . . . .	106
8.2.1	Istzustand . . . . .	106
8.2.2	Variante 1 . . . . .	107
8.2.3	Variante 2 . . . . .	115
8.2.4	Variante 3 . . . . .	117
8.3	Ill – Strecke 2 . . . . .	120
8.3.1	Variante 1 . . . . .	120
8.3.2	Variante 2 . . . . .	122
8.3.3	Variante 3 . . . . .	123
8.4	Inn – Strecke 1 . . . . .	124
8.4.1	Variante 1 . . . . .	124
8.5	Inn – Strecke 2 . . . . .	126
8.5.1	Variante 1 . . . . .	126
8.6	Inn – Strecke 4 . . . . .	127
8.6.1	Wellendämpfung . . . . .	127

# 1 Einleitung

Unter „Schwall“ versteht man den durch den Kraftwerksbetrieb bedingten raschen Anstieg und Abfall des Abflusses. Beim Schwallbetrieb wechseln einander der Schwall, ein durch Betrieb der Turbine künstlich erhöhter Abfluss, und der Sunk als darauffolgender Rückgang des Abflusses ab (ÖWAV 2008). Üblicherweise wird zu Zeiten, in denen ein starker Stromverbrauch herrscht (Spitzenlast), einmal oder mehrmals täglich, dieser Bedarf mit Kraftwerken im Schwallbetrieb abgedeckt.

Die Europäische Union hat es sich im Jahre 2000 zum Ziel gemacht, bis 2015 einen guten ökologischen Zustand für Fließgewässer zu erlangen (WRRL 2000, Artikel 4.1). Damit verbundene Vorteile sind u.a. eine gesunde und vermehrungsfähige Fischpopulation, die Erhaltung bereits rückläufiger Arten sowie gesteigerte Abundanz und Artenvielfalt von Fischen und Benthos. Bei der Bestandsaufnahme 2004/2007 des BMLFUW wurden 78 Gewässerstrecken festgestellt, die vom Schwall signifikant beeinflusst waren. Insgesamt waren in Österreich 811 km betroffen, die auch mit dem Risiko beurteilt wurden, einen guten ökologischen Zustand zu verfehlen. Für kleine und mittlere Gewässer wurde in der Analyse als Signifikanzgrenze ein relativ hohes Schwall/Sunk-Verhältnis von 5:1 herangezogen (vgl. NGP (2010)) – ökologische Beeinträchtigungen für Flora und Fauna können jedoch auch schon bei weniger ausgeprägtem Schwallbetrieb auftreten (Habersack u. Hauer 2012).

Der Einfluss des Schwallbetriebs kann entweder operational (Betrieb des Wasserkraftwerks) oder strukturell (Eingriffe in den Fluss) reduziert werden. Unter operationalen Änderungen kann z. B. ein oberes Limit des Sunk/Schwall-Verhältnisses verstanden werden, an das sich der Energieversorger halten muss. Strukturelle Maßnahmen sind wasserbauliche Veränderungen – z. B. Retentionsbecken als Ausgleich oder die Schaffung ökologisch wertvoller Strukturen im Flusslauf.

Habersack u. Hauer (2012) weisen im Projektbericht *Schwall\_2012* darauf hin, dass als Teil einer generellen Betrachtung die morphologische Heterogenität von Fließgewässerstrecken ein wesentlicher Parameter für die Einstufung des Schwalleinflusses auf den Gewässerlebensraum ist. Des weiteren seien Prognosemodelle wie die Habitatmodellierung ein wichtiges Bewertungsinstrument und für Fragestellungen dieser Art heranzuziehen.

## 1.1 Problemstellung

Schwallbetrieb stellt einen starken Eingriff in die natürliche Abflussdynamik eines Gewässers dar und beeinträchtigt die ökologische Funktionsfähigkeit. Die starken Wasserstandsschwankungen wirken sich erheblich auf Fische, Benthos und andere Organismen des Flusses und des gewässernahen Umlands aus (ÖWAV 2008; Habersack u. Hauer 2012).

Das *Projekt Schwall\_2012* zeigt diese ökologischen Probleme auf und weist auf die Notwendigkeit einer flusstypspezifischen Betrachtung hin, mit besonderer Berücksichtigung auf die Eigenschaften der Gewässergeometrie. Ein starre operationale Regelung eines Sunk/Schwall-Verhältnisses von z.B. 1:3 (wie derzeit vorgesehen) könnte aufgrund der Erkenntnisse zu einer „lose-lose“-Situation führen: einerseits starke wirtschaftliche Einbußen auf Seiten der Kraftwerksbetreiber und andererseits kaum Verbesserungen für die Gewässerökologie (vgl. Habersack u. Hauer (2012, S. 138f)).

Die vorliegende Arbeit greift die Problematik auf, dass nach wie vor Unkenntnisse über die notwendige Maßnahmenplanungen vorhanden sind.

## 1.2 Motivation

Weltweit sind viele Fließstrecken von Schwallbetrieb betroffen. Revitalisierung und „guter ökologischer Zustand“ sind für viele immer noch fremde Begriffe oder ein Thema, mit dem sich nur Umweltschützer befassen.

Das Umdenken, das mit der Wasserrahmenrichtlinie der EU (Richtlinie 2000/60/EG) Einzug gefunden hat, ist ein Schritt in die richtige Richtung und soll zu einer nachhaltigen und umweltfreundlichen Gewässernutzung führen.

Dass die Option zu einer Reduzierung der negativen Auswirkungen durchaus bereits vorhanden ist, zeigt als Beispiel die Schweiz: dort wurde mit 1. Jänner 2011 ein neues Gesetz beschlossen, das die Reduktion der Schwalleinflüsse mit Hilfe struktureller Maßnahmen vorsieht. Damit dieses Vorhaben finanziert werden kann, wird seit 2012 ein Aufschlag auf den Strompreis von 0,1 Rappen/kWh eingehoben (Tuhtan 2012, S. 15).

## 1.3 Ziele

Die Ziele dieser Masterarbeit bauen auf den bisherigen Erkenntnissen auf und sind:

- Entwicklung und Untersuchung konkreter wasserbaulicher Maßnahmen, um den Schwalleinfluss auf die Habitate aquatischer Organismen zu reduzieren. Dabei werden Varianten konzipiert und modelliert.
- Bewertung und Vergleich der Varianten sowie die Quantifizierung des ökologischen Nutzens mit Hilfe der Habitatmodellierung und geeigneter Parameter.

## 2 Untersuchungsgebiete

In diesem Kapitel findet sich eine Übersicht über die Bereiche, für die im Zuge dieser Arbeit schwalldämpfende Maßnahmen entwickelt wurden.

Alle hier angeführten Gewässerabschnitte waren bereits Teil des Schwallberichts 2012: „*Grundlagenuntersuchungen und Methodikentwicklung zur Bewertung des Schwall-einflusses bei unterschiedlichen Flusstypen – SCHWALL\_2012*“ (Habersack u. Hauer 2012).

Für die Orthofotos wurden die Satellitenbilder von [Bing Maps](#) (©Microsoft) verwendet. Die Lage der Messstellen kann am besten mit dem Online-Werkzeug [eHYD](#), entwickelt vom Lebensministerium, gesucht und aufgerufen werden. Hydrologische Daten entstammen dem Hydrologischen Jahrbuch 2010 (Hydrographischer Dienst in Österreich 2012).

### 2.1 Drau – Strecke 2

Das in der Äschenregion liegende Projektgebiet befindet sich flussab von Sachsenburg und ist ein Aufweitungsgebiet; das Gewässerregime lässt sich als nivo-glazial beschreiben (vgl. Habersack u. Hauer (2012, S. 14)).

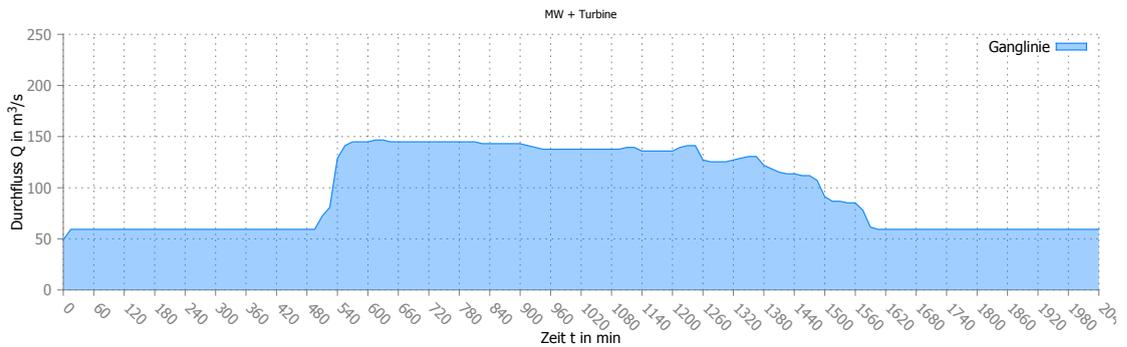
Die untersuchte Fließstrecke weist mittlerweile mehrere Bifurkationen und kleinere Nebengerinne auf, die mit dem Ziel geschaffen wurden, für die Gewässerökologie eine Bereicherung darzustellen.



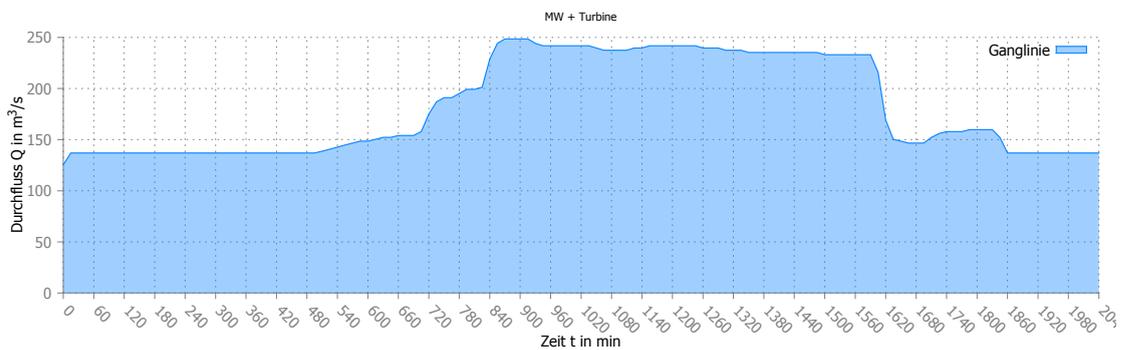
Abbildung 2.1: Drau Strecke 2 nach Sachsenburg  
(N 46°49'27" E 13°23'28")

### 2.1.1 Hydrologie

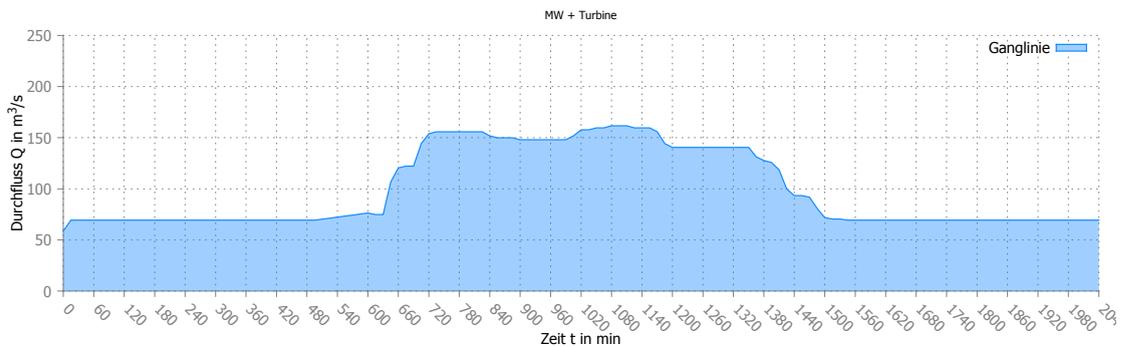
Ein Schreibpegel, der nach der Einmündung der Möll und unmittelbar an der Untersuchungsstelle liegt, ist Drauhofen (213199), an der ein jährliches MQ von  $107 \text{ m}^3/\text{s}$  und ein MJHQ (*Mittlerer Jährlicher Hochwasserabfluss*) von  $592 \text{ m}^3/\text{s}$  (Reihe 1976 – 2010) verzeichnet wird (Hydrographischer Dienst in Österreich 2012, S. OG 333).



(a) Frühling MQ+T

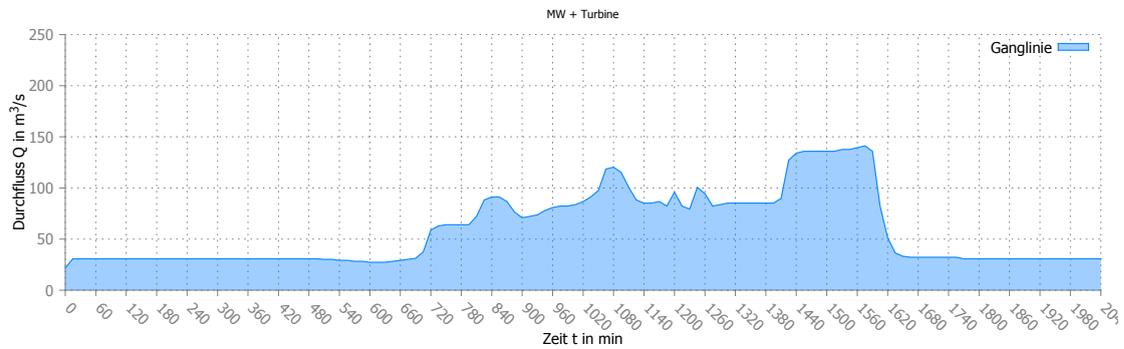


(b) Sommer MQ+T



(c) Herbst MQ+T

Abbildung 2.2: Tagesganglinien für Drau Strecke 2



(d) Winter MQ+T

Abbildung 2.2: Tagesganglinien für Drau Strecke 2 (Forts.)

## 2.2 III – Strecke 2

Die Ill ist ein Fluss, der zur Gänze in Vorarlberg verläuft und anschließend in den Alpenrhein einmündet. Er ist stark reguliert und wird energiewirtschaftlich hauptsächlich von den Vorarlberger Illwerken genutzt. Die untersuchte Strecke liegt flussab des Wasserkraftwerks Walgauwerk, das eine Fallhöhe von 162 m und ein Regularisierungsvermögen von 356 GWh aufweist (Vorarlberger Illwerke 2014).

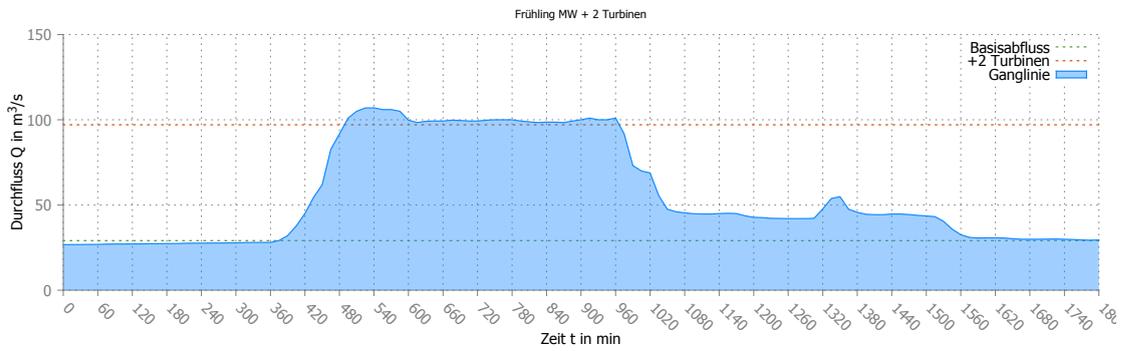


Abbildung 2.3: Ill Strecke 2 bei Fellengatter nahe Feldkirch  
(N 47° 13' 40" E 9° 36' 34")

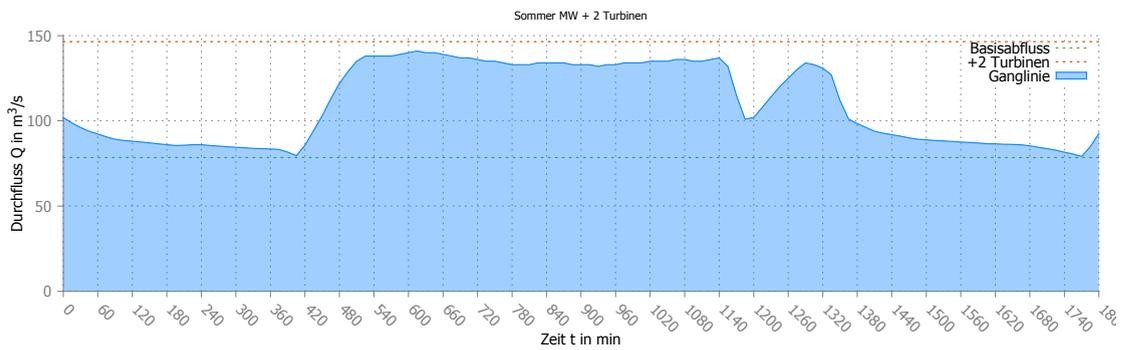
### 2.2.1 Hydrologie

Die nächstgelegene Messstelle ist der flussab des Untersuchungsgebiets gelegene Schreibpegel Gisingen (200147), an der ein mittlerer Durchfluss (MQ) von  $65,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (Reihe 1971 – 2010) ermittelt wurde (Hydrographischer Dienst in Österreich 2012, S. OG 92). Dort befindet sich auch eine von 2 Schwebstoffmessstellen des Rheingebiets.

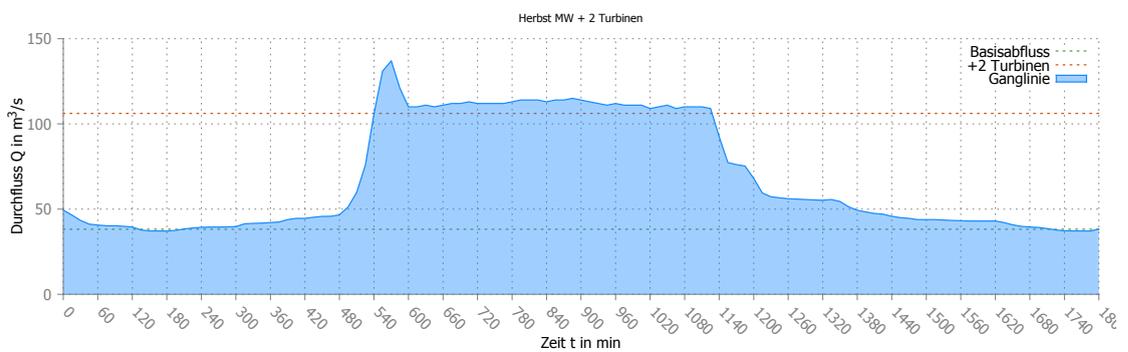
Für die hydrodynamische Berechnung wurden jedoch Schwall-/Sunk-Tagesganglinien der Messstelle oberhalb, in Frastanz (200121), verwendet – sh. Abbildung 2.4.



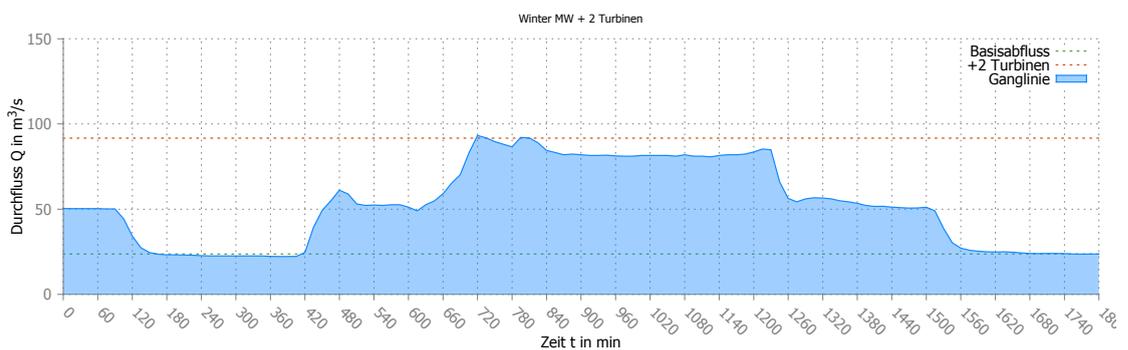
(a) Frühling MQ+2T



(b) Sommer MQ+2T



(c) Herbst MQ+2T



(d) Winter MQ+2T

Abbildung 2.4: Tagesganglinien für Ill Strecke 2

## 2.3 Inn – Strecke 1

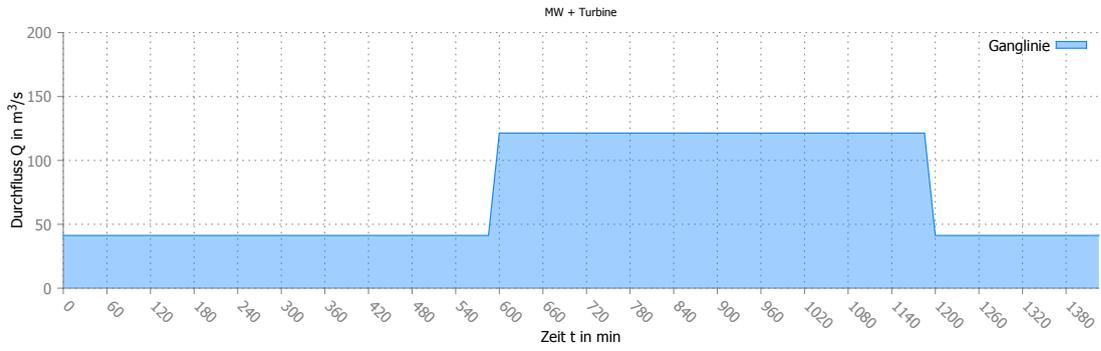
Am Inn wurden insgesamt vier Strecken untersucht. Die erste befindet sich in der Nähe von Telfs und stellt einen stark regulierten Gewässerabschnitt dar, der durch wasserbauliche Maßnahmen ökologisch aufgewertet werden soll (sh. Abschnitt 5.3).



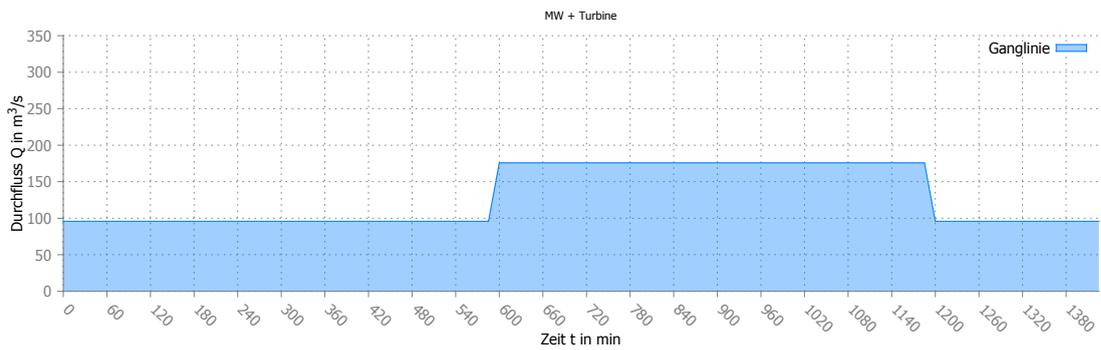
Abbildung 2.5: Inn Strecke 1 bei Telfs  
(N 47°18'06'' E 11°04'41'')

### 2.3.1 Hydrologie

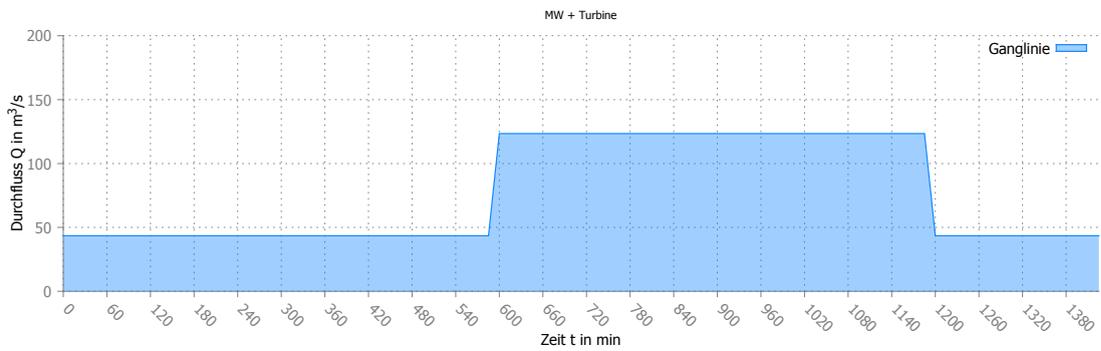
Der Inn ist ein wasserreicher Zubringer der Donau und entspringt in den Schweizer Alpen. Durch Gletscherschmelze und Regenfälle im Gebirge herrscht der größte Durchfluss im Sommer. Die Abbildung 2.6 zeigt den mittleren Abfluss der Saison und den Schwall der Turbinen.



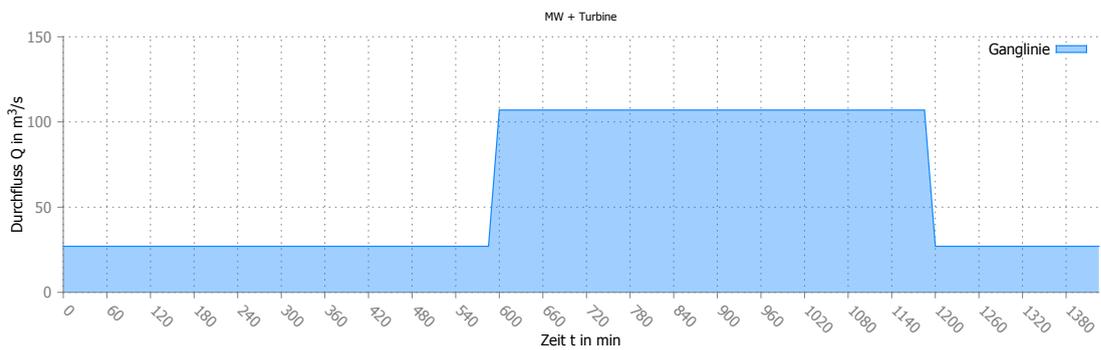
(a) Frühling MQ+T



(b) Sommer MQ+T



(c) Herbst MQ+T



(d) Winter MQ+T

Abbildung 2.6: Tagesganglinien für Inn Strecke 1

## 2.4 Inn – Strecke 2

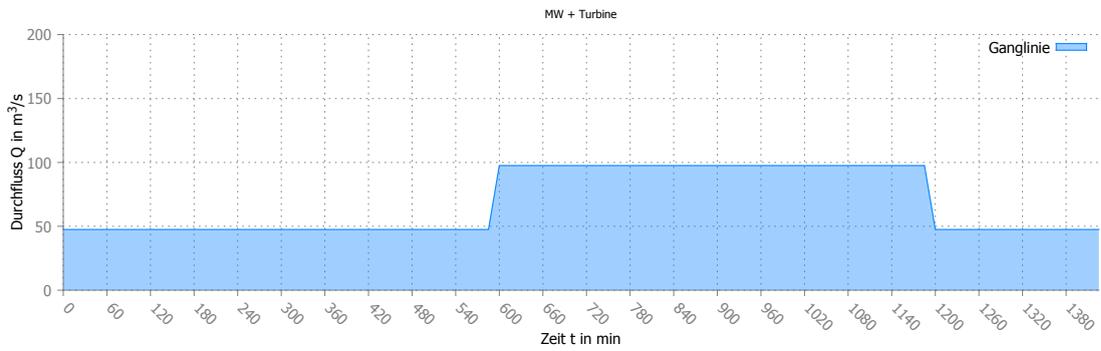
Diese Fließstrecke befindet sich oberhalb Telfs und zeichnet sich durch großflächige Schotterbänke, die im Sommer durchflossen und teilweise überflutet werden, aus – sowie durch Buhnen zur Ufersicherung am orographisch rechten Ufer.



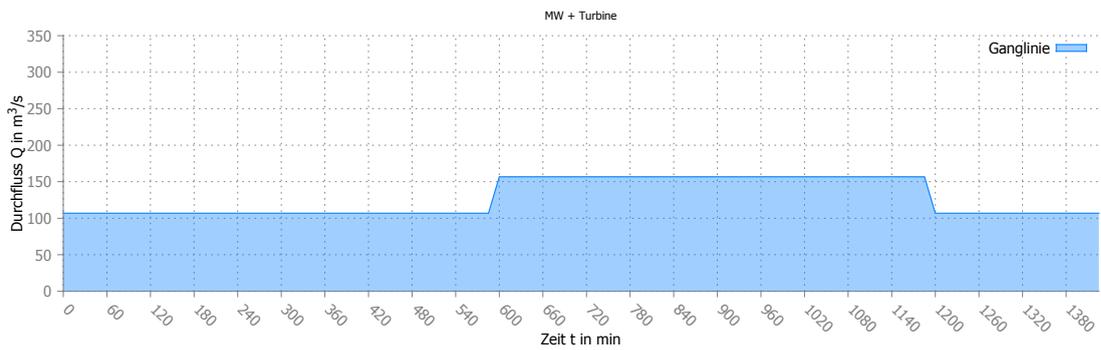
Abbildung 2.7: Inn Strecke 2 oberhalb Telfs  
(N 47° 17' 52" E 11° 02' 49")

### 2.4.1 Hydrologie

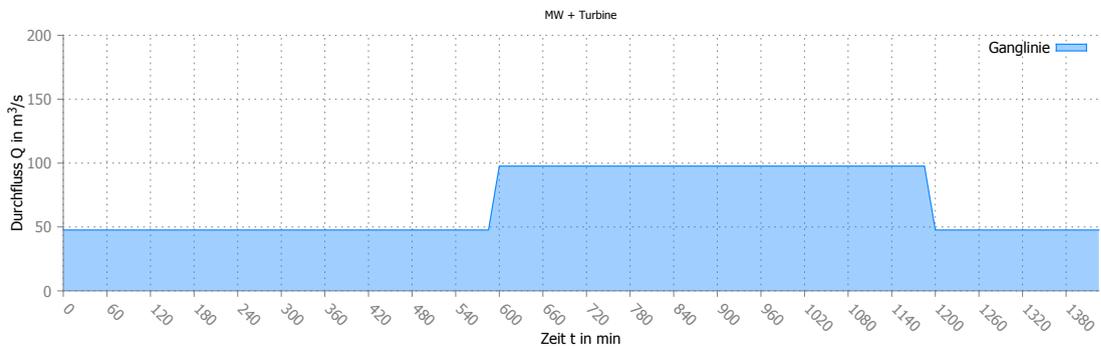
Die für die Berechnung (sh. Abschnitt 5.4) zugrunde gelegten Hydrographen können Abbildung 2.8 entnommen werden.



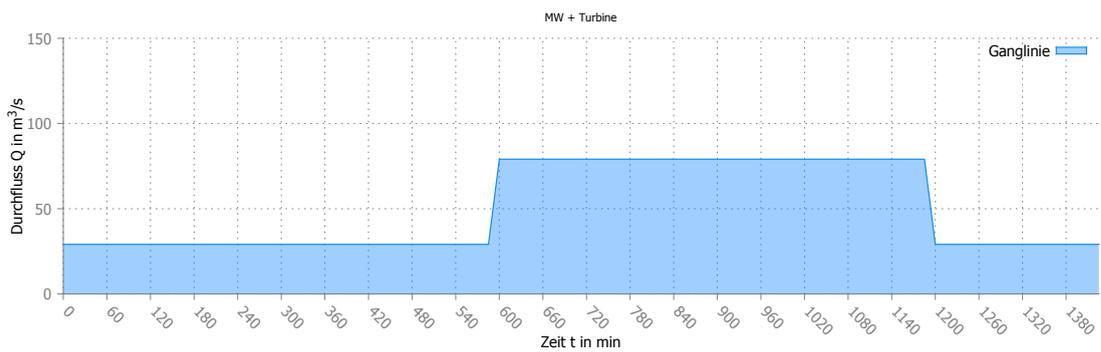
(a) Frühling MQ+T



(b) Sommer MQ+T



(c) Herbst MQ+T



(d) Winter MQ+T

Abbildung 2.8: Tagesganglinien für Inn Strecke 2

## 2.5 Inn – Strecke 4

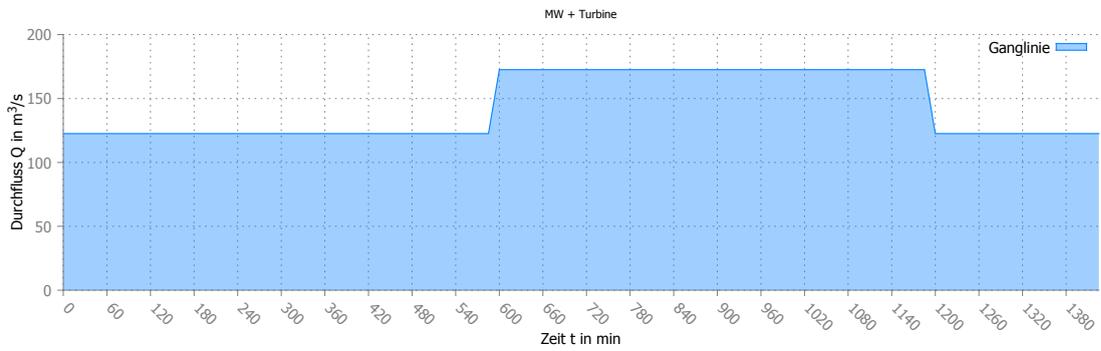
Für den vierten betrachteten Abschnitt des Inns, der nahe Imsterau gelegen ist, wird eine Untersuchung der Wellenverformung durch die Anbindung der Altarme durchgeführt. Für Details wird hiermit auf Abschnitt 5.5 verwiesen.



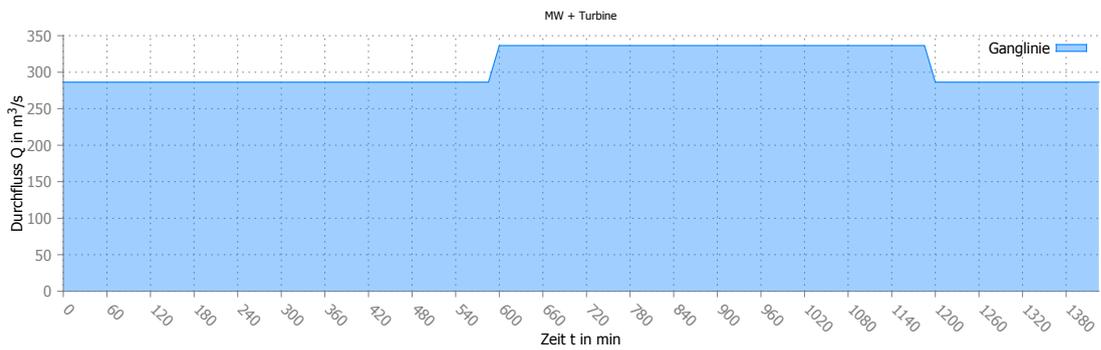
Abbildung 2.9: Inn Strecke 4 bei Imsterau  
(N 47°12'34" E 10°41'49")

### 2.5.1 Hydrologie

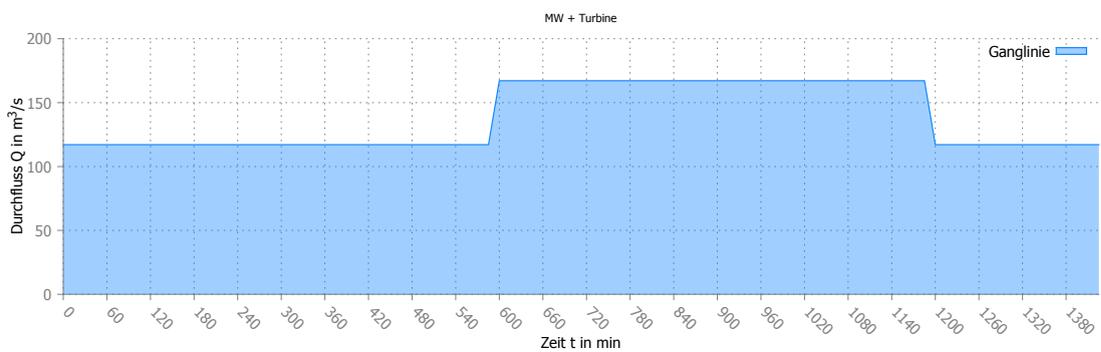
Abbildung 2.10 zeigt die hydrologischen Gegebenheiten an diesem Gewässerabschnitt.



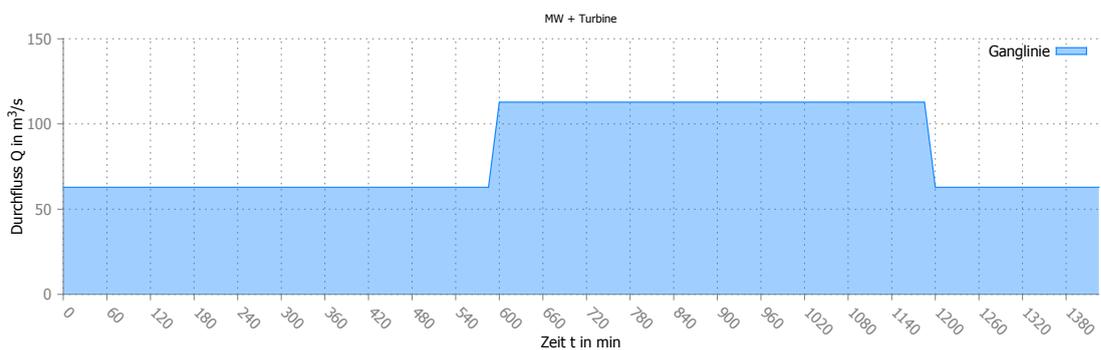
(a) Frühling MQ+T



(b) Sommer MQ+T



(c) Herbst MQ+T



(d) Winter MQ+T

Abbildung 2.10: Tagesganglinien für Inn Strecke 4

## 3 Grundlagen

### 3.1 Hydrodynamische Modellierung

Strömungsberechnungen beruhen auf den Erhaltungsgleichungen der Physik: Masse, Impuls und Energie in einem geschlossenen System sind konstant und müssen deshalb bei allen Prozessen und Umwandlungen konserviert werden.

#### 3.1.1 Navier-Stokes-Gleichungen

Als allgemeine Form existieren die Gleichungen von Navier-Stokes (sh. Gleichung 3.1) – sie stellen ein nicht-lineares, partielles Differenzialgleichungssystem dar, das durch numerische Methoden näherungsweise gelöst werden kann (vgl. ÖWAV (2007, S. 9)).

Für den vereinfachten Fall der inkompressiblen Flüssigkeiten mit konstanter Dichte gilt:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla \bar{p} + \nu \Delta \mathbf{v} + \bar{\mathbf{f}} \quad (3.1)$$

$\bar{p} = p/\rho$  ... Quotient aus Druck und Dichte,

$\bar{\mathbf{f}} = \mathbf{f}/\rho$  ... Quotient aus Volumenkraft und Dichte,

$\nu = \mu/\rho$  ... kinematische Viskosität

#### 3.1.2 Flachwassergleichungen

Die sogenannten Flachwassergleichungen (Gleichung 3.2 bis 3.4) stellen eine Vereinfachung der Navier-Stokes-Gleichungen dar, der folgende Annahmen zugrunde liegen (ÖWAV 2007, S. 12):

1. Die Wellenlänge ist sehr viel größer als die Wellenhöhe (Flachwasserannahme).
2. Die Geschwindigkeiten (und damit der Impuls) in der vertikalen Richtung können deshalb vernachlässigt werden.
3. Der Druck wird als hydrostatisch angenommen, da die Stromlinienkrümmungen gering sind.

Im Falle einer *2-dimensionalen Modellierung*:

4. Die Geschwindigkeiten in Längs- und Querrichtung werden berücksichtigt.
5. Die Geschwindigkeiten werden über die Wassertiefe gemittelt.

Durch Einsetzen in die Navier-Stokes-Gleichungen und Umformen gilt:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial y} = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}q + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{q^2}{h} + \frac{gh^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q \cdot r}{h}\right) = gh(I_{S,x} - I_{E,x}) \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}r + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q \cdot r}{h}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{r^2}{h} + \frac{gh^2}{2}\right) = gh(I_{S,y} - I_{E,y}) \quad (3.4)$$

$q, r$  ... spezifischer Abfluss in x- und y-Richtung,

$x, y$  ... Längen in Längs- und Querrichtung,

$h$  ... Wassertiefe,

$g$  ... Erdbeschleunigung,

$I_S$  ... Sohlgefälle in Prozent,

$I_E$  ... Energieliniengefälle in Prozent

### 3.1.3 Numerische Verfahren

Bei numerischen Verfahren werden die kontinuierlichen Differenzialgleichung, die die Strömung exakt beschreiben, in Differenzen unterteilt, um die Vorgänge in eine Form zu bringen, die für einen Computer berechenbar ist. Diesen Vorgang nennt man Disretisierung – der räumliche Bereich, über den die Differenzialgleichung gemittelt wird, nennt man *Element* (vgl. ÖWAV (2007, S. 20f)). Analog dazu muss auch die Zeit diskretisiert werden – den zeitlichen Betrachtungsabschnitt, für den wiederum nur ein gemittelt Ergebnis berechnet wird, nennt man *Timestep*.

Außerdem liegen Geländedaten (z. B. Laserscan oder eine Vermessung) auch immer diskontinuierlich und in einer mehr oder weniger groben Auflösung vor (Punktraster im Abstand von mehreren Dezimetern bzw. Metern).

Hydrographische Daten für die Zuflussganglinie kommen üblicherweise von Messstellen und liegen auch in einer mehr oder weniger genauen Diskretisierung vor – bei viertelstündlichen Datenreihen ergibt sich somit auch ein Timestep von 15 min für die Modellierung.

### 3.1.4 2-dimensionales Modell

Da die Rechenleistung in den letzten Jahren immer weiter angestiegen ist, ist es möglich geworden, auf üblich erhältlichen Computern Modelle zu berechnen, für die man früher „Supercomputer“ gebraucht hätte. 2-D-Modelle eignen sich besonders für die Ermittlung von Überflutungsflächen (z. B. für Hochwasseranalysen) – der wesentliche Vorteil ist, dass der Fließweg vom Modell ohne Zutun des Anwenders berechnet wird (vgl. ÖWAV (2007, S. 24)). In 1-D-Modellen fehlt diesbezüglich die Information des Geländes zwischen den im Raum spärlich verteilten Profilen.

Die erforderliche Datengrundlagen für eine 2-dimensionale Strömungsmodellierung sind (vgl. ÖWAV (2007, S. 27)):

- Digitales Geländemodell in hoher Genauigkeit inkl. Gewässersohle, Einbauten, Dammkronen, Verkehrswege usw.
- Kenntnis über Bewuchs und Rauigkeitsverteilungen (z. B. Strickler-Beiwert) im Fluss (Sohle und Böschung) und in den Vorländern
- Lage der Zuflussränder mit dort auftretender Zuflussganglinie

- Lage des Abflussrands mit Wasserstandsganglinie oder Energieliniengefälle

3-D-Modelle werden aufgrund ihrer großen Anforderungen an Modellerstellung und Rechenleistung nur für Detailanwendungen (z. B. im direkten Bereich von Bauwerken) verwendet (vgl. (ÖWAV 2007, S. 24)).

### 3.1.5 Instationärer Abfluss

Schwall und Sunk sind per Definition positive und negative Änderungen im Abfluss. Das bedeutet, dass eine instationäre Strömung (*unsteady flow*) in Form einer Ganglinie vorliegt und in das Modell eingespeist werden muss – dadurch ergeben sich unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen. Im Gegensatz versteht man unter einem konstanten Durchflusswert einen stationären Abfluss (*steady flow*).

## 3.2 Ökologie

### 3.2.1 Fische als Zeigerorganismen

Da die Gewässerfauna aufgrund ihrer Komplexität nicht in ihrer Gesamtheit erfasst werden kann und die Ansprüche sämtlicher Gewässerbewohner nicht bekannt sind, muss [...] auf sogenannte Zeigerorganismen zurückgegriffen werden (Giesecke u. Mosonyi 2009, S. 766). Bei der weitergehenden Beurteilung der Funktionsfähigkeit eines Fließgewässers als Lebensraum wird davon ausgegangen, dass die Befriedigung der Ansprüche dieser Indikatorarten als hinreichende Bedingung für den Erhalt des Gesamtsystems angesehen werden kann.

Die Hauptvorteile von Fischen als Indikatoren im Rahmen von Untersuchungen der physikalischen Habitate sind vor allem folgende (Schmutz u. a. 1993; Spindler 1997, S. 77):

- Ein großer Anteil der heimischen Fischarten besitzt durch stark strukturgebundene Lebensweise ein hohes Indikationspotential für die gewässermorphologische Ausstattung des jeweiligen Habitates.
- Als Primär- und Sekundärkonsumenten sind Fische Endglieder der Nahrungsnetze; sie spiegeln die trophischen Verhältnisse im Gewässer wider und reagieren oft sehr empfindlich auf Schadstoffe.
- Fische zählen zu den langlebigsten Organismen in aquatischen Ökosystemen, wodurch sie über einen längeren Zeitraum sowohl Indikatorwert für negative Einzelereignisse als auch für kumulative Einflüsse besitzen.
- Fische sind mobile Organismen und dadurch gute Zeiger für die Kontinuumsverhältnisse von Fließgewässern.
- Aufgrund der Körpergröße der Fische steht eine höhere Zahl diagnostischer Methoden zur Verfügung als beispielsweise bei Wirbellosen.
- Fische stellen in der Regel die einzigen direkt genutzten Lebewesen limnischer Ökosysteme dar; damit kommt ihnen in der subjektiven Betrachtung des Menschen ein viel größerer Stellenwert zu als Kleinlebewesen.

- Anhand von Gesundheitsschäden von Fischen können durch andere Methoden gewonnene Befunde über Gewässerbelastungen nicht nur ergänzt, sondern auch für die breite Öffentlichkeit und Entscheidungsträger veranschaulicht werden.
- Oftmals liegt historisches Datenmaterial bezüglich der Verbreitung gewässertypischer Fischarten vor.

Nachteile sind nach Giesecke u. Mosonyi (2009, S. 767):

- Durch das Wanderungsverhalten und die hohe Mobilität sind lokale Zuordnungen bzw. die Bestätigung von Modellierungsergebnissen eingeschränkt.
- Aufgrund der fischereilichen Bewirtschaftung sind in vielen Gewässern die Populationen verfälscht oder es sind standortfremde Arten angesiedelt.
- In Gewässern ohne Fischbesiedlung, wie z. B. den hochalpinen, können Fische nicht als Indikatoren herangezogen werden.

### 3.2.2 Habitate und Skala

Unter „Habitat“ wird jene Raumeinheit verstanden, die der Ökologe als Lebensraum für einen Organismus erachtet.

Auf dem Gebiet der Fischökologie spricht man von verschiedenen Größenskalen, die den Lebensraum mehr oder weniger genau auflösen (sh. Tabelle 3.1) und unterschiedliche Parameter zur Betrachtungsweise heranziehen.

Tabelle 3.1: Habitatskala Einteilung (Giesecke u. Mosonyi 2009, S. 755)

	<b>Mikrohabitat</b>	<b>Mesohabitat</b>	<b>Makrohabitat</b>
<b>Abmessungen</b>	cm bis mehrere m	10 m bis mehrere 100 m	100 m bis mehrere km
<b>Parameter</b>	lokale Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten, Substrate	mittlere Breiten, Tiefen, Fließgeschwindigkeiten, Gewässerstrukturparameter	Temperatur, Gerinne, Morphologie, Abflussverhalten

Hoch auflösende digitale Geländeaufnahmen in Kombination mit einer Echolot-Vermessung des Gerinnes und einer Computersimulation der hydraulischen Abflussverhältnisse ermöglichen eine Betrachtung und Modellierung auf Mikro- und Mesohabitatebene (sh. Abschnitt 3.3).

### 3.2.3 Auswirkungen des Schwall

Häufig festgestellte Probleme mit vom Schwall beeinflussten Flüssen sind (vgl. Limnex (2004, S. 2)):

- Beeinträchtigung der natürlichen Fortpflanzung bei Fischen
- Verminderung des Fischbestandes

- abnehmende Arten- und Individuenzahl bei wirbellosen Bewohnern der Flusssohle (v.a. Insektenlarven)
- Abschwemmen von Wirbellosen und Jungfischen bei Schwallbeginn
- Stranden dieser Organismen auf den trockenfallenden Uferstreifen bei Schwallrückgang

Eine Knappheit an Lebensräumen für bestimmte Arten oder Altersstadien kann jedoch auch während natürlichen Hochwasserspitzen auftreten. Die großen hydraulischen Belastungen können von schwimmschwächeren Fischen (wie z. B. der Bachforelle) nicht mehr toleriert werden. Dieser Umstand ist allerdings auch in natürlichen Gewässern zu beobachten und stellt bei Vorhandensein geeigneter Rückzugsgebiete keine Gefährdung dar (vgl. Giesecke u. Mosonyi (2009, S. 776)).

Schwallbedingte Abflussschwankungen unterscheiden sich jedoch von Hochwasserereignissen in einigen Punkten bedeutend (vgl. Limnex (2004); ÖWAV (2008)):

- Der Schwallabfluss tritt regelmäßig und mit hoher Frequenz auf. Typisch ist zum Beispiel ein täglicher Schwall während der Mittagszeit. Natürliche Hochwässer treten sehr viel seltener und unregelmäßig auf. Diese häufige, unvorhersehbare Störung durch die Schwälle führt zu sehr unwirtschaftlichen Lebensbedingungen im Gewässer.
- Der Anstieg des Abflusses und das Absinken desselben sind sehr viel schneller als bei einem natürlichen Hochwasser. Dieser rasche Wechsel des Abflusses übersteigt oft die Möglichkeiten der Fauna zur Anpassung.
- Natürliche Hochwässer können sich vorher „ankündigen“, beispielsweise durch ein Ansteigen des Grundwasserspiegels vor dem Eintreffen der Hochwasserwelle. Gewisse Organismen scheinen auf diese Weise das bevorstehende Ansteigen des Wasserspiegels frühzeitig zu spüren und haben mehr Zeit, Deckung zu suchen.
- Während des Winters wird das im Sommer zurückgehaltene Wasser aus den hochgelegenen Speicherseen abgelassen und zur Produktion von Spitzenenergie genutzt. Das hat zur Folge, dass der Schwallbetrieb im Winterhalbjahr oft am ausgeprägtesten ist. Natürlicherweise ist aber gerade der Winter eine Niederwasserperiode, die sich durch gleichmäßig niedrige Abflüsse auszeichnet.

Besonders in anthropogen veränderten und genutzten Gewässern sind sensible Gebiete, wie beispielsweise Laichhabitats und Aufenthaltsorte der juvenilen Fische, besonders schützenswert und sollen stärker gefördert werden als solche, deren Aufgaben leichter durch andere Abschnitte übernommen werden können (vgl. Giesecke u. Mosonyi (2009, S. 777)).

### 3.2.4 Untersuchte Organismen

Die untersuchten Fischarten gehören der Familie *Salmonidae* (Lachsfische) an – sie sind beide rheophil, also strömungsliebend, und lithophil – sie bevorzugen steinig und kiesiges Sohlsubstrat zum Ablaichen. (vgl. Haunschmid u. a. (2006, S. 47)).

### Bachforelle (*Salmo trutta fario*)

Diese Spezies (Abbildung 3.1b) ist die Leitfischart des Epi- und Metarhitral (= Forellenregion) und teilt sich den Lebensraum vor allem mit der Koppe. Ihr bevorzugtes Sohlsubstrat sind Fels und grobe Steine (vgl. Haunschmid u. a. (2006, S. 23f)).

### Europäische Äsche (*Thymallus thymallus*)

Wird das Gefälle des Flusslaufes flacher, gesellt sich auch die Äsche (Abbildung 3.1a) als Leitfischart hinzu – sie ist vor allem im Hypo-Rhitral (= Äschenregion) anzutreffen und wird begleitet von Bachforelle, Koppe, Huchen, Gründling und Aitel. Diese Fische bevorzugen grobe Steine und Kies als ihr Habitat (vgl. Haunschmid u. a. (2006, S. 24)).



(a) Europäische Äsche (KFV Mallersdorf 2013)



(b) Bachforelle (U. S. Fish and Wildlife Service 2005)

Abbildung 3.1: Untersuchte Fischarten

#### 3.2.5 Altersstadien

Für die Habitatanalyse wurden juvenile Fische des Altersstadiums 0+ herangezogen, da bei der Modellierung darauf geachtet werden sollte, auf den schwächsten Flussbewohner Rücksicht zu nehmen.

### 3.3 Habitatmodellierung

Durch die numerische Berechnung der Hydraulik ist es auch möglich geworden, mit dem Computer festzustellen, wo als Lebensraum geeignete Flächen in Fließgewässern zu finden sind, ohne eine länger andauernde flächenhafte Beobachtung durchführen zu müssen.

Die Vorteile des Einsatzes von Habitatmodellen für gewässerökologische Fragestellungen sind vor allem in den folgenden Zusammenhängen begründet (Hauer 2008):

- Der ökologische Zustand eines Gewässersystems ist unmittelbar mit den Lebensverhältnissen der typischerweise angesiedelten Lebewesen gekoppelt.
- Mit Habitatmodellen kann der Einfluss von Abfluss- und Strukturänderungen auf Fische, Invertebraten und Makrophyten vorausgesagt werden.
- Abflussänderungen in Fließgewässern wirken sich primär auf Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten und Substratzusammensetzung aus, die alle Hauptfaktoren der Habitatqualität und -modellierung sind.

- Durch den Bezug des Habitatangebots auf den Abfluss wird eine quantitative Basis geschaffen, die es erlaubt, ökologische Bewertungen den Nutzungsansprüchen gegenüberzustellen.

Die Basis für die Habitatmodellierung bilden folgende Eingangsdaten:

- eine hydraulische Berechnung der Strömung im Beobachtungsgebiet
- vor Ort ermittelte Präferenz einer Spezies für bestimmte Parameter (z. B. Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit)

Die Modellierung von Lebensräumen kann, wie in dieser Forschungsarbeit, auch dazu verwendet werden, zu eruieren, wie und in welchem Ausmaß theoretisch die ökologische Situation verbessert werden kann. Somit kann bereits im Vorhinein – noch bevor Maßnahmen umgesetzt wurden – abgeschätzt werden, welche Auswirkungen eine geplante Variante auf die Fauna haben wird und wo wertvolle Lebensräume zerstört werden oder neu entstehen können.

### 3.3.1 Präferenzkurven

Durch Betauchen und Zählen der Individuen einer bestimmten Art (unterschiedlicher Größe bzw. Altersstadien) kann aus dieser beobachteten Stichprobe auf die Nutzungspräferenz einer Spezies oder eines Altersstadiums geschlossen werden.

Um eine Korrelation zu physikalischen Größen, die am Computer modellierbar sind, herstellen zu können, werden bei Fischen z. B. die Parameter Wassertiefe (3.2a) und Fließgeschwindigkeit (3.2b) erfasst und können gemeinsam mit der beobachteten statistischen Häufigkeitsverteilung als sogenannte Präferenzkurve dargestellt werden.

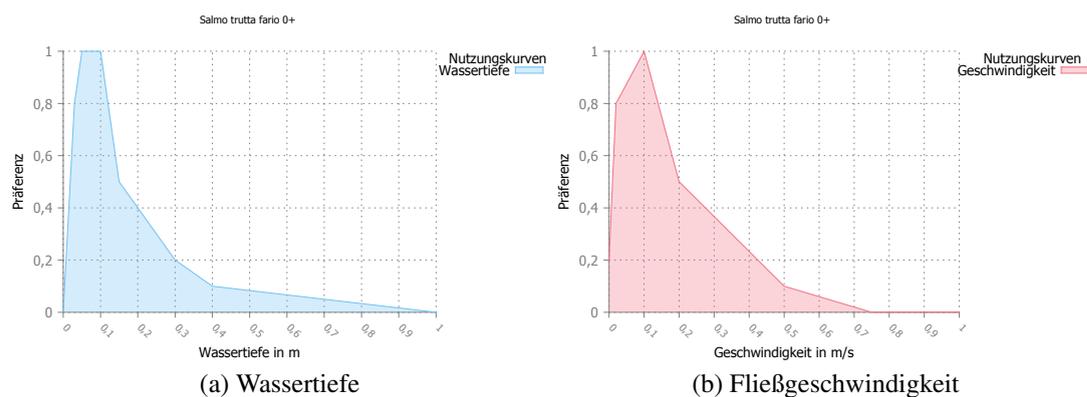


Abbildung 3.2: Präferenzkurven für *Salmo trutta fario* 0+

### 3.3.2 Abhängigkeit von Art und Alter

Die Präferenz für eine bestimmte Wassertiefe bzw. Fließgeschwindigkeit ist von Art zu Art verschieden und ändert sich auch mit dem Älterwerden des Individuums. In Abbildung 3.2 sind die beiden Kurven getrennt für die „0+“-Bachforelle dargestellt. Die Abbildungen 3.3a und 3.3b zeigen, dass ältere (1- bzw. 2-jährige) Individuen andere

Bedürfnisse zeigen. Die Bachforelle gehört der rheophilen Gattung *Salmo* an, die generell größere Fließgeschwindigkeiten bevorzugt.

Hält sich die junge Bachforelle noch bevorzugt in Wassertiefen um die 10 cm auf, ist die adulte Form häufiger in 50 cm oder noch tieferen Gegenden zu finden und generell nicht so empfindlich auf Wasserstandsschwankungen wie die Fischlarven.

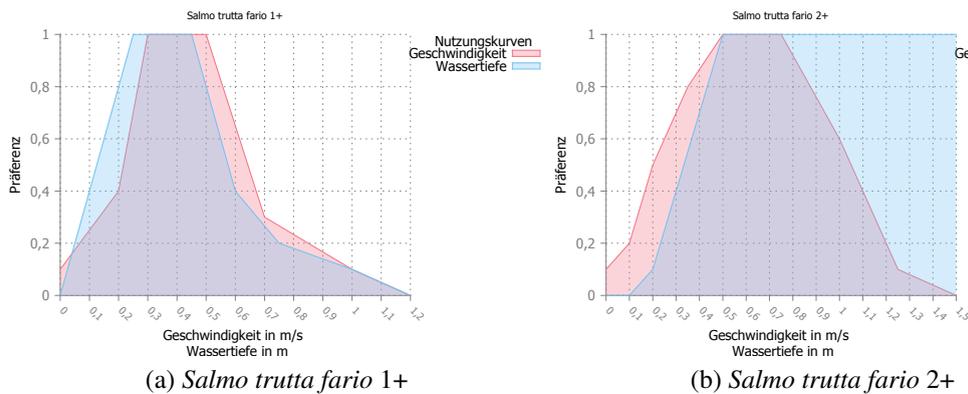


Abbildung 3.3: Präferenzkurven für ältere Exemplare

In Abbildung 3.4 ist zu erkennen, dass die beiden Arten bereits nach einigen Monaten Wachstum sehr unterschiedliche Standortpräferenzen aufweisen. Der gut an die Strömung angepasste Körperbau der Äsche ermöglicht ihr, ein größeres Gebiet zu besiedeln und flexibler auf Schwankungen im Abfluss zu reagieren.

Direkt nach dem Schlüpfen, zum Beginn der Entwicklung, ist die Äsche jedoch ebenso schwimmschwach und benötigt – wie die Bachforelle – flache strömungsberuhigte Zonen.

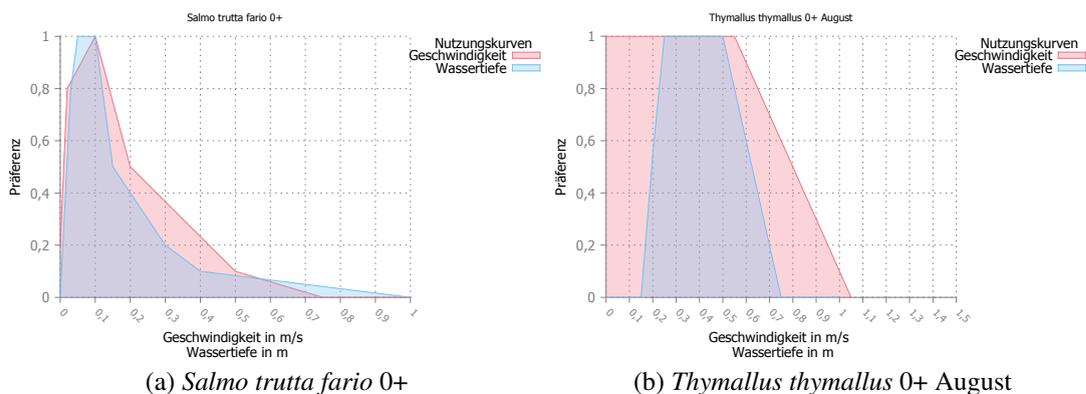


Abbildung 3.4: Präferenzkurven von Bachforelle und Äsche im Vergleich

Für weitere Präferenzkurven von Bachforelle und Äsche wird auf den Anhang 8.1 auf Seite 103 verwiesen. Die Datengrundlage für die Äsche stammt von Unfer u. a. (2012).

### 3.3.3 Habitat Suitability Index

Der „Habitat Suitability Index“ (kurz: HSI) beschreibt die Eignung einer untersuchten Flächenzelle (oder bei 3-D-Modellen: einer Volumenzelle) als Habitat für eine Spezies, in Anbetracht ihrer Standortansprüche und der vorhandenen Modellierungsergebnisse. Dabei werden sämtliche Teil-Suitability-Indizes multipliziert:

$$HSI \equiv SI_{total} = \prod_{i=1}^I SI_i \quad (3.5)$$

Suitability-Indizes können für verschiedene Parameter durch Sampling in-situ bestimmt werden: zum Beispiel berücksichtigt  $SI_{Choriotop}$  das Sohlsubstrat, welches für die Eignung der Gewässersohle als Laichhabitat sowie auch für die im Boden lebenden Organismen (z. B. Fliegenlarven) einen wichtigen Faktor darstellt.

Für den einfachen und konkret vorliegenden Fall, dass nur die Parameter Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit in Frage kommen, kann Gleichung 3.5 vereinfacht geschrieben werden als:

$$SI_{total} = SI_{Tiefe} \cdot SI_{Geschw.} \quad (3.6)$$

Das Ergebnis ist immer eine Zahl zwischen 0 und 1, die als Präferenz der Spezies in Prozent aufgefasst werden kann. Hat eine Flächenzelle einen HSI von 1, so ist er sehr gut als möglicher Lebensraum geeignet – es bedeutet jedoch nicht, dass sich zu 100 % ein Tier dort aufhalten wird.

### 3.3.4 Weighted Usable Area – WUA

Die *Weighted Usable Area* (zu deutsch: „gewichtete nutzbare Fläche“) – im Folgenden WUA genannt – beschreibt zahlenmäßig das im Untersuchungsgebiet vorhandene Areal, das dem Tier als möglicher Lebensraum zur Verfügung steht.

Um die gesamte WUA zu ermitteln, wird von jeder Zelle das Produkt der Fläche und dem ermittelten Suitability Index gebildet und über den untersuchten Abschnitt summiert, siehe Gleichung 3.7 (Gore u. Nestler 1988).

$$WUA = \sum_{i=1}^n SI_{total} \cdot A_i = f(Q) \quad [m^2] \quad (3.7)$$

Das Ergebnis ist eine aussagekräftige und relativ genaue Schätzung des vorhandenen Habitats – die WUA ist deshalb gut geeignet, um verschiedene Varianten und den Istzustand miteinander zu vergleichen.

### 3.3.5 Hydraulic Habitat Suitability – HHS

Eine andere Möglichkeit ist, dieses integrale Habitatangebot durch die vom Wasser benetzte Fläche zu teilen, um den HHS-Index zu erhalten (Gleichung 3.8) (Stalnaker u. a. 1995):

$$HHS = \frac{1}{A_{ges}} \cdot \sum_{i=1}^n A_i \cdot SI_i = f(Q) \quad [\%] \quad (3.8)$$

Dieser Index stellt demnach das Habitatangebot als prozentualen Wert dar und eliminiert so den Einfluss der mit dem Abfluss veränderlichen benetzten Fläche.

Beide Kennwerte stellen als abflussabhängige Funktionen wichtige Hilfsmittel bei der Bewertung des ökologischen Zustands von Gewässerabschnitten dar, da zum einen die Gegenüberstellung mit Referenzstrecken möglich ist, zum anderen die Entwicklung des Habitatangebots mit dem Abfluss nachvollzogen werden kann (vgl. Bovee (1986)).

### 3.4 Flussmorphologie und Feststoffhaushalt

Nicht nur die Hydrologie eines Flusses ändert sich zeitabhängig – auch die Morphologie unterliegt immer wiederkehrenden Veränderungen. Durch Kumulation dieser Ereignisse über die Zeit zeigen sich auch großräumige Entwicklungen der Sohle, der Ufer oder des gesamten Laufs eines Fließgewässers – der Grund dafür sind Erosion, Stofftransport und Sedimentation von Material.

Wasserbauliche Eingriffe in Fließgewässern können einen großen Einfluss auf den Feststoffhaushalt des Systems und somit auf die Gestalt des Flusses haben:

- Wehr- und Stauanlagen verhindern, dass Geschiebe von oben nach unten gelangt – sie stören das Kontinuum und bewirken ein Defizit an Feststoff im Unterlauf.
- Regulierung und Begradigung von Flüssen können zu Sohleintiefungen führen.
- Brückenpfeiler erzeugen verstärkte Turbulenz in ihrem Umfeld, die die Kolkbildung begünstigen kann.
- Aufweitungen bewirken (auf Grund geringerer Sohlschubspannungen) Anlandungen und können dadurch neue Strukturen entstehen lassen.

#### 3.4.1 Stofftransport nach Meyer-Peter & Müller

Um diese physikalischen Prozesse beschreiben zu können, gibt es eine Vielzahl mathematischer Ansätze. Ein Parameter, der für die Quantifizierung des transportierten Materials verwendet wird, ist der Geschiebetrieb (in kg/s/m) – er beschreibt, wie viel Sediment (Masse) pro Meter und Zeiteinheit im beobachteten Querschnitt beim vorherrschenden Abfluss weiter transportiert werden kann. Außerdem kann er auch als Randbedingung, die am Einlauf einer modellierten Strecke definiert wird, fungieren.

Für die Berechnung des Geschiebetriebs findet die erweiterte Formel von Meyer-Peter & Müller Anwendung (Hydrotec a):

$$g_s = \Phi \sqrt{(\rho_r - 1)g} \cdot d_m^{\frac{3}{2}} \quad (3.9)$$

$$\Phi = c_{MP} (\Theta' - \Theta_{cr})^{\frac{3}{2}} \quad \Theta' = \mu \frac{h \cdot J}{(\rho_r - 1) \cdot d_m} \quad \mu = \left( \frac{k_{st}}{k'_{st}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3.10)$$

$h$  ... Wassertiefe,

$g$  ... Erdbeschleunigung,

$d_m$  ... maßgebender Korndurchmesser,

$\rho_r$  ...  $\rho_r = \frac{\rho_s}{\rho_w}$  relative Dichte ( $\rho_w$  = Dichte des Wassers),

$\mu$  ... Ripple-Faktor,

$k_{st}$  ... Gesamter Strickler-Wert,

$k'_{st}$  ... Kornreibungsanteil des Strickler-Werts,

$\Theta_{cr}$  ... kritische dimensionslose Schubspannung (kritischer Shields-Parameter),

$c_{MP}$  ... Faktor zwischen 2 und 8,

$J$  ... Reibungsgefälle berechnet nach Manning-Strickler-Formel:  $J = \frac{v^2}{k_{st}^2 h^{4/3}}$

Der kritische Shieldsparameter  $\Theta_{cr}$  kann dabei dem Shields-Diagramm entnommen werden.

Für die Kornreibung  $k'_{st}$  kann als Richtwert die Beziehung 3.11 verwendet werden (Hydrotec a).

$$k'_{st} = 21 \cdot d_m^{-1/6} \quad (3.11)$$

Bei kiesführenden Flüssen ist die Verwendung der Konstante  $\Phi$  nach Meyer-Peter & Müller von 0,047 oder der vollturbulente Grenzwert in der Bandbreite 0,050 bis 0,055 empfehlenswert (Hydrotec a).

### 3.5 Statistische Kenngrößen

Um eine aussagekräftige Analyse über die Verteilung der verfügbaren Habitate (WUA) zu ermöglichen und sie integriert über das gesamte Schwallereignis sinnvoll bewerten zu können, eignet sich die Ermittlung einiger statistischer Kenngrößen.

#### 3.5.1 Median

Der Median ist so definiert, dass die Hälfte der Werte der Stichprobe über ihm und die Hälfte unter ihm liegen. Er wird deshalb auch als das 50%-Quantil bezeichnet. Berechnet wird er nach Gleichung 3.12 oder 3.13 – vereinfacht gesagt werden dabei alle Werte der Größe nach sortiert, und der mittlere Wert wird ausgewählt.

Der Vorteil gegenüber dem Mittelwert (z. B. arithmetisches Mittel) ist, dass er gegenüber Ausreißern stabiler ist.

In der Habitatmodellierung bietet sich deshalb ein Vergleich der unterschiedlichen Varianten über diese Kenngröße an.

$$\tilde{x} = x_{\frac{n+1}{2}} \quad \text{wenn } n \text{ ungerade} \quad (3.12)$$

$$\tilde{x} = \frac{1}{2} \left( x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1} \right) \quad \text{wenn } n \text{ gerade} \quad (3.13)$$

#### 3.5.2 Quartile und Quantile

Es gibt zwei Quartile – das untere und obere, bei denen 25% bzw. 75% der Werte der Stichprobe darunter liegen. Je weiter die Quartile von einander entfernt, desto größer ist die Streuung der Daten zwischen ihnen.

Analog zu Median und Quartil gibt es noch beliebige Quantile, die jeweils mit einem Prozentwert behaftet sind – sollen z. B. die Grenzen angegeben werden, zwischen denen sich 95% der Datengrundlage befindet, kann das 2,5%- und 97,5%-Quantil zur Beschreibung dienen, damit insgesamt 5% außerhalb des Wertebereichs liegen.

Diese Methode ist üblich, um Extremwerte, die nur kurz oder äußerst selten auftreten (so genannte Ausreißer), nicht in einem Diagramm darstellen zu müssen und liefert auch einen guten Überblick über die Streuung der Stichprobe.

## 4 Methodik

In Abbildung 4.1 ist der Arbeitsablauf der vorliegenden Arbeit als Flowchart übersichtlich dargestellt – in den folgenden Abschnitten wird auf die Vorgehensweise genauer eingegangen.

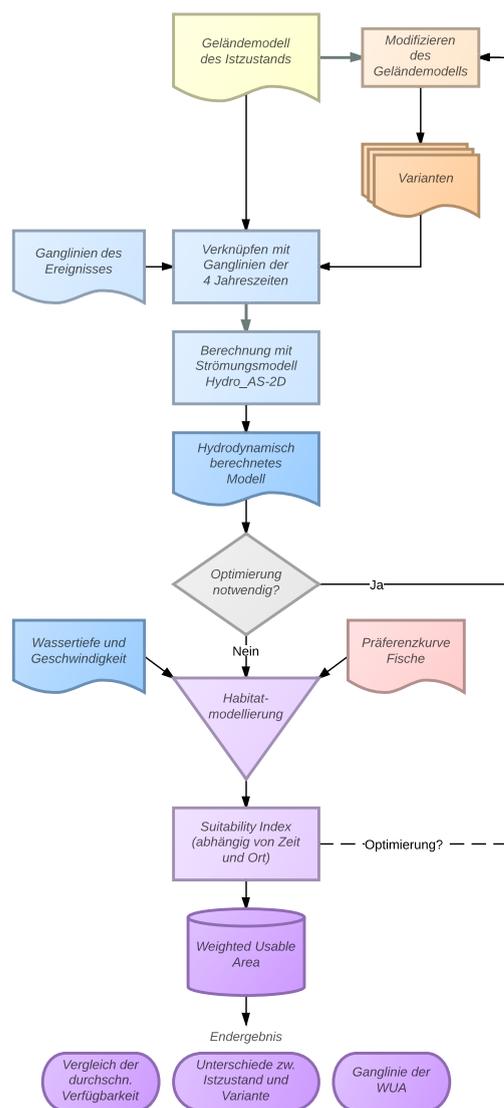


Abbildung 4.1: Flowchart zum Ablauf der hydrodynamischen sowie der Habitatmodellierung – von der Entwicklung der Maßnahmen bis zur Auswertung

## 4.1 Digitales Geländemodell

Das  $DGM^1$  ist das digitale Abbild der Natur und besteht aus geographischen Punktkoordinaten mit Lage- und Höhenkomponenten. Dazwischen wird ein Netz aus Zellen (Elementen) generiert, welche die Grundlage für die numerische Modellierung (sh. 3.1.3 auf Seite 17) darstellen.

Die Koordinaten stammen aus grob aufgelösten Laserscans für die vom Wasser nicht benetzten Gebiete und aus einer Echlot-Vermessung des Flusses.

Für die Problemstellung dieser Arbeit ist die Darstellung der Geländedaten als Draufsicht sinnvoll. Der Wert der Höhe kann mit einem Farbwert belegt werden – um die Bearbeitung zu erleichtern, kann eine individuelle Farbpalette und -abstufung gewählt werden, um feinere Höhenunterschiede einfacher erkennen zu können (sh. 4.2a). Die Abbildung 4.2b zeigt die 3-Dimensionalität des Geländemodells.

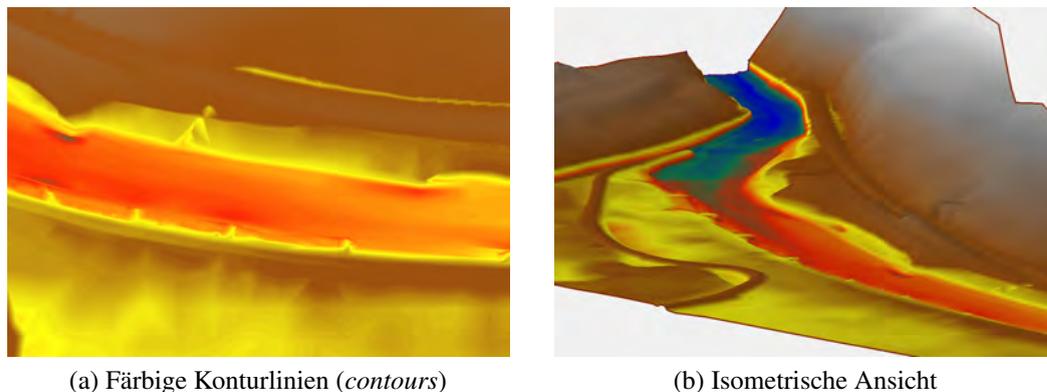


Abbildung 4.2: Digitales Geländemodell

### 4.1.1 SMS – *Surface-Water Modeling System*

Zur Bearbeitung des DGM sowie zur Berechnung der Ergebnisse wurde das Programm SMS v. 8.1 für Windows verwendet – die Entwicklung dieser Software wurde von der [Brigham Young University](#) in den späten 80er-Jahren für Unix-Systeme begonnen. Das Programm hat seither viele Neuerungen erfahren.

Die Zellen können in SMS entweder dreieckig oder viereckig sein (sh. Abbildung 4.3a). Weitere Limitierungen, um die Stabilität der Berechnung nicht zu gefährden oder um die Fehlerfortpflanzung zu reduzieren, sind eine maximale Anzahl an angeschlossenen Elementen pro Knoten (15), eine Mindestgröße der Zelle und ein minimaler Winkel (größer als  $5^\circ$ ), den die Seiten des Elements einschließen sollen.

<sup>1</sup>engl. auch: *DEM – digital elevation model*

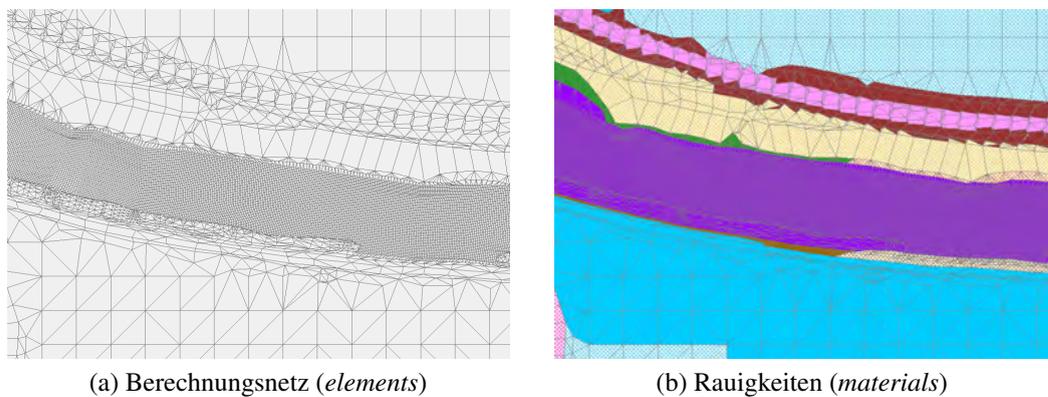


Abbildung 4.3: Screenshots des DGM aus SMS

Die Software SMS stellt die grafische Oberfläche dar, die auf dem Berechnungsmodell *Hydro\_AS-2D* (sh. 4.2.2) aufsetzt (vgl. ÖWAV (2007, S. 111)).

#### 4.1.2 Rauigkeiten

Um ein Abflussmodell verwenden zu können, ist die Eichung der richtigen Rauigkeiten von Fluss und Vorland besonders wichtig. Die benutzte Software verwendet Strickler-Werte, die jeweils für ein Element angegeben werden müssen (sh. Abbildung 4.3b). Das ist insofern vorteilhaft, weil dieser empirisch ermittelte Rauigkeitsparameter breitgefächerte Anwendung findet, ausreichend Erfahrungswerte und eine gute Datengrundlage vorliegen.

Die Modelle der Flußabschnitte, die in der vorliegenden Arbeit Verwendung fanden, wurden bereits kalibriert übernommen – der Arbeitsschritt der Eichung war deshalb schon geschehen.

## 4.2 Hydraulische Modellierung

### 4.2.1 Hydrologische Eingangsdaten

Die für die Modellierung verwendete Ganglinie des Schwallereignisses war je nach Verfügbarkeit der Daten entweder

- der errechnete mittlere saisonale Abfluss plus Ausbaudurchfluss der Turbine(n), siehe Abbildung 4.4a
- oder
- eine tatsächlich gemessene Ganglinie während des Ereignisses, sh. Abbildung 4.4b

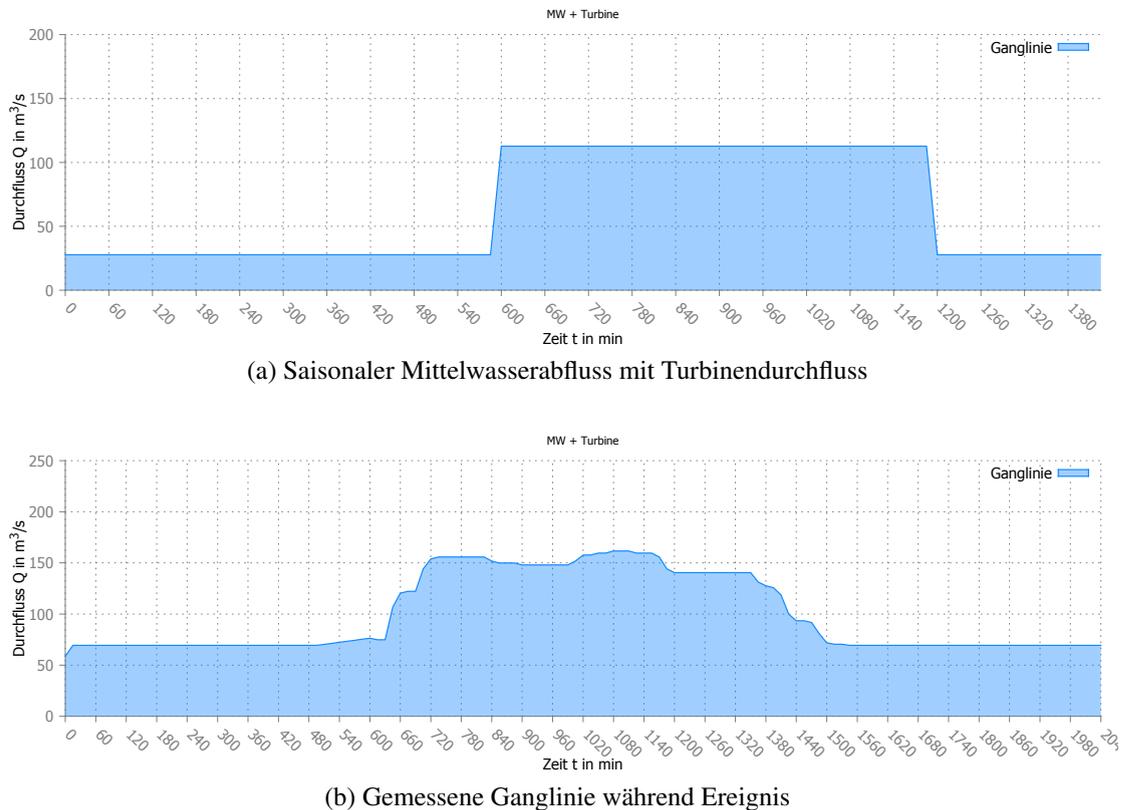


Abbildung 4.4: Hydrologische Eingangsdaten für die Modellierung

Das Zeitintervall zwischen den kontinuierlichen Durchflussmessungen beträgt 15 min – dieser Zeitschritt (*Timestep*) wurde auch für die Berechnungen von Hydrodynamik und Sedimenttransport gewählt.

Der Basisabfluss (Sunk) ist der mittlere Abfluss der jeweiligen Jahreszeit – hinzu kommt der Turbinendurchlass (Schwall). Jede Strecke und jede Variante wurde mit den Werten für Frühling, Sommer, Herbst und Winter durchgerechnet.

#### 4.2.2 Hydro\_AS-2D – Strömungsmodell

Wie in 4.1.1 bereits erwähnt, beruhen die hydrodynamischen Berechnungen auf dem Modell Hydro\_AS-2D, das von Dr.-Ing. Marinko Nujic (Rosenheim, Deutschland) schwerpunktmäßig für die Flutwellenausbreitung entwickelt wurde (vgl. Hydrotec (2004)) – es eignet sich deshalb auch sehr gut für die instationäre Berechnung eines Schwalls.

Das in Hydro\_AS-2D integrierte Verfahren basiert auf der numerischen Lösung der 2D-tiefengemittelten Strömungsgleichungen mit der Finite-Volumen-Diskretisierung (Hydrotec 2004).

Die Finite-Volumen-Methode zeichnet sich durch ihre konservative Eigenschaft (Massen- und Impulserhaltung) aus und ist deshalb für die Berechnung von diskontinuierlichen Übergängen (Wechselsprüngen) besonders zu empfehlen. Es treten keine Massendefizite, wie bei manchen anderen Verfahren, auf. Das eingesetzte explizite Zeitschrittverfahren ermöglicht eine zeitgenaue Simulation des Wellenablaufs sowie eine genaue Bestimmung von Retentionswirkungen (Hydrotec 2004; ÖWAV 2007).

## **4.3 Erarbeiten von Maßnahmen**

### **4.3.1 Istzustand**

Der Istzustand entspricht der Bestandsaufnahme eines Gewässerabschnittes – dieser kann stark reguliert sein, oder – wie z. B. bei der untersuchten Strecke der Drau – ein naturnaher bzw. revitalisierter Abschnitt. Für letzteren Fall sollte überprüft werden, ob und in welchem Ausmaß der Rückbau Verbesserungen für die ökologische Situation gebracht hat – dieses Vorgehen dient (sofern ein positives Verdikt abgegeben kann) als Bestätigung dafür, dass die gesetzten Revitalisierungsmaßnahmen den gewünschten Effekt erzielen konnten.

In der vorliegenden Arbeit war die Aufgabe jedoch meist, einen Katalog an Varianten zu erarbeiten, die eine Begünstigung erst bewirken sollen. Durch die Habitatmodellierung kann im voraus abgeschätzt werden, wie gut manche Maßnahmen geeignet sind.

### **4.3.2 Modellierung der Varianten**

Sofern nicht eine Überprüfung der Wirksamkeit gewünscht war, wurden die Maßnahmen generell so konzipiert, dass sie eine Dämpfung der Schwallwelle oder ihrer negativen Auswirkungen herbeiführen und somit eine ökologische Bereicherung für die Wasserfauna darstellen.

Tabelle 4.1 listet alle untersuchten Flussabschnitte, ihre Varianten und den Umfang der Untersuchungen auf.

Tabelle 4.1: Flüsse, Strecken und Varianten im Überblick, mit zugehörigem Untersuchungsumfang

	Software: Organismen:	Sediment		Hydraulik	Habitat	
		HEC-RAS	Hydro_GS-2D	Hydro_AS-2D	HEM Bachforellen	HEM Äschen
<b>ILL</b>						
<b>Strecke 2</b>	Verbesserung der Gewässerökologie, Habitatanalyse					
<b>Ist-Zustand</b>	reguliert, mit Buhnen			4 Jahreszeiten	4 Jahreszeiten	
<b>Variante 1</b>	Buhnen hinterschnitten			4 Jahreszeiten	4 Jahreszeiten	
<b>Variante 2</b>	Umgehungsgerinne			4 Jahreszeiten	4 Jahreszeiten	
<b>Variante 3</b>	Aufweitung			4 Jahreszeiten	4 Jahreszeiten	
<b>DRAU</b>						
<b>Strecke 2</b>	Kontrolle der Verbesserung durch Aufweitung, Habitatanalyse					
<b>Ist-Zustand</b>	Aufweitung, Nebengerinne vorhanden			4 Jahreszeiten	4 Jahreszeiten	4 Jahreszeiten
<b>Variante 1</b>	steil reguliert			4 Jahreszeiten	4 Jahreszeiten	4 Jahreszeiten
<b>Variante 2</b>	Nebengerinne aufgefüllt			4 Jahreszeiten	4 Jahreszeiten	4 Jahreszeiten
<b>Variante 3</b>	Nebengerinne verbunden			4 Jahreszeiten	4 Jahreszeiten	4 Jahreszeiten
<b>INN</b>						
<b>Strecke 1</b>	Verbesserung der Gewässerökologie, Habitatanalyse					
<b>Ist-Zustand</b>	mit Buhnen			4 Jahreszeiten	4 Jahreszeiten	
<b>Variante</b>	4 Buhnenfelder vergrößern			4 Jahreszeiten	4 Jahreszeiten	
<b>Strecke 2</b>	Verbesserung der Gewässerökologie, Habitatanalyse					
<b>Ist-Zustand</b>	Schotterbänke überströmbar			4 Jahreszeiten	4 Jahreszeiten	
<b>Variante</b>	Schotterbänke nicht überströmbar			4 Jahreszeiten	4 Jahreszeiten	
<b>Strecke 4</b>	Schwallwellenverformung					
<b>Ist-Zustand</b>	keine Anbindung ans Augebiet			4 Jahreszeiten		
<b>Variante</b>	Schwall ins Augebiet einleiten			4 Jahreszeiten		

Viele der Varianten erforderten ein iteratives Herantasten an die gewünschte Lösung – das bedeutet, die Maßnahmen wurden in den Istzustand des digitalen Geländemodells eingebaut, die Strömungsverhältnisse berechnet, eine Habitatanalyse durchgeführt und bei nicht zufriedenstellenden Ergebnissen oder Fehlern in der Modellierung erneut von vorne begonnen, um einen sinnvollen Eingriff zu erhalten, der möglichst den schwimmschwächsten Flussbewohnern nutzt.

## 4.4 Habitatmodellierung

### 4.4.1 HEM – Habitat Evaluation Model

Für die 2D-Habitatmodellierung wurde HEM eingesetzt, das vom Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau der BOKU Wien entwickelt wird. Dabei wird das Microscale Habitat Model (MSM) verwendet, dessen Ausgabe die gewichtete nutzbare Fläche (WUA) ist.

#### 4.4.2 WUA und HHS

Wie in 3.3.4 bereits erklärt, ist die WUA eine quantitative Einschätzung für die dem Organismus als Lebensraum zur Verfügung stehende Fläche.

Ein instationärer Abfluss – wie der Schwall – hat aufgrund sich verändernder Durchflussmenge auch eine zeitliche Veränderung der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten in jeder einzelnen Berechnungszelle zur Folge. Aus diesem Grund verändert sich auch die Habitatnutzung. WUA und HHS wurden deshalb für jeden einzelnen Timestep mit der Software HEM berechnet und als Zusammenfassung exportiert.

#### 4.4.3 Untersuchte Arten

An der Drau wurde zusätzlich zur Bachforelle auch die Äsche in die Habitatanalyse miteinbezogen – in diesem Fall waren vier Präferenzkurven zu unterschiedlichen Jahreszeiten für Individuen jünger als ein Jahr (sh. Anhang 8.1 auf Seite 103) verfügbar.

Bei der Bachforelle wurde hingegen nur eine Präferenzkurve (ebenfalls für die Altersgruppe 0+) der Habitatmodellierung zugrunde gelegt.

### 4.5 Visualisierung der Ergebnisse

Für eine erste Analyse und für die weiteren Bearbeitungsschritte war es unerlässlich, sich einen Überblick zu verschaffen und zu überprüfen, ob die vom Modell berechneten Ergebnisse plausibel sind. Hierbei soll vor allem die benetzte Fläche, die Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit augenscheinlich überprüft werden – eine gute Visualisierung ist dafür zwingend nötig.

#### 4.5.1 Darstellung der Strömung

Sowohl mit SMS als auch mit HEM lassen sich alle relevanten Parameter darstellen. Aufgrund der etwas einfacheren Bedienbarkeit bzw. einigen Bugs<sup>2</sup> in SMS 8.1 wird im Folgenden die Visualisierung mit HEM vorgenommen, da dieses Programm später auch für die Habitat Suitability zur Hand genommen wird.

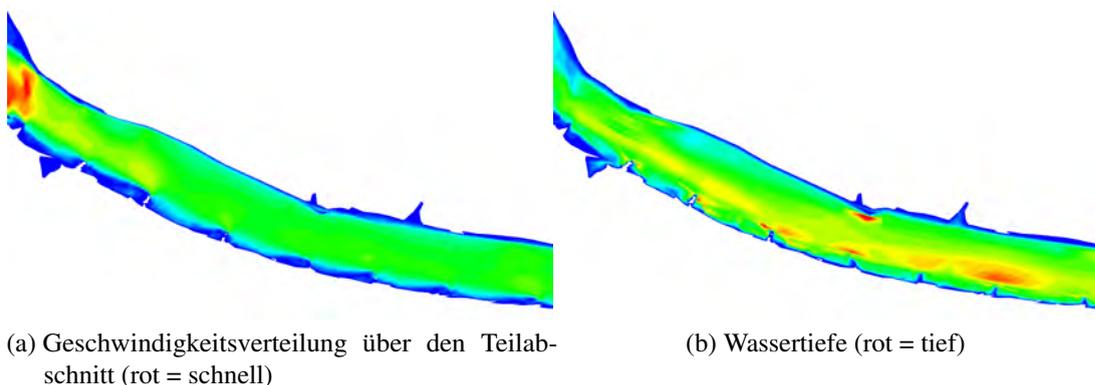


Abbildung 4.5: Möglichkeit der Strömungsvisualisierung mit HEM

<sup>2</sup>Fehler in der Software; Bugs können zu ungewünschten Ereignissen (z. B. falsche Darstellung oder Absturz des Programms mit Datenverlust führen).

### 4.5.2 Darstellung der Habitatverteilung

In Kombination mit den Präferenzkurven (sh. 3.3.1) für Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit versieht das Programm jedes Element mit einem Suitability Index (sh. 3.3.3) und zeigt mit Hilfe einer Farbskala an, wo sich gut geeignete Habitate befinden. Dies ist beispielhaft in Abbildung 4.6 für einen Abschnitt der Ill (Istzustand) im Sommer während des Schwallis dargestellt.

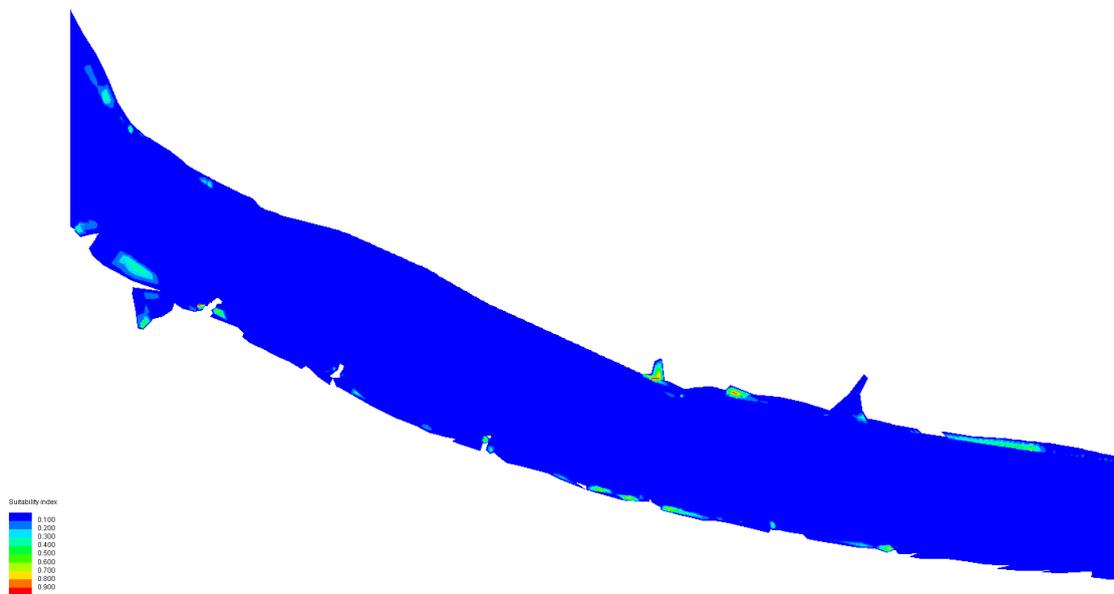


Abbildung 4.6: Habitat Suitability für junge Bachforellen: tiefe Bereiche mit hohen Fließgeschwindigkeiten sind kein geeigneter Lebensraum (dunkelblau)

## 4.6 Vergleich der Varianten

Für die Darstellung der Daten mittels Diagrammen wurde die freie skriptbasierte Visualisierungssoftware [gnuplot](#) (Version 4.6) verwendet – diese wird unter einer Open-Source-Lizenz veröffentlicht und eignet sich besonders für wissenschaftliche Untersuchungen.

### 4.6.1 Habitatverfügbarkeit über die Zeit

Um einen Überblick über die Verteilung der WUA bzw. HHS während des Schwallereignisses zu bekommen, wurde der Verlauf in einem WUA/Zeit bzw. HHS/Zeit-Diagramm dargestellt (Abbildung 4.7).

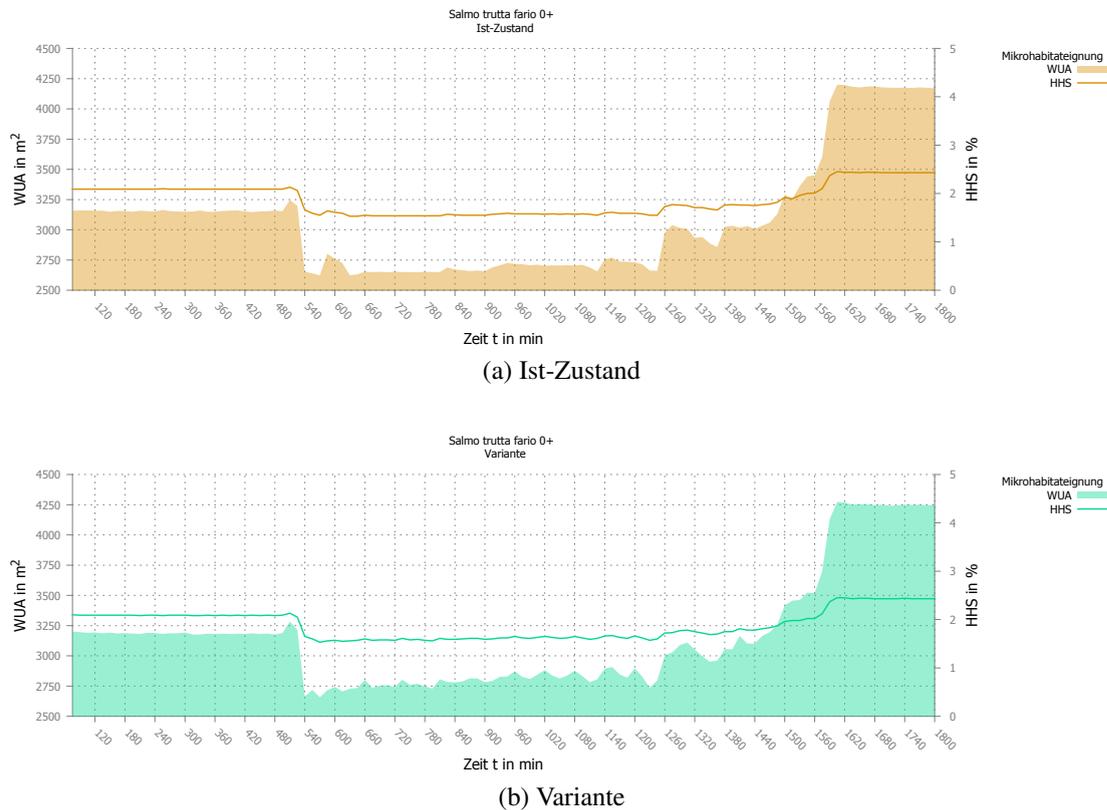


Abbildung 4.7: WUA- und HHS-Verlauf eines Gewässerabschnittes

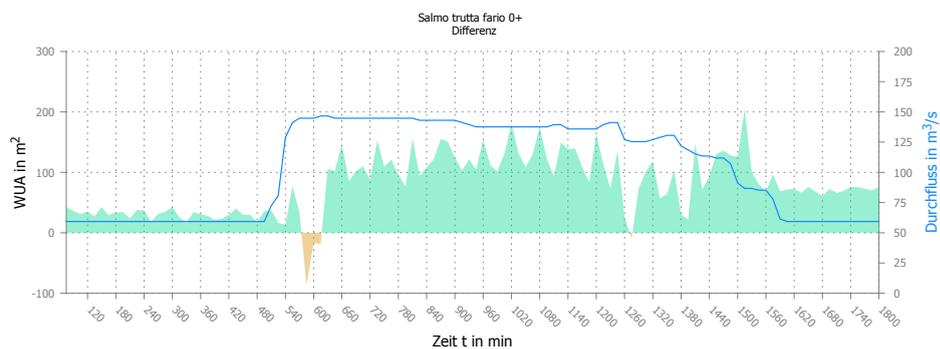
#### 4.6.2 Veränderung zum Istzustand

Da es das Ziel dieser Arbeit ist, die Verbesserung (oder Verschlechterung) durch wasserbauliche Maßnahmen zu erfassen, liegt das Hauptaugenmerk auf der Vergleichbarkeit der Variante mit dem Istzustand. Für diese Aufgabenstellung eignen sich vor allem die Darstellungen in Abbildung 4.8:

- Die WUA-Ganglinien von Istzustand und Variante sind überlagert und die Differenz dazwischen farblich markiert
- Der Unterschied der beiden Szenarien ist als eigener Wert herausgezeichnet, für jeden Timestep ist die Veränderung abzulesen.



(a) Paralleler Vergleich, Differenz färbig markiert



(b) Differenz zwischen den WUA der beiden Situationen

Abbildung 4.8: Vergleich der WUA von Variante und Istzustand

Ist die Fläche zwischen den Datenreihen grün hervorgehoben, bedeutet das, dass die Variante zu jenem Zeitpunkt eine größere WUA aufweist als der Istzustand – umgekehrt heißt eine hell-orange Markierung, dass der ursprüngliche Zustand bessere Habitatverhältnisse zeigt. Um eine Beziehung zum Abfluss darzustellen, wird die Ganglinie des Durchflusses auch abgebildet (in blau und mit dazugehörigen Werten auf der rechten Ordinate).

Mit Hilfe dieser Darstellung kann man auf einen Blick erkennen, zu welchen Zeiten und bei welchem Abfluss welche Veränderung stattfindet.

#### 4.6.3 Verifizierung der Wirksamkeit

Die Aufgabe bei der untersuchten Strecke an der Drau ist eine andere als an der Ill (5.2) oder am Inn (5.3) – in diesem Projektgebiet wurde bereits eine Aufweitung vollzogen, auf Grund derer sich kleinere Nebenarme und Strukturen gebildet haben.

Die Habitatanalyse soll in diesem Fall eine Verifizierung sein, dass die Maßnahme gegriffen hat und eine ökologische Verbesserung tatsächlich eingetreten ist. Die Vorgangsweise bleibt dieselbe – mit dem Unterschied, dass hier der Istzustand eine aufgewertete Fließstrecke darstellt und die Varianten 1 und 2 Regulierungen und Verschlechterungen sind.

Mit Variante 3 soll überprüft werden, ob noch eine zusätzliche Verbesserung eintritt, wenn die 2 Nebenarme, die sich ausgebildet haben, miteinander verbunden werden.

#### 4.6.4 Statistischer Vergleich mit Box-Plots

Das gesamte Schwallereignis besteht aus unzähligen Werten der WUA für jeden Time-step – um eine sinnvolle Aussage über den gesamten Zeitraum des Schwallis zu treffen und ganze Varianten miteinander vergleichen zu können, eignet sich am besten ein statistischer Vergleich in Form einer Grafik.

Der sogenannte Box(-Whisker)-Plot (Abbildung 4.9a) besteht im vorliegenden Fall aus folgenden Teilen, die im Prinzip alle Quantile sind (sh. 3.5.2 auf Seite 26):

- oberer „Whisker“ ... 97,5%-Quantil
- oberer Boxrand ... oberes Quartil (=25%-Quantil)
- Strich innerhalb der Box ... Median (=50%-Quantil)
- unterer Boxrand ... unteres Quartil (=25%-Quantil)
- unterer „Whisker“ ... 2,5%-Quantil

Die Ausreißer (die restlichen 5% der Stichprobe), die außerhalb der Whisker liegen, haben in diesem Fall keine besondere Aussagekraft – sie sind z. B. die Startwerte, wenn der Flussschlauch noch nicht vollständig mit Wasser gefüllt ist – und werden somit nicht dargestellt.

Durch die Gegenüberstellung der unterschiedlichen morphologischen Varianten und des Istzustands in einem Diagramm, kann auf einen Blick erkannt werden, wie groß der Einfluss der gesetzten Maßnahmen ist und ob im Allgemeinen eine Verbesserung bewirkt wird.

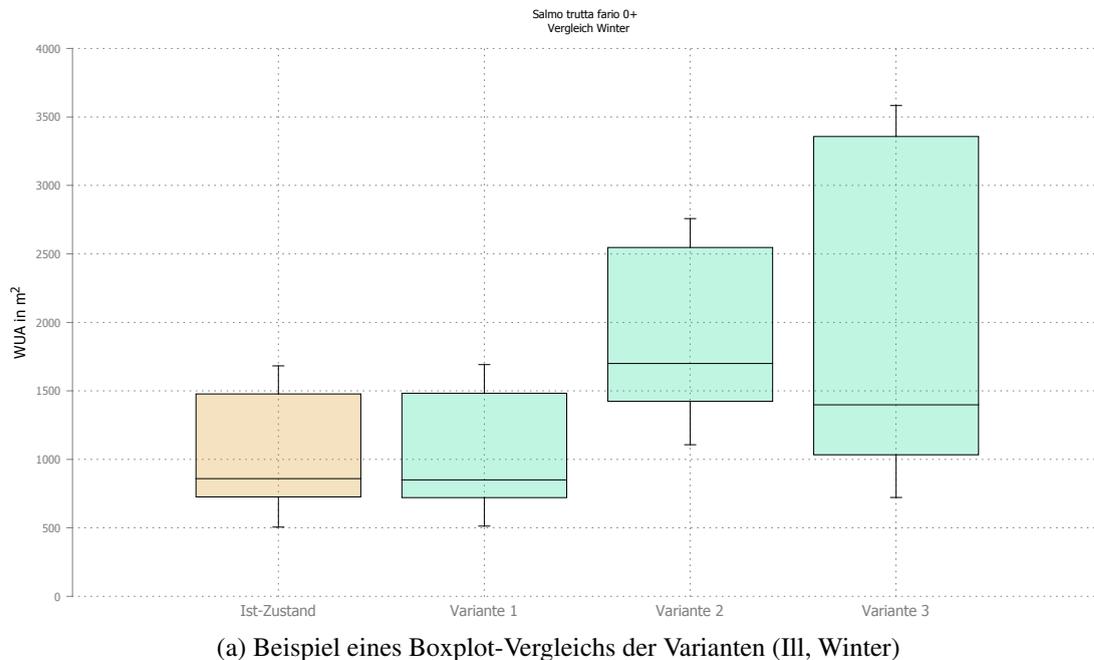


Abbildung 4.9: Direkter Vergleich aller Varianten in einem Diagramm

Außerdem kann anhand des Box-Plots beurteilt werden, wie sehr die WUA während des Schwallts streut: z. B. ist in Abbildung 4.9a die Variante 3 (im Winter) im Mittel schlechter als Variante 2, hat jedoch eine erheblich größere Streuung nach oben hin.

Andererseits darf man nicht vergessen, dass eine weite Spannweite der Ergebnisse auch bedeutet, dass das Habitatangebot großen Schwankungen unterliegt – das kann ganz andere nachteilige Folgen für die Fisch- und Benthosfauna haben (sh. 3.2.3): z. B. Stranden bei zu schnellem Sunk.

#### 4.6.5 Wirksamkeit der Varianten

Abschließend soll die Änderung noch über alle Varianten und Jahreszeiten hinweg dargestellt werden – damit nicht alle Box-Plots übereinander liegen, wird bei diesem Diagramm nur der Median der WUA des jeweiligen Szenarios aufgetragen, siehe Abbildung 4.9b. Dieses Schaubild ist zwar weniger detailliert als die zuvor genannten Box-Plots, aber ein gutes Werkzeug zum allgemeinen Bewerten einer Maßnahme.

## 5 Ergebnisse

Das Ergebnis der Analyse von Istzustand und Varianten ist jeweils der zeitliche Verlauf und die Verteilung der WUA sowie der Vergleich untereinander.

Im Folgenden werden – sofern nicht anders vermerkt – nur Abbildungen von Sommer und Winter gezeigt, da zu diesen Jahreszeiten die Abflussextrima in Abhängigkeit des natürlichen Abflussregimes auftreten: im Sommer herrscht der größte mittlere Durchfluss, im Winter der geringste. Die kalte Jahreszeit ist auch deshalb besonders interessant, da zu diesem Zeitpunkt die Bachforelle laicht und wenige Monate später die Fischlarven schlüpfen. In dieser Periode weist die Art die höchsten Habitatansprüche auf und ist am sensibelsten.

### 5.1 Drau – Strecke 2

An der Drau wurde zusätzlich zur Bachforelle auch die Äsche in die Habitatanalyse miteinbezogen – in diesem Fall waren vier Präferenzkurven zu unterschiedlichen Jahreszeiten für Individuen jünger als ein Jahr (sh. Anhang 8.1 auf Seite 103) verfügbar. Bei der Bachforelle wurde hingegen nur eine Präferenzkurve – ebenfalls für Juvenile (0+) – der Habitatmodellierung zugrunde gelegt.

#### 5.1.1 Istzustand

Die Aufgabe bei der untersuchten Strecke an der Drau ist eine andere als an der Ill (5.2) oder am Inn (5.3) – in diesem Projektgebiet wurde bereits eine Aufweitung vollzogen, auf Grund derer sich kleinere Nebenarme und Strukturen gebildet haben.

Die Habitatanalyse soll in diesem Fall eine Verifizierung sein, dass die Maßnahme gegriffen hat und eine ökologische Verbesserung tatsächlich eingetreten ist. Die Vorgangsweise bleibt dieselbe – mit dem Unterschied, dass hier der Istzustand eine aufgewertete Fließstrecke darstellt und die Varianten 1 und 2 Regulierungen und Verschlechterungen sind.

Mit Variante 3 soll überprüft werden, ob noch eine zusätzliche Verbesserung eintritt, wenn die 2 Nebenarme, die sich ausgebildet haben, miteinander verbunden werden.

#### Bachforelle

In den Abbildungen 5.2 (Sommer) und 5.3 (Winter) ist dargestellt, wie die Habitate während des Sunks und des Schwallis verteilt sind und welche Auswirkungen die unterschiedlichen Abflüsse haben können. Um bestimmte Bereiche besser betrachten zu können, sind zwei Details herausgezeichnet:

1. Detail 1 ist eine Stelle, wo einseitig eine eigendynamische Entstehung einer Kiessstruktur stattgefunden hat und deswegen Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit

niedrig sind. Auf den ersten Blick ist diese Stelle unscheinbar, jedoch hat sich gezeigt, dass sie ein ökologisch wertvoller Bereich ist. Während des Schwalls wandert das Areal, das eine gute Suitability aufweist, höher und näher zum Ufer. Bei einem sommerlichen Schwallereignis ist diese Nische für die jungen Bachforellen jedoch fast zur Gänze verschwunden (sh. Abbildung 5.2a).

2. Detail 2 zeigt die Nebenarme, die durch den Umbau entstanden sind. Es ist zu erkennen, dass neben den schmalen Kanälen auch die stattfindende Anlandung auf der rechten Uferseite gute Voraussetzungen für die Jungfische aufweist (5.3d).

Der untere Nebenarm wird bei allen Szenarien bei der aktuellen Geländegeometrie von flussab mit Wasser gespeist, deshalb herrschen hier nur sehr geringe Fließgeschwindigkeiten. Aufgrund der viel zu großen Wassertiefen und wegen der steilen Böschungen sprechen zumindest die Zahlen nicht für dieses verzweigte System aus schmalen Gerinnen – HSI und WUA sind in diesem Bereich bei weitem nicht optimal. Als Rückzugsort für schwimmschwache Individuen während des Schwalls kann diese beruhigte Fließzone dennoch als sehr wertvoll eingeschätzt werden.

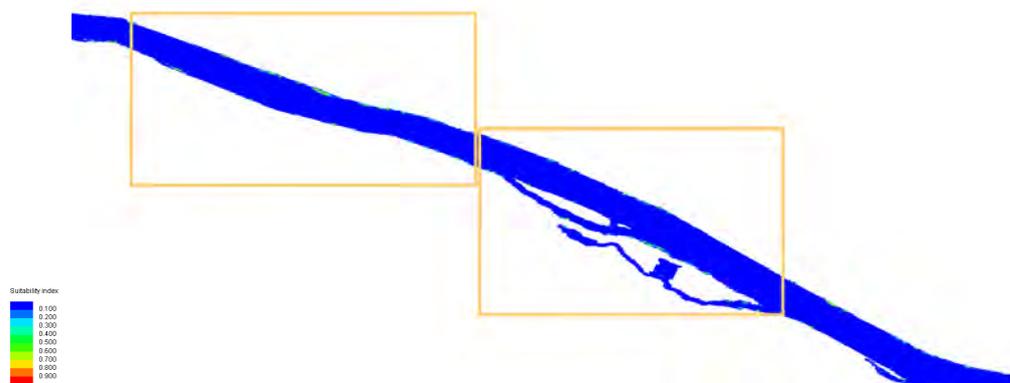


Abbildung 5.1: Markierung der Lage der Detailbetrachtungen – Habitatverteilung für den Istzustand im Sommer (Bachforelle)

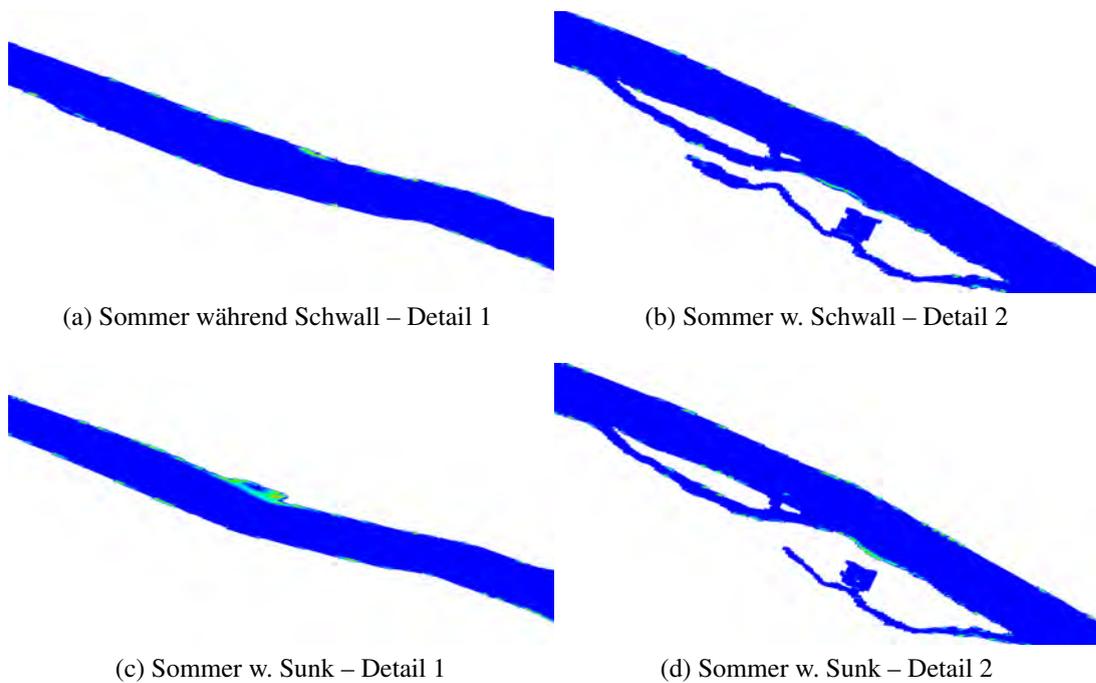


Abbildung 5.2: Habitatverteilung für den Istzustand im Sommer (Bachforelle)

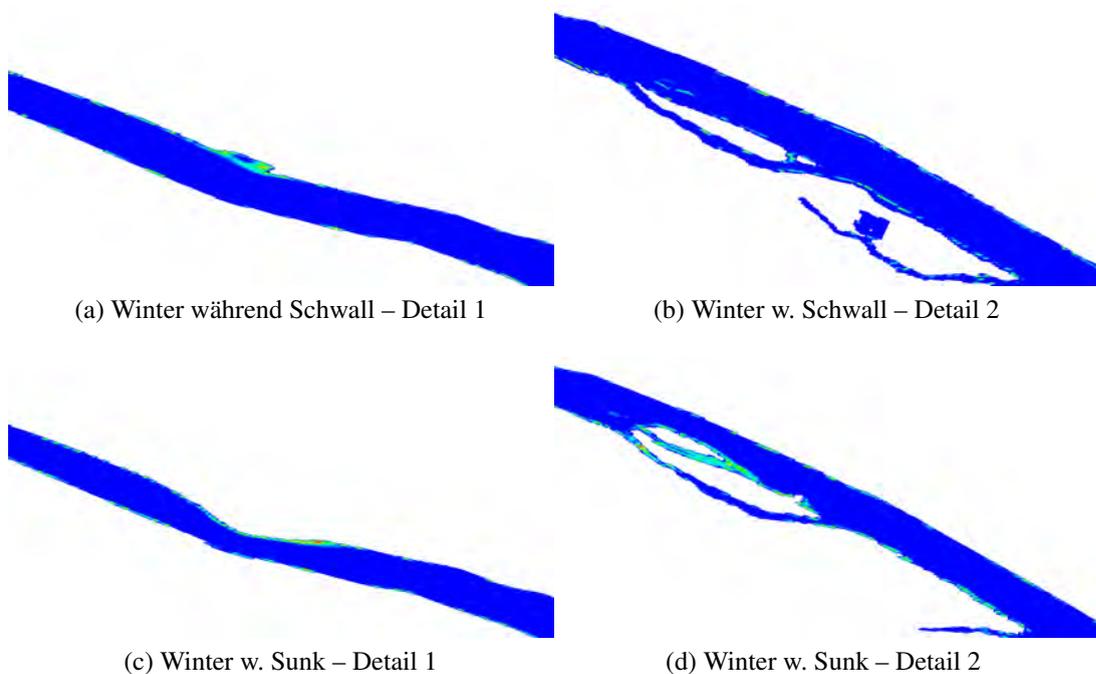


Abbildung 5.3: Habitatverteilung für den Istzustand im Winter (Bachforelle)

### Europäische Äsche

Wie in Abbildung 5.4 zu sehen ist, hat die Äsche unterschiedliche Habitatansprüche und findet sich im Alter von einigen Monaten bereits auch in tieferem Wasser und bei

schnelleren Strömungen. Die Habitate, die die Äsche in Anspruch nimmt, finden sich in etwa im Anschluss zu den Standorten, wo sich die Bachforelle gerne aufhält. Die Habitate sind ausgedehnter und weisen generell einen besseren HSI auf, was dafür spricht, dass die Äsche nicht so sehr von flachen, ruhigen Stellen abhängig ist wie die Bachforelle.

Bemerkenswert ist, wie tolerant die Art im Winter besonders während des Sunks ist (sh. 5.4d). Das liegt zum Teil auch an den unterschiedlichen Präferenzkurven (sh. 8.1 auf Seite 103), die sich mit dem Größerwerden des Fisches verbreitern und verschieben.

Die Modelle zeigen, dass der Äsche bereits im Sommer und besonders im Winter mehr Habitat zur Verfügung steht als der Bachforelle, die sich für eine längere Zeit ihrer Entwicklung hauptsächlich an den flachen Ufern und bei Schotterbänken aufhält.

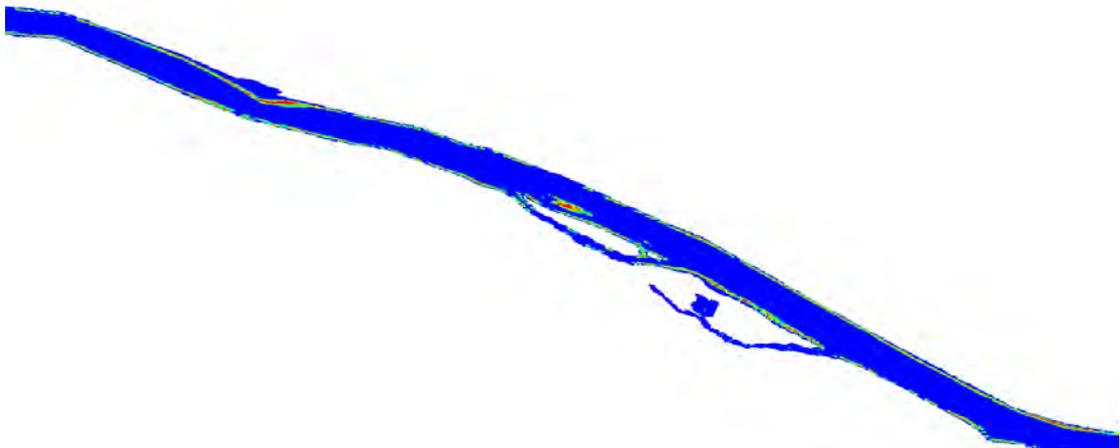


(a) Sommer während Schwall – Überblick

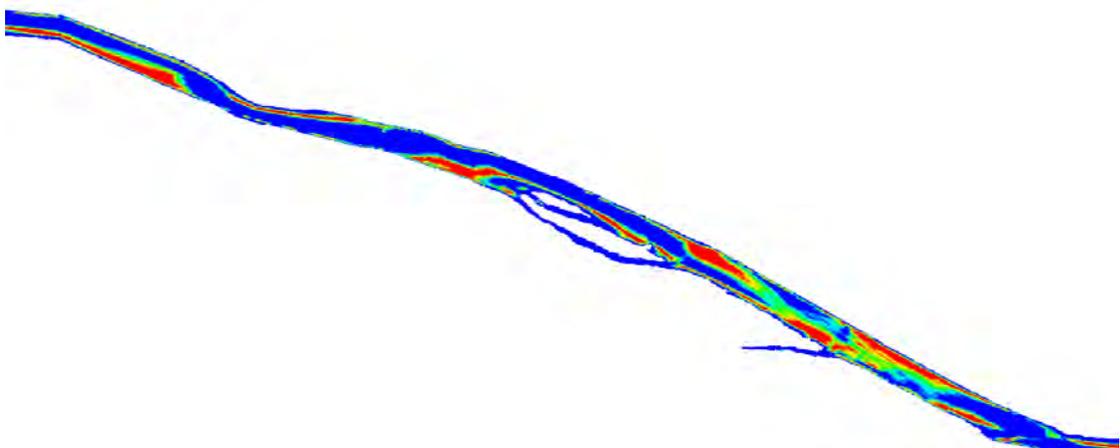


(b) Sommer während Sunk – Überblick

Abbildung 5.4: Habitatverteilung für den Istzustand (Äsche)



(c) Winter während Schwall – Überblick



(d) Winter während Sunk – Überblick

Abbildung 5.4: Habitatverteilung für den Istzustand (Äsche) (Forts.)

Für die Detailbetrachtung wird hiermit auf den Anhang 8.2.1 auf Seite 106 verwiesen.

### 5.1.2 Variante 1: steil reguliert

Für diese Variante wurde angenommen, dass der Flusslauf begradigt ist und eine steile Böschung aufweist – diese Änderung kommt dem Zustand der Drau vor der Renaturierung nahe und stellt eine ökologisch schlechtere Situation dar, wie die folgenden Abbildungen in einem direkten Vergleich zeigen.

## Bachforelle

**Verteilung der Habitate** Auf der linken Seite der Abbildung 5.5 ist der HSI für Schwall bzw. Sunk des Istzustands dargestellt, rechts ist derselbe Geländeausschnitt als regulierte Variante zu sehen. Durch die Begradigung des Flusses fallen sämtliche Nebenarme und flache Uferzonen weg – was sich auf die Verfügbarkeit der Habitate stark auswirkt.

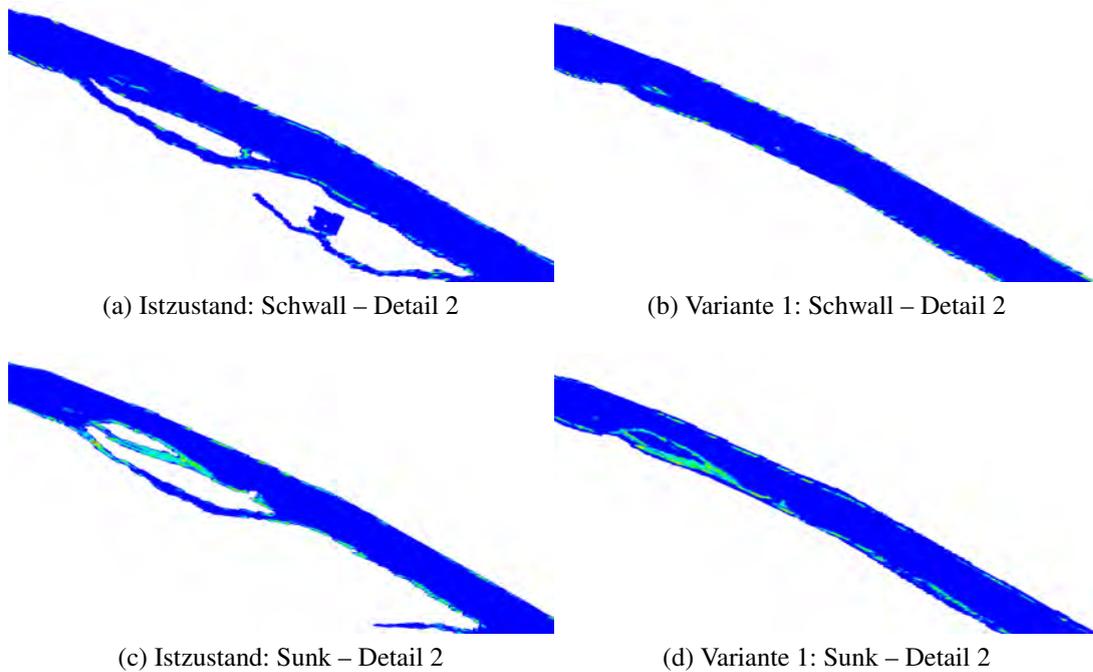
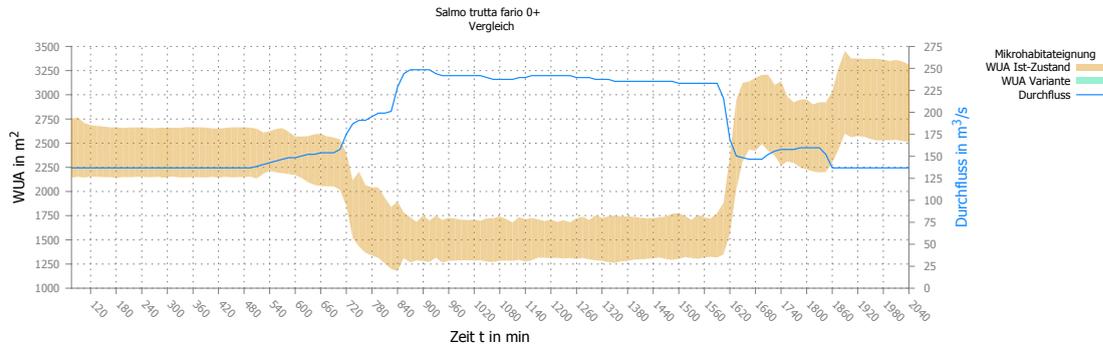


Abbildung 5.5: Istzustand und Variante 1: HSI im Winter (Bachforelle)

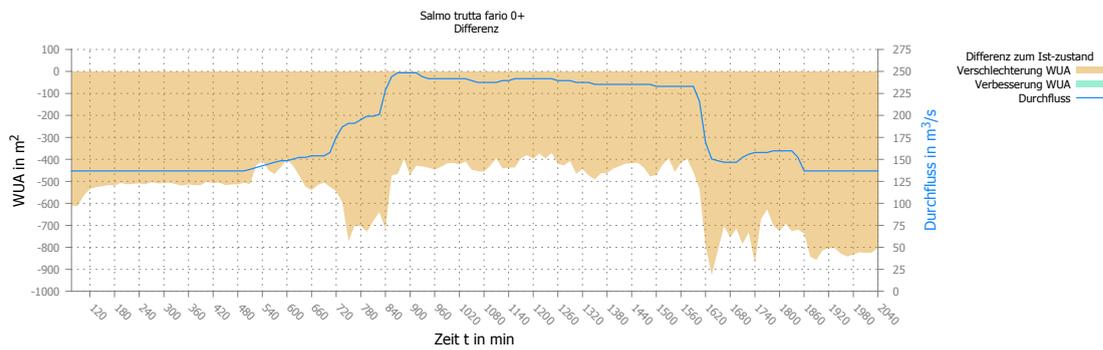
Abbildungen zu Detail 1 sowie die Ergebnisse für den Sommer finden sich im Anhang 8.2.2 auf Seite 107.

**Verlauf der WUA** Was anhand ausgewählter flächiger Darstellungen vermutet werden kann, wird in Abbildung 5.6 noch deutlicher und als Diagramm veranschaulicht:

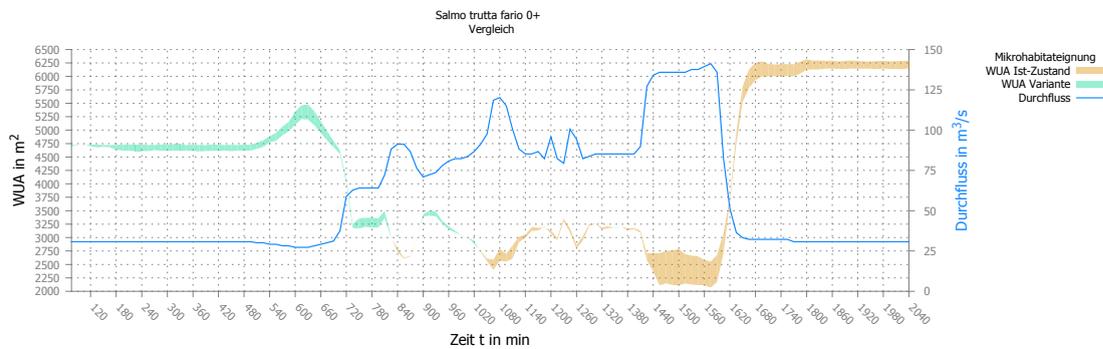
- Im Sommer wird durch die Regulierungsmaßnahmen eine Verschlechterung über das gesamte Schwallereignis hervorgerufen: im gesamten untersuchten Abschnitt ist zwischen  $400\text{ m}^2$  und teilweise sogar  $900\text{ m}^2$  weniger nutzbare Fläche als beim naturnahen Istzustand vorhanden.
- Im Winter stellt sich während des Sunks eine minimale Verbesserung der Situation ein, woraufhin jedoch eine Verschlechterung während des Schwalls folgt, die zum Maximum der Welle die WUA um  $700\text{ m}^2$  verringert.



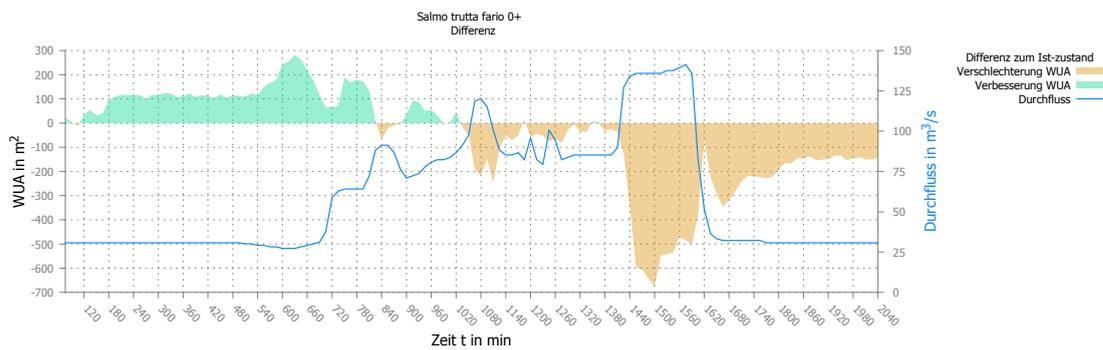
(a) Sommer – WUA parallel



(b) Sommer – Differenz der WUA



(c) Winter – WUA parallel



(d) Winter – Differenz der WUA

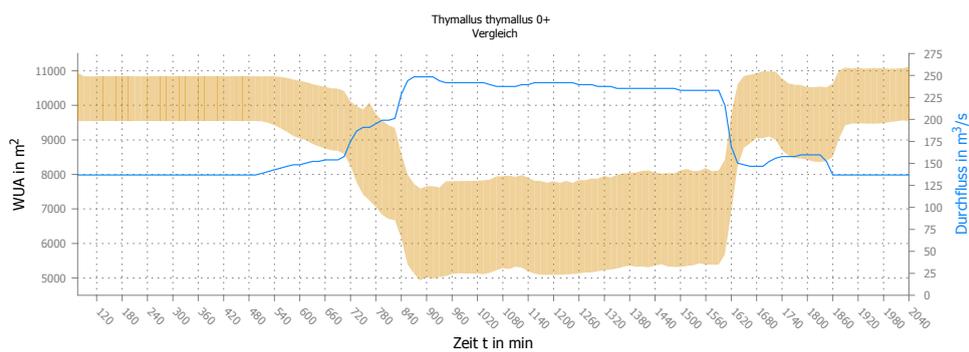
Abbildung 5.6: WUA während Schwall im Sommer und Winter (Drau, Bachforelle)

Es soll jedoch an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, die Diagramme bei einem ersten Blick nicht zu missinterpretieren – die Skalierung soll beachtet werden: der Ausschnitt der WUA-Achse beginnt nicht bei 0 und hat keine einheitlichen Grenzen – er wurde jeweils so gewählt, dass ein guter Überblick über das Ereignis gewährleistet ist, da andernfalls eine Darstellung der Auswirkungen nur sehr schwierig erkennbar gemacht werden konnte. Für einen grafisch einheitlichen Vergleich aller Varianten mit dem Istzustand wird auf 5.1.5 auf Seite 56 verwiesen.

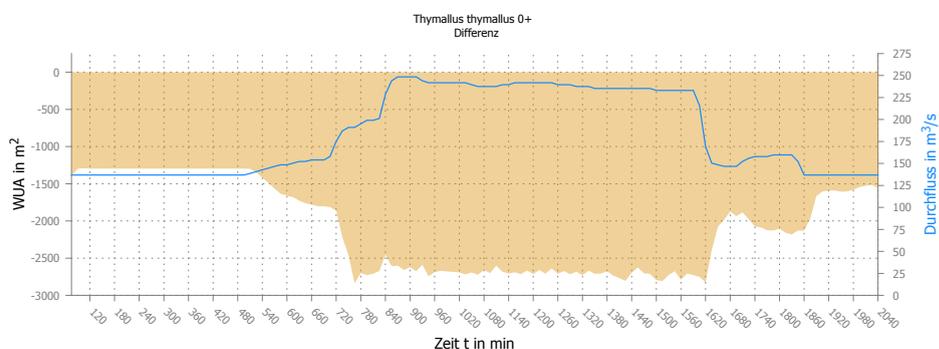
## Europäische Äsche

**Verteilung der Habitate** Auch hier fallen die schmalen Nebenarmsysteme als möglicher Rückzugsort weg – die Darstellungen zur Habitateignung zeigen das dementsprechend und lassen sich im Anhang 8.2.2 auf Seite 110 finden.

**Verlauf der WUA** Die Grundproblematik, die für die Bachforelle gilt, ist ebenso bei der Äsche zu finden (sh. Abbildung 5.7): im Sommer geht durch die Regulierung der Drau während des Schwall ein großer Teil der Habitatfläche verloren:  $2750\text{ m}^2$  von ursprünglich ca.  $8000\text{ m}^2$ . Im Winter sind die Auswirkungen nicht so gravierend, da die Wassermengen und Fließgeschwindigkeiten deutlich verringert sind.



(a) Sommer – WUA parallel



(b) Sommer – Differenz der WUA

Abbildung 5.7: WUA während Schwall im Winter (Drau, Äsche)

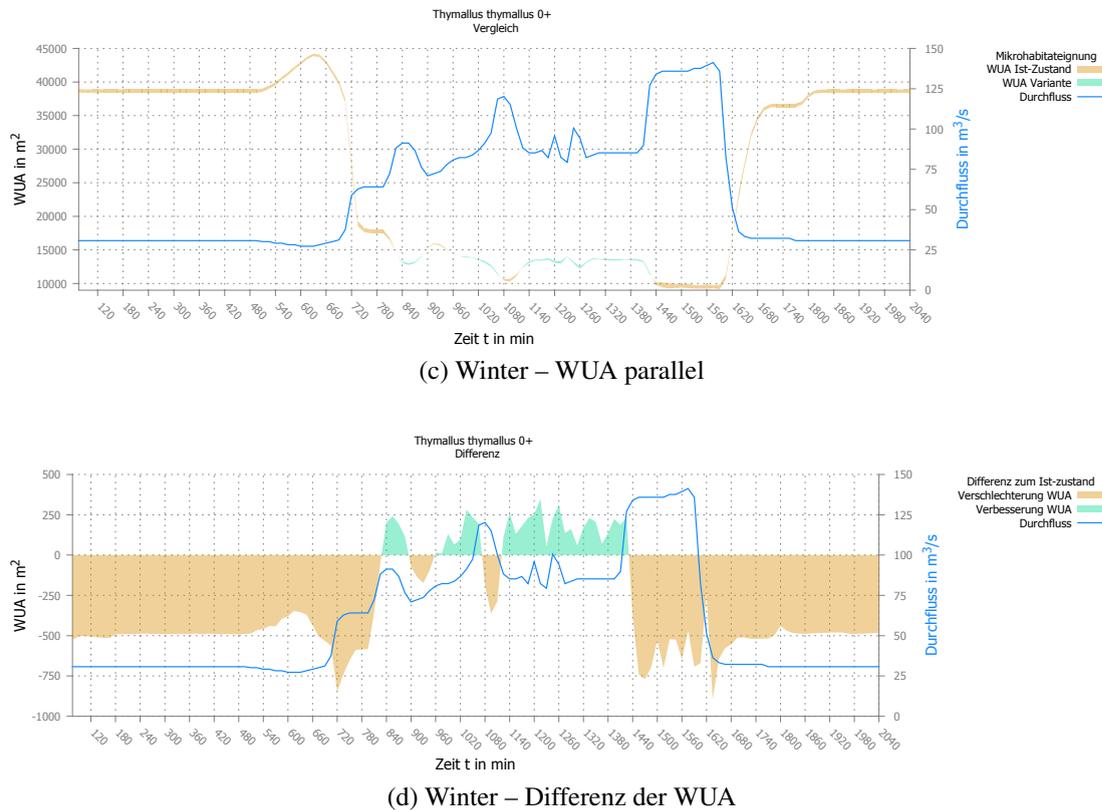


Abbildung 5.7: WUA während Schwall im Winter (Drau, Äsche) (Forts.)

### 5.1.3 Variante 2: Nebengerinne verfüllt

Für die zweite Variante, die eine künstliche Verschlechterung der Drau darstellen soll, wurde eine Geometrie ähnlich der ersten Variante gewählt: der Gewässerverlauf bleibt weitgehend unbeeinflusst, bis auf die Tatsache, dass die Nebenarme bis zur bordvollen Geländeoberkante nicht angebunden sind. Wasser kann nicht mehr durch die entstandenen Nebenarme fließen, ein Überströmen wäre zwar noch möglich, geschieht jedoch sogar bei einem sommerlichen Schwallereignis de facto nicht – weshalb sich das Szenario nur marginal von der Variante 1 unterscheidet. Kleine Unterschiede in der Habitatverteilung und WUA gibt es aufgrund der etwas flacheren Ufer im Bereich, wo die Restrukturierung stattgefunden hat.

In Abbildung 5.8 wird beispielhaft an einem Ausschnitt vom geänderten Detail 2 gezeigt, was sich durch die Anpassung der Geometrie an der benetzten Fläche und der Habitateignung geändert hat. Wegen der nur geringfügigen und in der Darstellung kaum auszumachenden Abweichungen wird im Folgenden auf Bilder dieser Art verzichtet.

## Bachforelle

**Verteilung der Habitate** Die örtliche Verteilung ist, sowie auch die mengenmäßige Verfügbarkeit, mit der von Variante 1 (sh. Abschnitt 5.1.2) weitgehend identisch und deshalb hier nur für ein Szenario und ein Detail abgebildet.

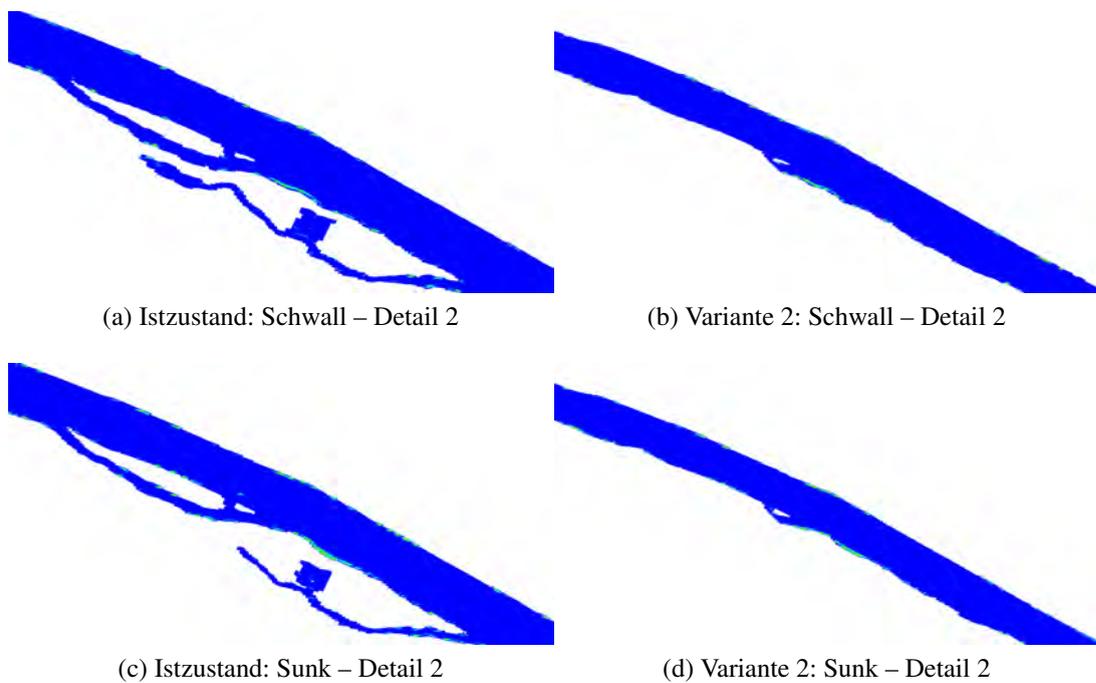
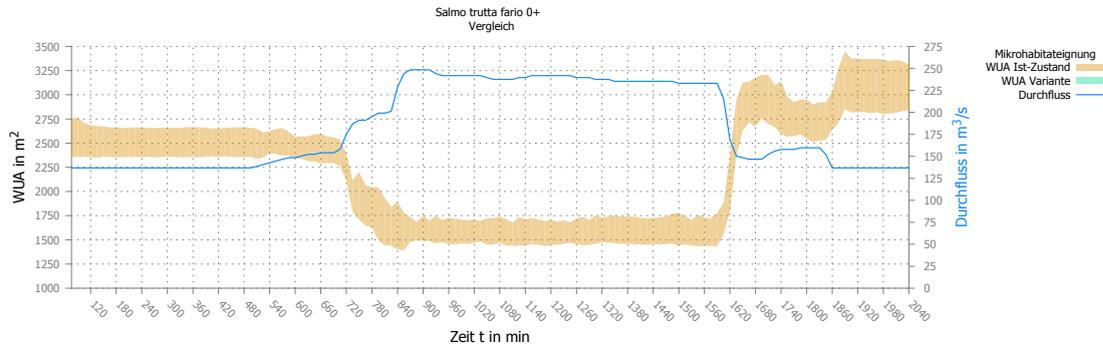
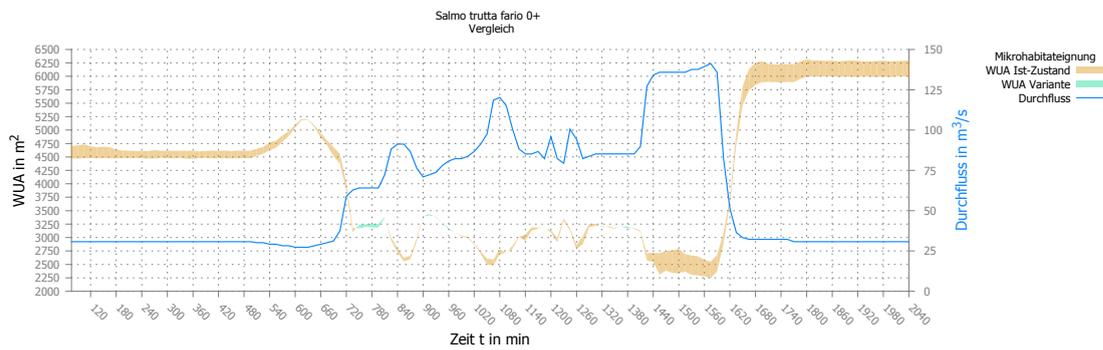


Abbildung 5.8: Istzustand und Variante 2: HSI im Sommer (Drau, Bachforelle)

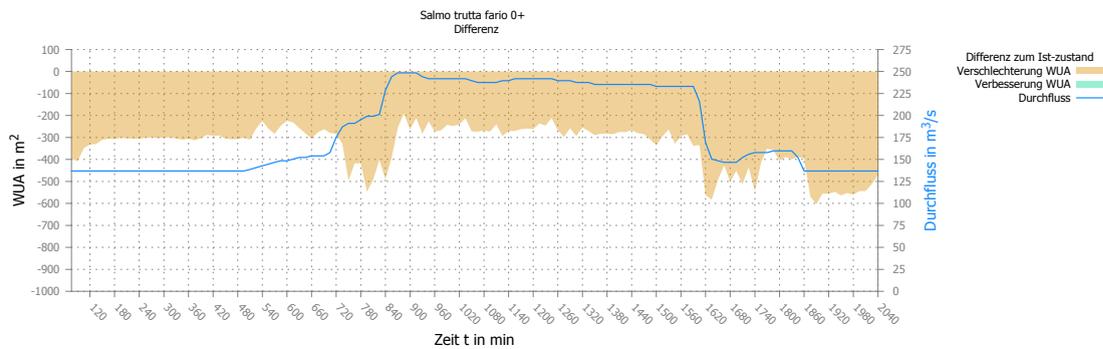
**Verlauf der WUA** Der Verlauf der WUA gleicht dem für die regulierte Variante 1, ist jedoch nicht so stark ausgeprägt (sh. Abbildung 5.9). Die negativen Auswirkungen belaufen sich im Sommer zwischen  $300\text{m}^2$  und  $600\text{m}^2$  verlorener Nutzfläche (im Vergleich zu  $400\text{m}^2$  bzw.  $900\text{m}^2$  bei vollständiger Regulierung, während im Winter zur Schwallspitze mit einer deutlich geringeren Verlustfläche von  $400\text{m}^2$  gerechnet werden kann ( $700\text{m}^2$  bei Variante 1)).



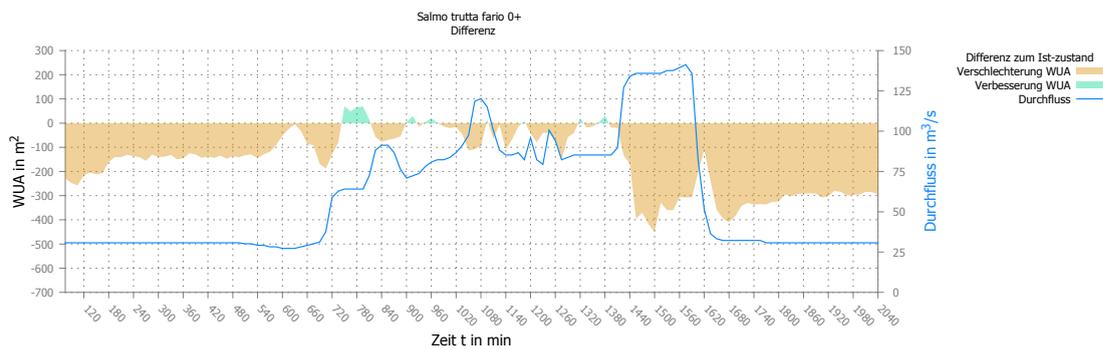
(a) Sommer – WUA parallel



(b) Winter – WUA parallel



(c) Sommer – Differenz der WUA



(d) Winter – Differenz der WUA

Abbildung 5.9: WUA während Schwall im Sommer und Winter (Drau, Bachforelle)

## Europäische Äsche

**Verteilung der Habitate** Für die Äsche lassen sich in der Plandarstellung ebenfalls keine großen Unterschiede zur Variante 1 ausmachen (sh. Abschnitt 5.1.2 auf Seite 47).

**Verlauf der WUA** Die Regulierung der Variante 1 hat im Sommer eine deutlich geringere WUA zur Folge (sh. Abschnitt 5.1.2) – das bloße „Verfüllen“ bzw. Ebenen des Geländes im Bereich der Restrukturierungsmaßnahmen, wie es bei dieser Variante der Fall ist, zeigt weit weniger ausgeprägte Auswirkungen auf das Habitatangebot (sh. Abbildung 5.10). Die Differenz zum Istzustand schwankt stark, beläuft sich jedoch in einem zu vernachlässigenden Bereich:  $\pm 250\text{m}^2$  bei einer WUA von ca.  $8000\text{m}^2$  während der Schwallspitze.

In bestimmten Zeiten bewirkt die Entfernung der Nebengerinne aus dem Flusssystem sogar eine ökologische Verbesserung für die Äsche – diese ist jedoch sehr gering und tritt bei Schwallereignissen im Winter nur kurzfristig und während speziellen Durchflusswerten auf (sh. 5.10d), bei denen – durch die Flussmorphologie bedingt – bessere Habitatverhältnisse für die Art herrschen.

Generell kann gesagt werden, dass diese Variante nicht unbedingt nachteilig für die Äsche ist, da sich das Habitatangebot (zumindest in der numerischen Analyse) kaum von der ursprünglichen Istsituation unterscheidet – diese stellt aufgrund ihrer strukturellen Vielfalt jedoch – vor allem für die ebenfalls untersuchte Bachforelle – die weit bessere Variante dar.

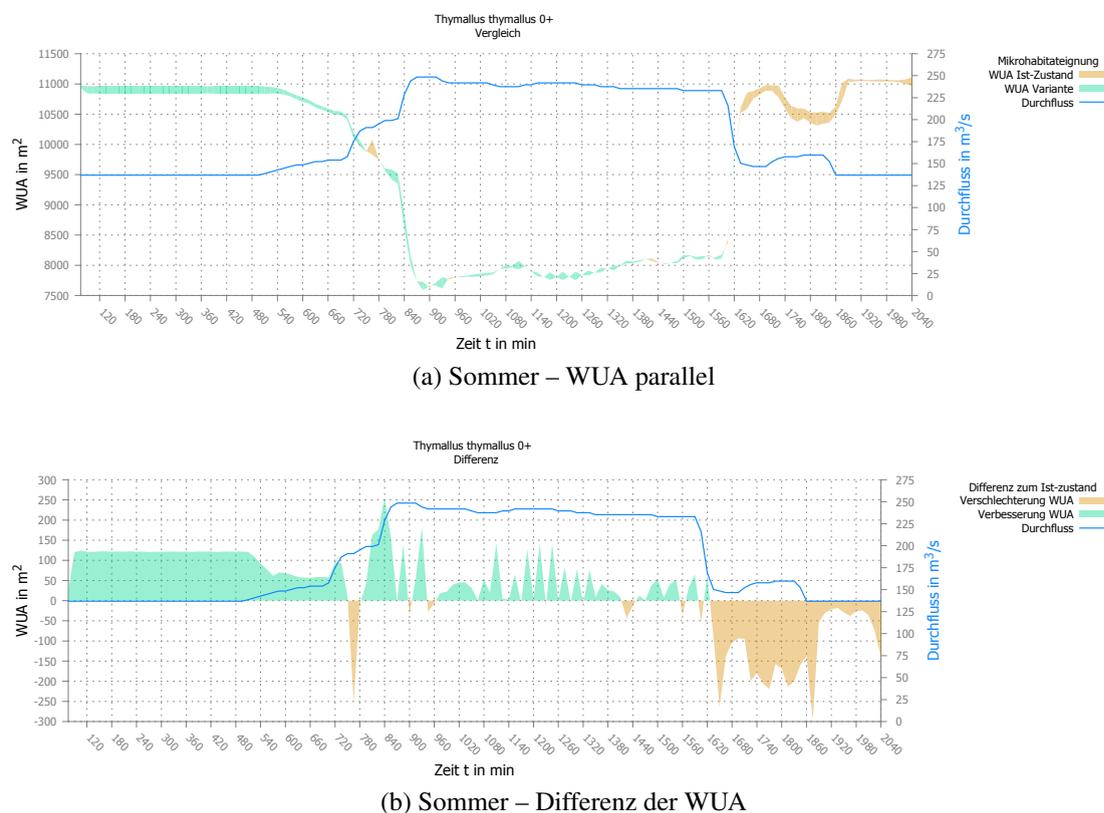


Abbildung 5.10: WUA während Schwall im Sommer und Winter (Drau, Bachforelle)

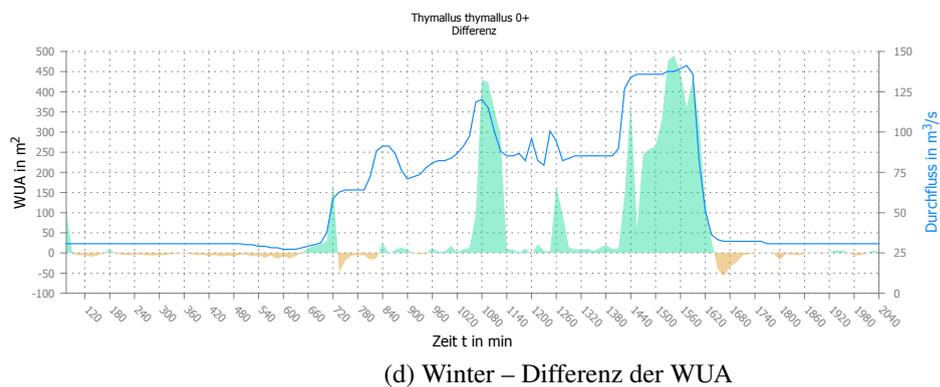
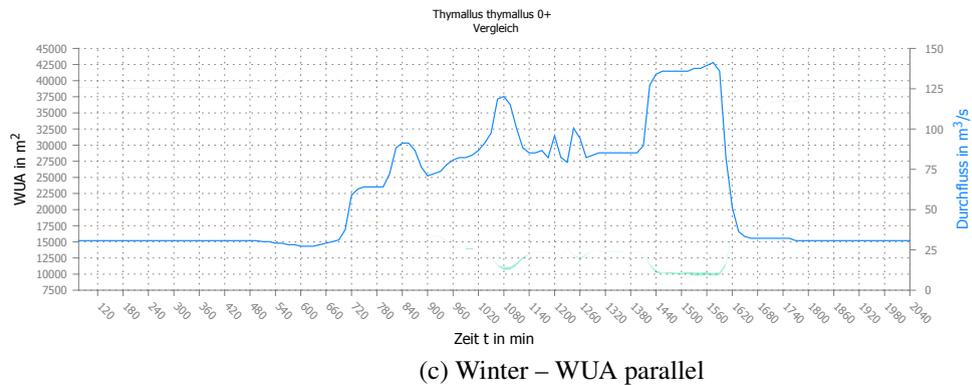


Abbildung 5.10: WUA während Schwall im Sommer und Winter (Drau, Bachforelle)  
(Forts.)

### 5.1.4 Variante 3: Nebengerinne verbunden

Als Variante 3 wird ein Szenario untersucht, das – entgegen der vorangegangenen Modifikationen – nicht nachteilig auf die ökologischen Gegebenheiten des Istzustandes wirken soll. In dieser Variante werden die beiden Nebengerinne, die getrennt verlaufen und von verschiedenen Einläufen mit Wasser gespeist werden, zu einem durchgehenden Gerinne vereint. Bei eigendynamischen Umlagerungen im Flussbett kann durch Erosionsprozesse diese Verbindung entstehen und mitunter neue Strömungsverhältnisse mit sich bringen.

#### Bachforelle

**Verteilung der Habitate** In Abbildung 5.11 ist die Variante mit verbundenen Nebenarmen dargestellt – besonders in 5.11c kann erkannt werden, dass durch die Verbindung auch bei Sunk im Sommer ein durchgängiges Gerinne besteht und dadurch mehr Fläche mit Wasser benetzt wird als beim Istzustand. Im Winter ist das Wasseraufkommen während Sunk jedoch zu gering um eine Verbindung zu schaffen: beide Nebenarme werden generell nur wenig durchflossen, der untere Nebenarm bleibt vom oberen entkoppelt.

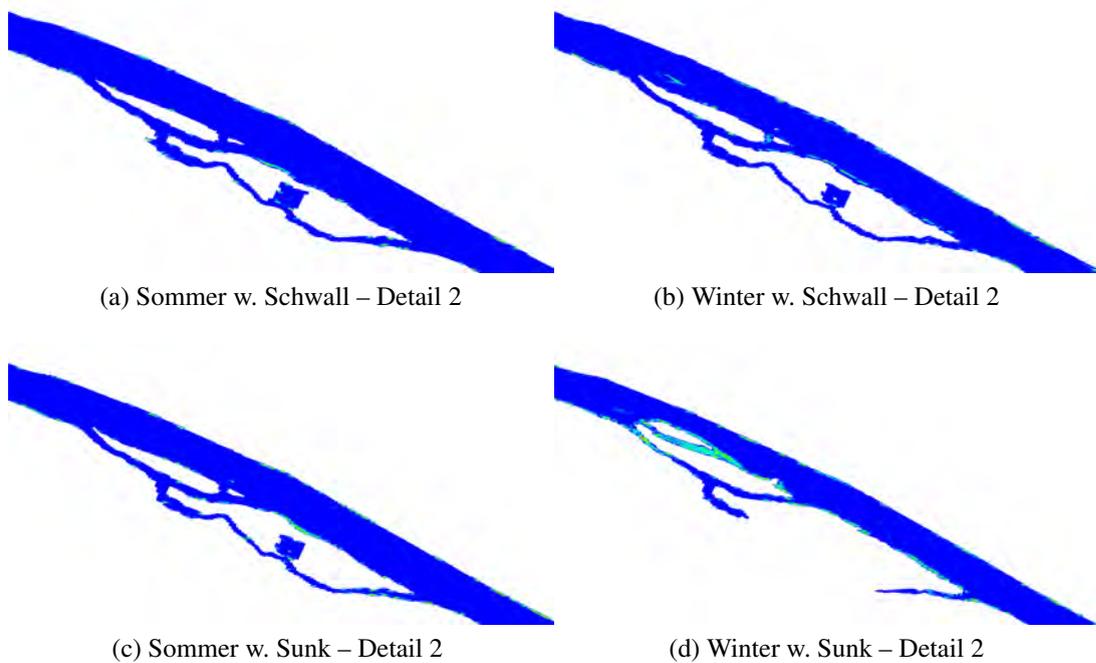
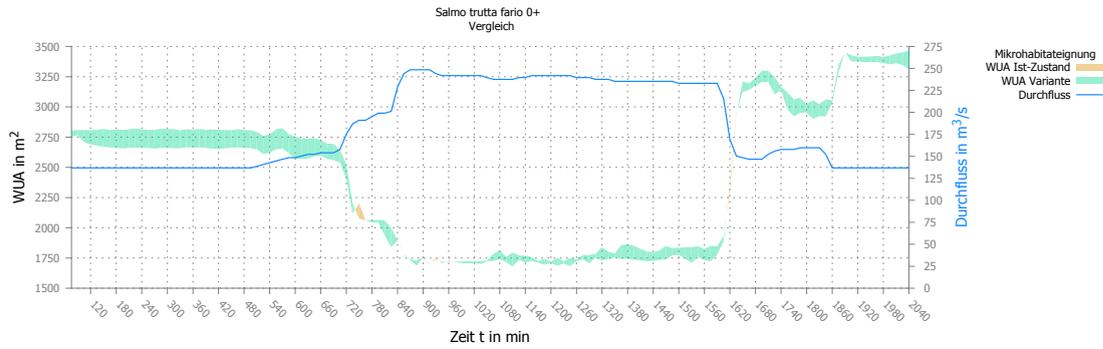
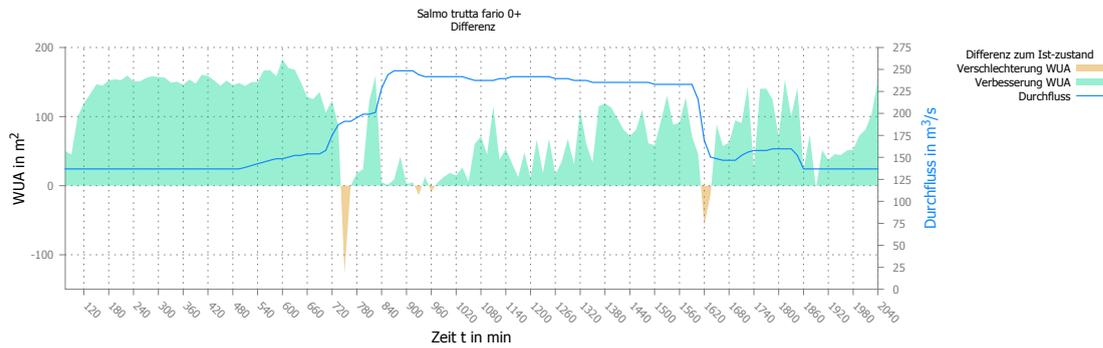


Abbildung 5.11: HSI der Variante 3 im Sommer und Winter (Drau, Bachforelle)

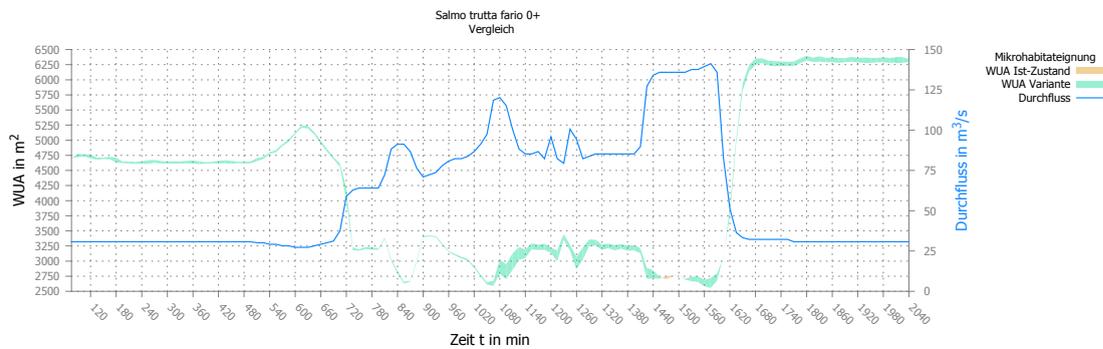
**Verlauf der WUA** Die nur geringfügige Änderung der Geometrie der Nebengerinne führt zu einer messbaren und zu jeder Saison positiven Veränderung der WUA: im Sommer profitieren die Bachforellen besonders während des Sunks, im Winter wird der Effekt erst bei ansteigenden Durchflüssen bemerkbar (sh. Abbildung 5.12).



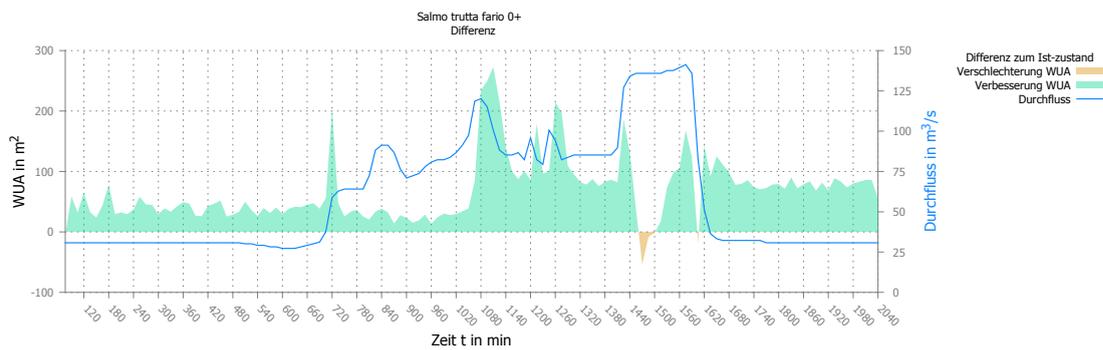
(a) Sommer – WUA parallel



(b) Sommer – Differenz der WUA



(c) Winter – WUA parallel



(d) Winter – Differenz der WUA

Abbildung 5.12: WUA während Schwall im Sommer und Winter (Drau, Bachforelle)

## Europäische Äsche

**Verteilung der Habitate** In Abbildung 5.13 ist zu erkennen, dass sich nicht viel an der Lebensraumverteilung der Äsche ändert, lediglich direkt nach dem Bereich der Anbindung entsteht ein neues kleinräumiges Habitat (Abbildung 5.13).

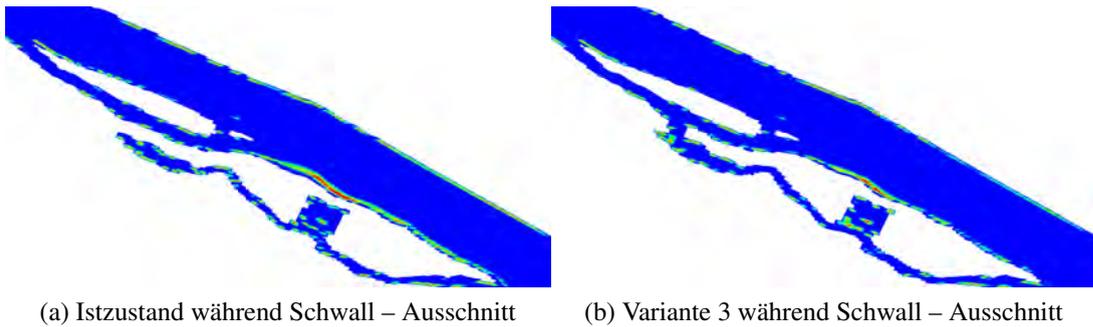
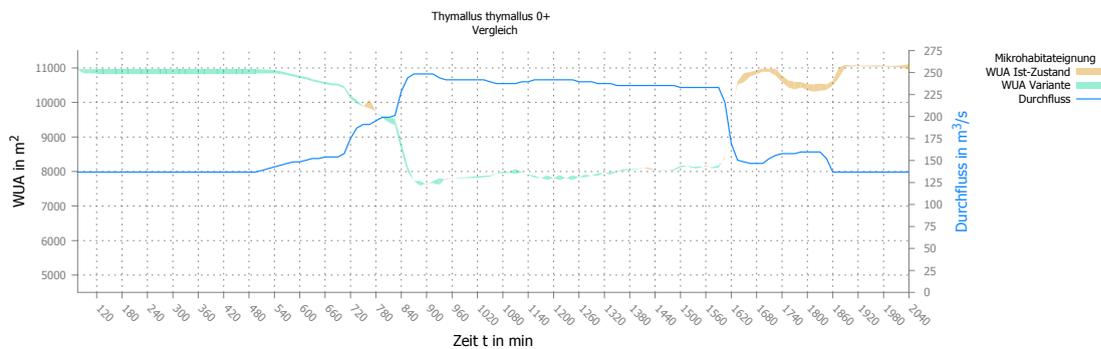
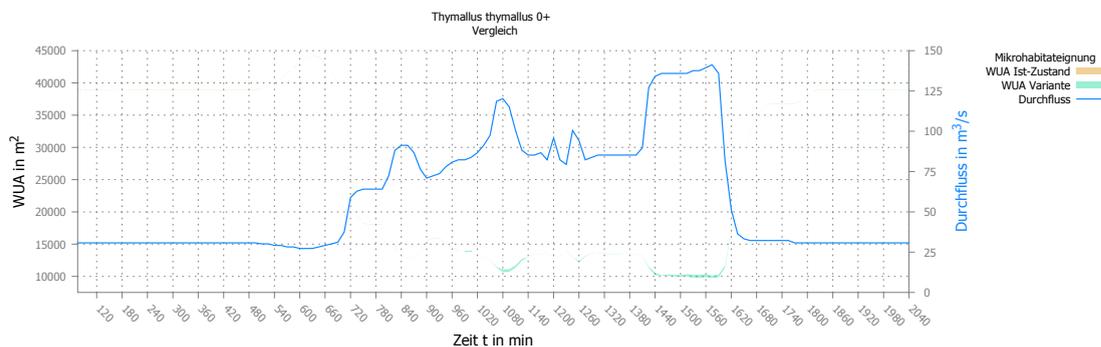


Abbildung 5.13: Ausschnitt: Habitatverteilung im Sommer (Drau, Äsche)

**Verlauf der WUA** Analog zur Bachforelle zeigt sich, dass die Äsche durch die Verbindung der schmalen Seitenarme profitiert – wenn auch nur in sehr geringem Ausmaß (sh. Abbildung 5.14).

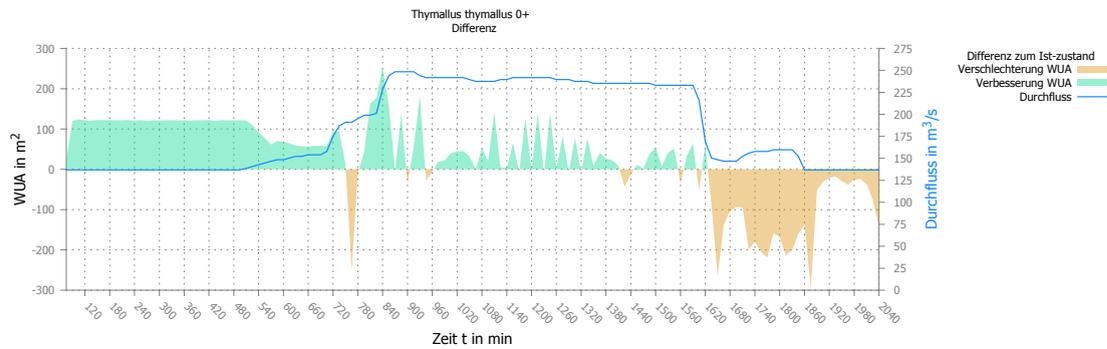


(a) Sommer – WUA parallel

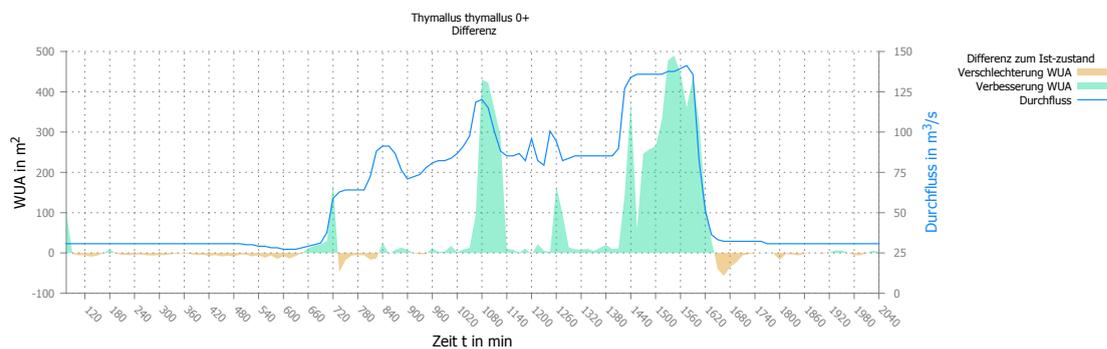


(b) Winter – WUA parallel

Abbildung 5.14: WUA während Schwall im Sommer und Winter (Drau, Äsche)



(c) Sommer – Differenz der WUA



(d) Winter – Differenz der WUA

Abbildung 5.14: WUA während Schwall im Sommer und Winter (Drau, Äsche) (Forts.)

### 5.1.5 Habitatverfügbarkeit im Vergleich

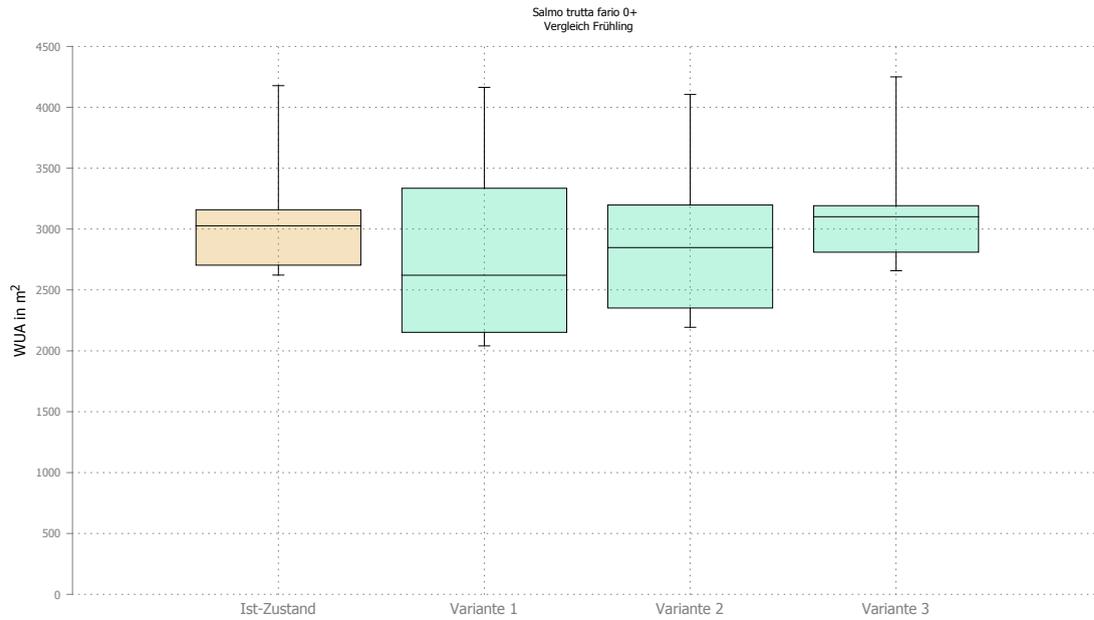
In den Abbildungen 5.15 – 5.20 werden einerseits statistische Kennwerte mit Hilfe von Box-Plots (sh. 4.6.4) dargestellt und andererseits die Entwicklung (des Medians) der WUA über die verschiedenen Jahreszeiten bildlich gemacht.

Mit dieser Darstellung und der statistischen Grundlage lassen sich die Varianten untereinander und mit dem Istzustand am verlässlichsten bewerten und vergleichen. Im Fall der Box-Plots ist ein größerer Median-Wert (entsprechend der mittleren Linie innerhalb der Box) sowie eine Ausdehnung in höhere Bereiche der WUA-Achse gleichzusetzen mit besseren Lebensraumbedingungen. Die saisonale Entwicklung verdeutlicht, dass die Szenarien zu unterschiedlichen Zeiten Defizite und Stärken aufweisen, diese zeigen sich besonders im Sommer während des größten Durchflusses.

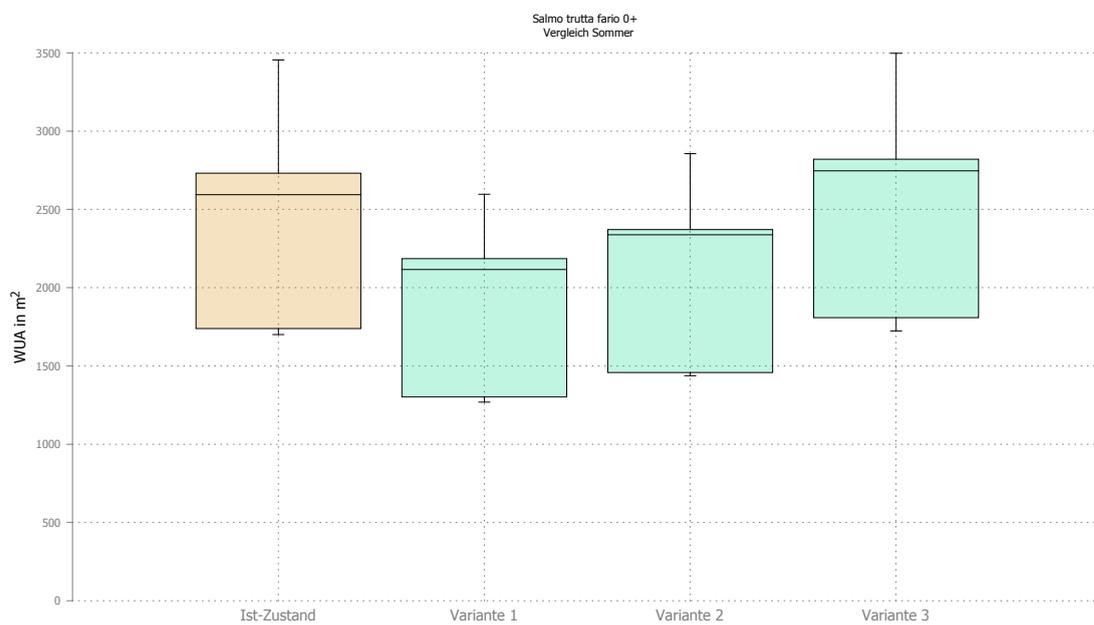
### Bachforelle

Für die Spezies *Salmo trutta fario* zeigt sich deutlich, dass die Strukturierung der Drau (Istzustand) eine vorteilhafte Situation mit sich bringt und die beiden regulierenden Varianten (1 und 2) eine Verschlechterung zur Folge hätte.

Die Abbildungen 5.15 und 5.16 zeigen, dass im Sommer sowie im Frühjahr erheblich verbesserte Bedingungen für die zu dieser Zeit noch sehr schwachen jungen Fische herrschen. Die geringen Veränderungen im Winter sind nicht mehr so maßgeblich.



(a) Frühling



(b) Sommer

Abbildung 5.15: Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Drau, Bachforelle) – Frühling und Sommer

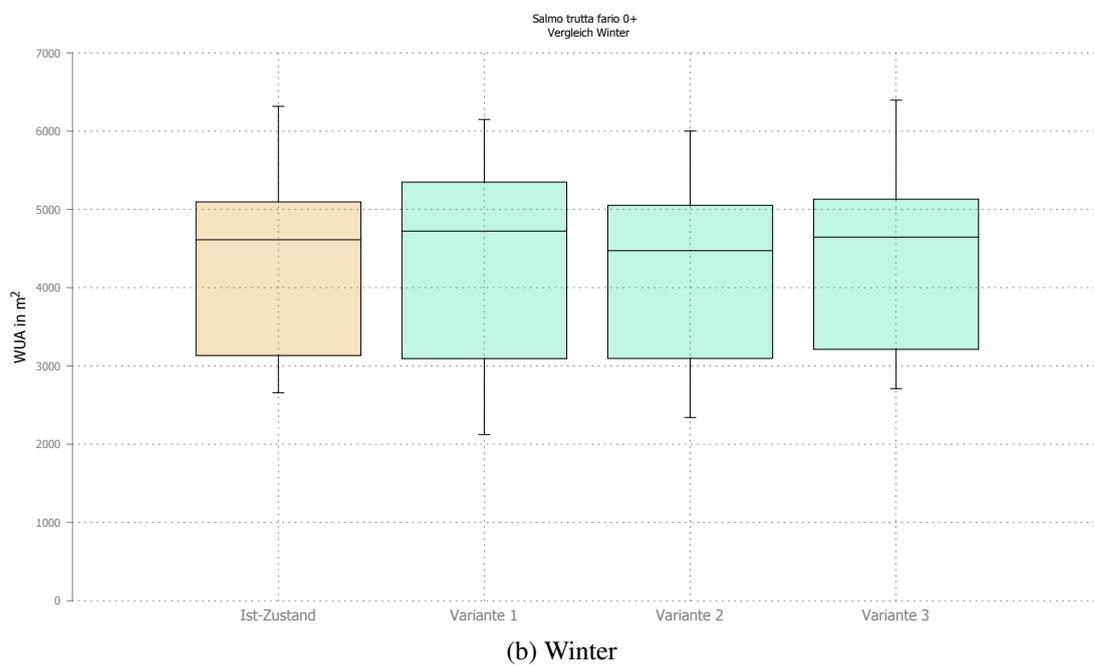
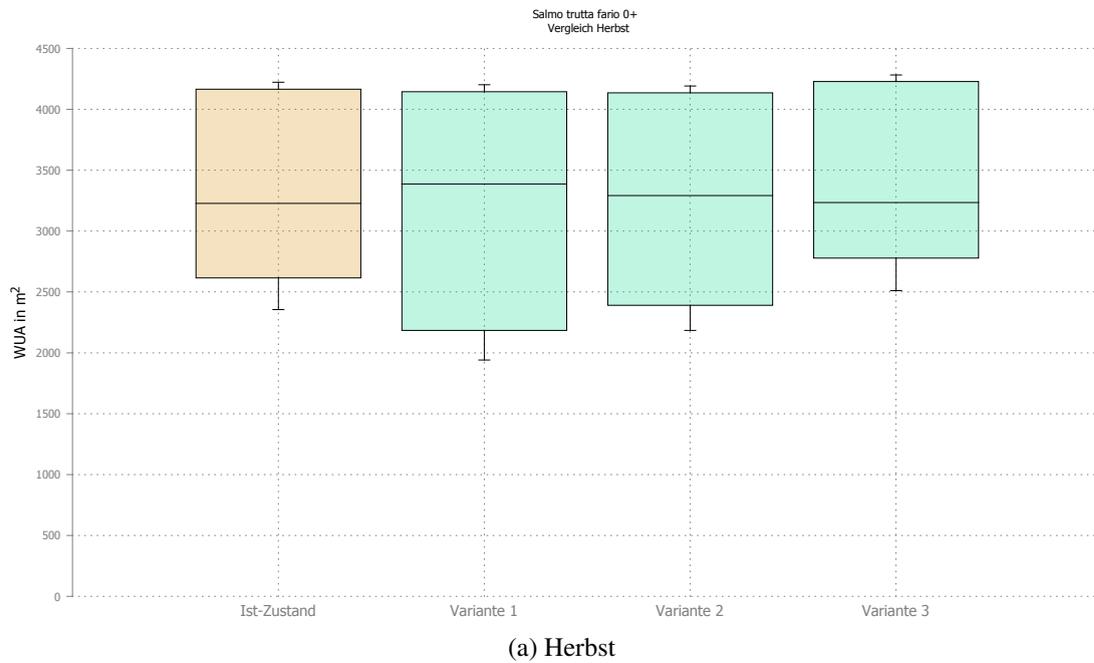


Abbildung 5.16: Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Drau, Bachforelle) – Herbst und Winter

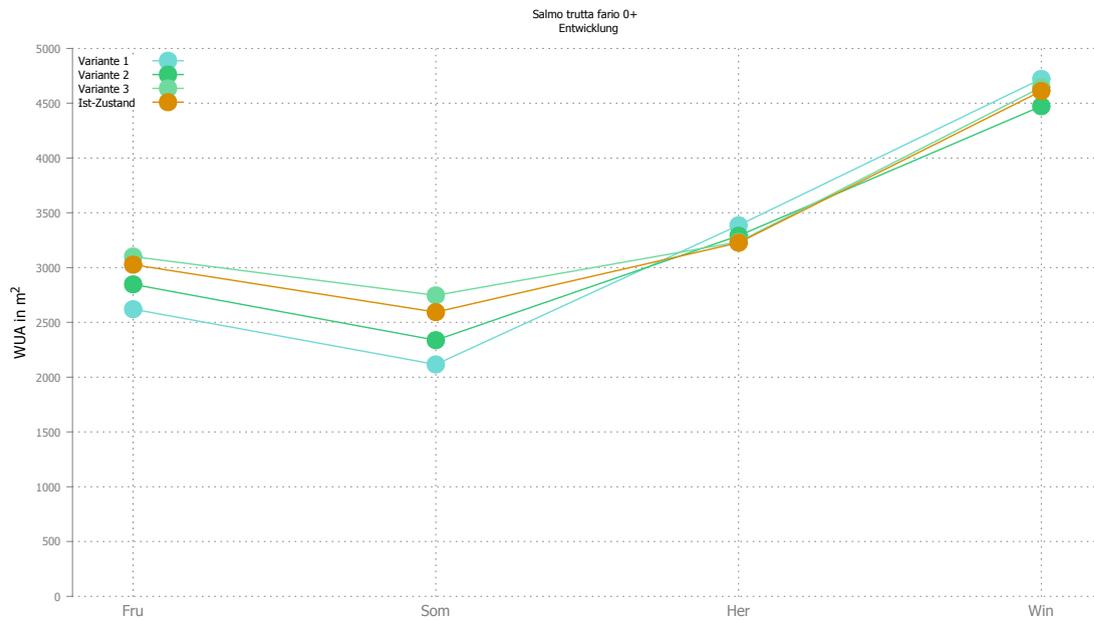


Abbildung 5.17: Jahreszeitliche Entwicklung der Mediane (Drau, Bachforelle)

### Europäische Äsche

*Thymallus thymallus* verhält sich merkbar unsensibler gegenüber den Veränderungen an der Gewässergeometrie: vor allem zur Zeit der geringsten WUA, im Frühling und Sommer, kann man davon ausgehen, dass durch den Wegfall der Seitenarme eine markante Verschlechterung auftreten würde (sh. z. B. Abbildung 5.18b).

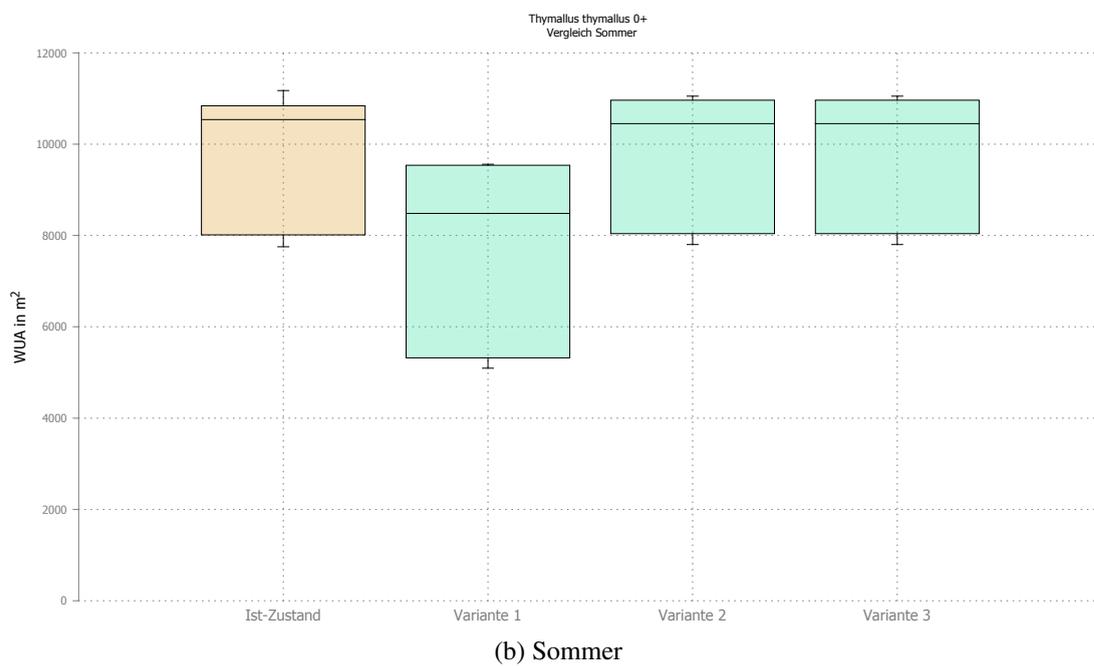
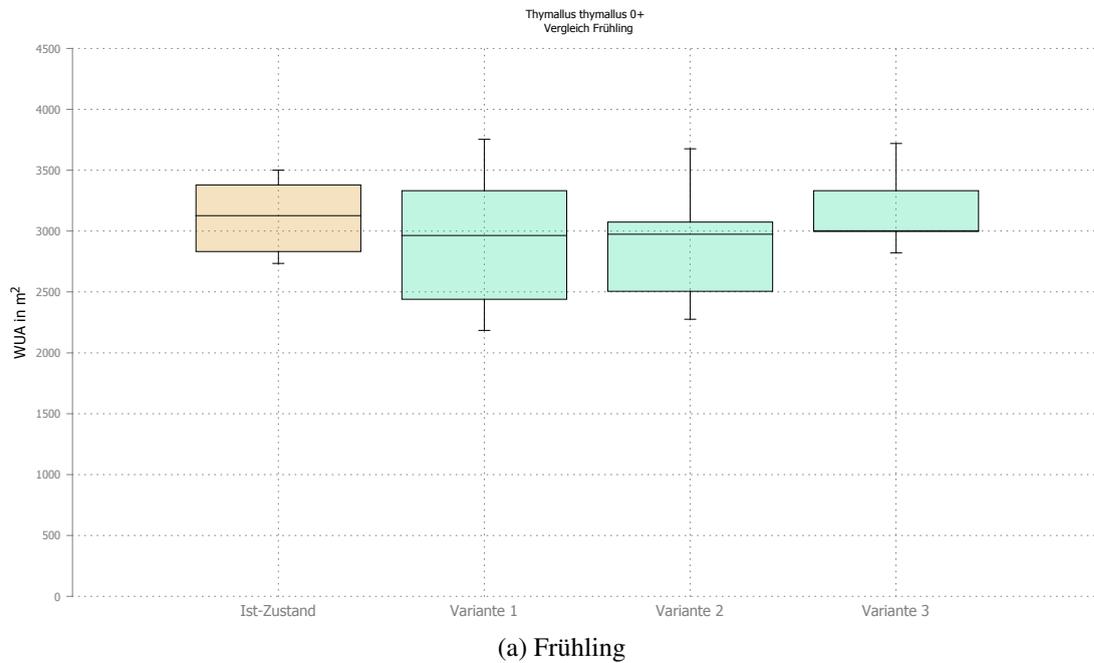


Abbildung 5.18: Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Drau, Äsche) – Frühling und Sommer

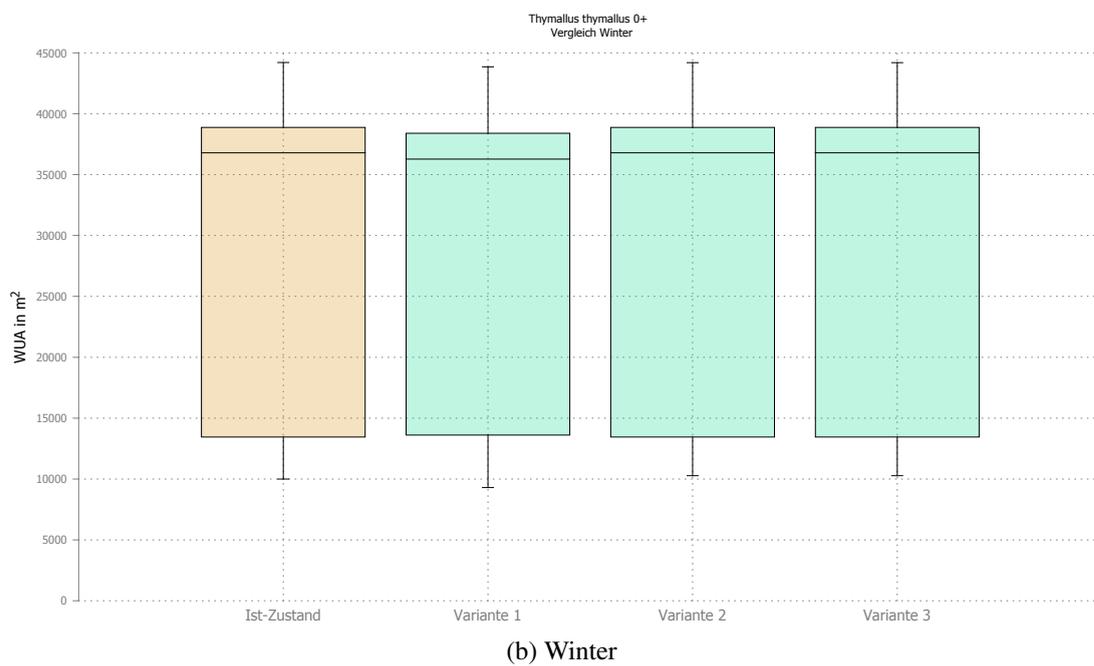
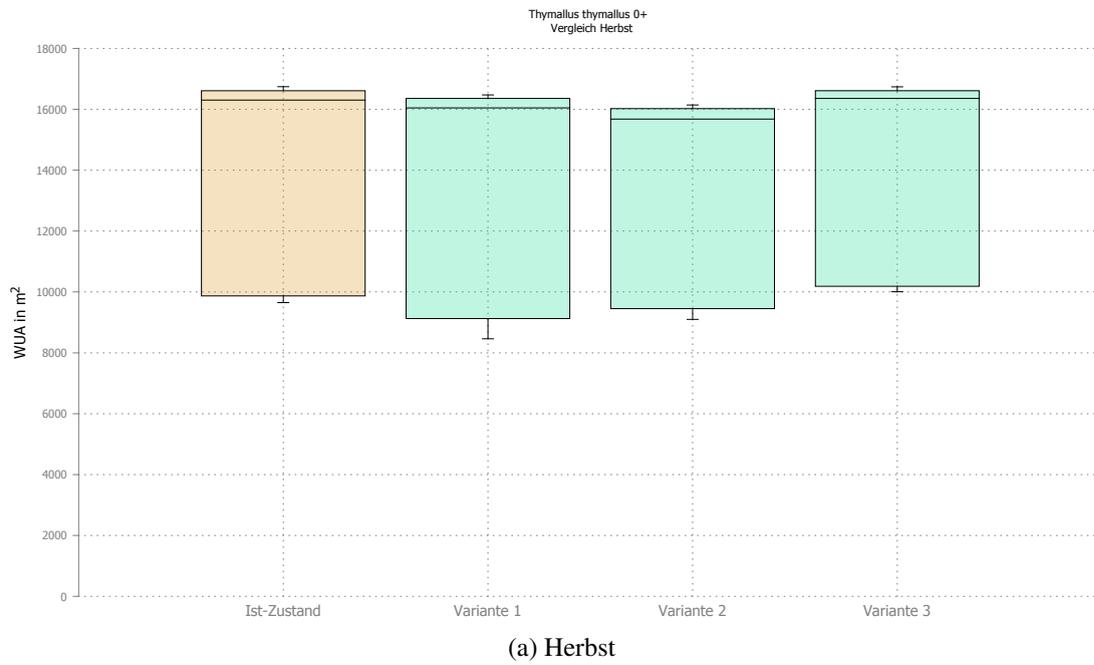


Abbildung 5.19: Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Drau, Äsche) – Herbst und Winter

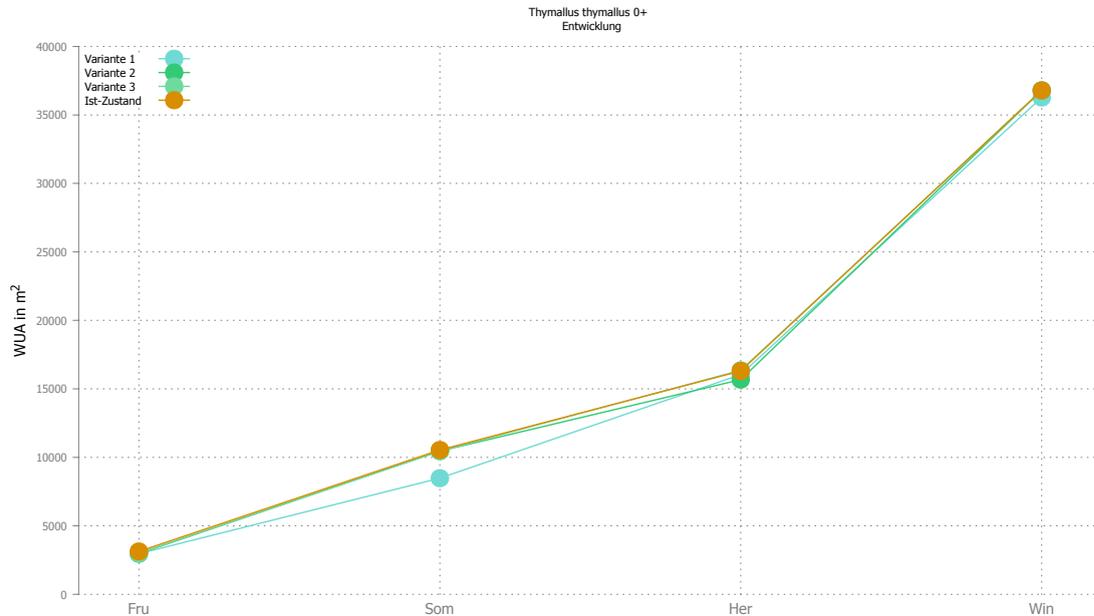


Abbildung 5.20: Jahreszeitliche Entwicklung der Mediane (Drau, Äsche)

### Vergleich der Spezies

Nach dem Schlüpfen der Fischlarven im Frühjahr, sind beide Arten stark auf strömungsberuhigte Bereiche und Kiesstrukturen angewiesen. Mit der weiteren Entwicklung der Äsche erfolgt jedoch eine anatomisch bessere Anpassung an stärkere Strömungen im Vergleich zur Bachforelle. Allgemein lässt sich deshalb feststellen, dass die Bachforelle ab einem gewissen Alter dem Schwalleinfluss schwerwiegender ausgesetzt ist als die Äsche und sie durch eine Verschlechterung der ökologischen Situation härter getroffen würde.

Tabelle 5.1 zeigt beispielhaft auf, wie sich die WUA der Bachforelle im Vergleich mit der Äsche verhält: bei der begradigten Variante reduziert sich bei beiden Spezies das Habitatangebot stark – der weniger empfindlichen Äsche steht jedoch im untersuchten Abschnitt (in Relation) ein großes Gebiet als Lebensraum zur Verfügung.

Tabelle 5.1: Vergleich der WUA bei Regulierung (Drau, Variante 1)

	Bachforelle	Äsche
Sommer	1250 m <sup>2</sup>	5000 m <sup>2</sup>
Winter	2100 m <sup>2</sup>	10000 m <sup>2</sup>

Die Habitatsensibilität der jungen Bachforelle gegenüber äußeren Einflüssen macht diese Spezies jedoch zu einem ausgezeichneten Zeigerorganismus, weshalb sie auch für die Habitatmodellierung dieser Arbeit ausgewählt wurde.

## 5.2 III – Strecke 2

### 5.2.1 Istzustand

Der untersuchte Teil der III ist eine großteils gerade verlaufende Strecke mit linksufrigen Buhnen und anschließender Bewaldung. Alle Untersuchungen beziehen sich auf die Bachforelle.

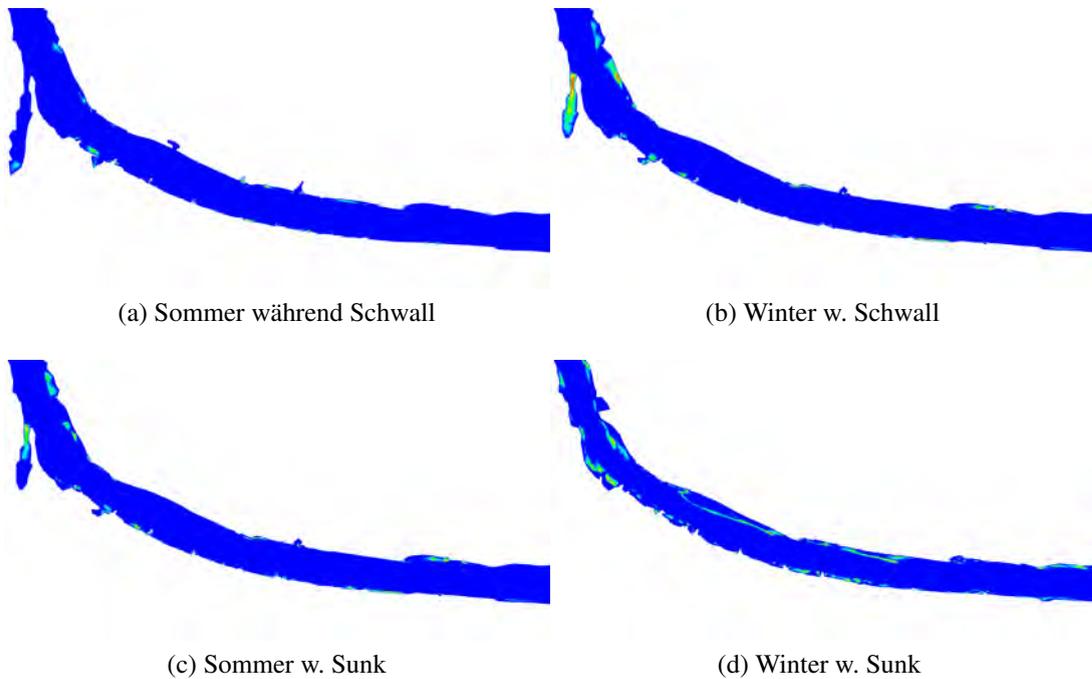


Abbildung 5.21: Habitatverteilung für den Istzustand im Sommer und Winter (III)

Bisher verfügbare Habitate sind hauptsächlich am unteren Teil der Strecke zu finden, besonders dort, wo ein kleinerer Bach zufließt (sh. Abbildung 5.21). In diesen erfolgt bei größeren Durchflüssen auch ein bemerkenswerter Rückstau. Auffällig sind die im Winter während Sunk (sh. 5.21d) vorhandenen langgezogenen Habitate im Bereich der Kiesbänke am rechten Ufer sowie die kleinräumigen Strukturen in den Buhnenfeldern.

### 5.2.2 Variante 1: Buhnen hinterschnitten

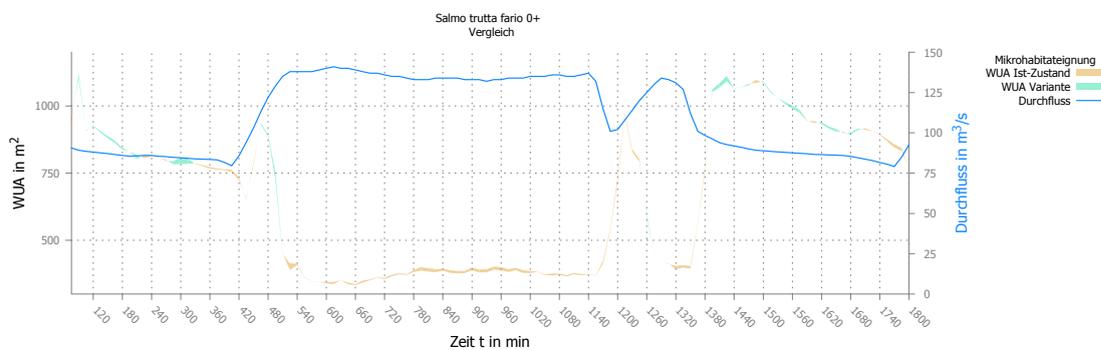
Bei diesem Szenario werden die Buhnen an der Wurzel so eingeschnitten, dass sie beim niedrigsten Durchfluss überströmt werden. Dies soll eine veränderte Strömung im Buhnenfeld dahinter bewirken, hat jedoch – wie sich herausstellt – keine allzu große positive Beeinflussung auf die Habitateignung (HSI) in diesem Bereich.

Da die Veränderungen an der HSI-Verteilung über die Fließstrecke nur marginal und auf Bildern nur schwer zu erkennen sind, wird für die Übersichtsdarstellung auf die Abbildungen in Anhang 8.3.1 auf Seite 120 verwiesen.

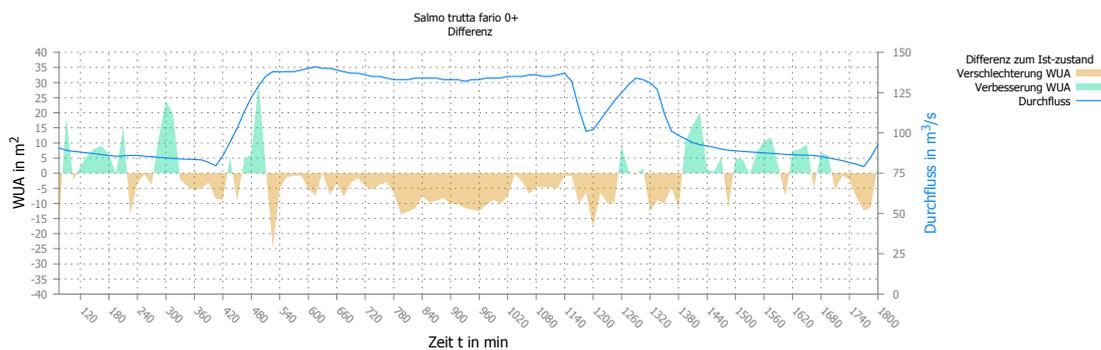
## Verlauf der WUA

Die WUA über den gesamten Bereich wird dementsprechend auch nur geringfügig verändert, wobei der Abbildung 5.22 zu entnehmen ist, dass sich (im Sommer so wie im Winter) bei Sunk eine Verbesserung, bei Schwall jedoch eine Verschlechterung der ökologischen Situation ergibt.

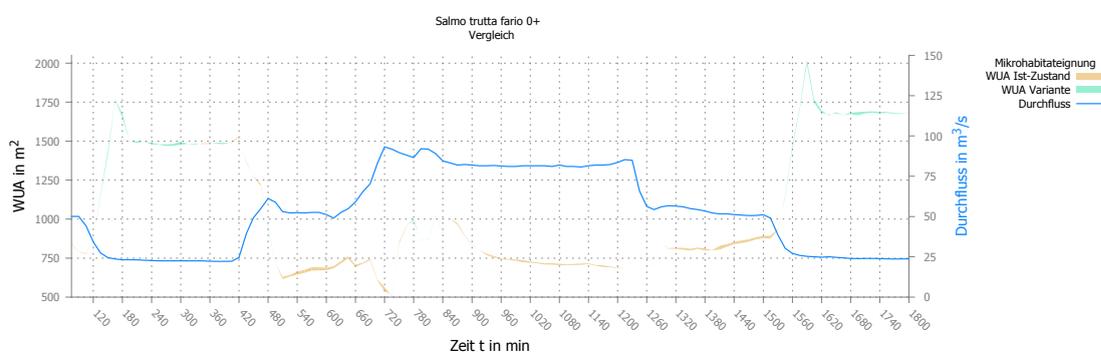
Der Effekt dieser Maßnahme ist insgesamt als sehr gering einzuschätzen.



(a) Sommer – WUA parallel



(b) Sommer – Differenz der WUA



(c) Winter – WUA parallel

Abbildung 5.22: WUA während Schwall im Sommer und Winter (II)

Die Verläufe der WUA für Frühling und Herbst finden sich im Anhang 8.3.1 auf Seite 120.

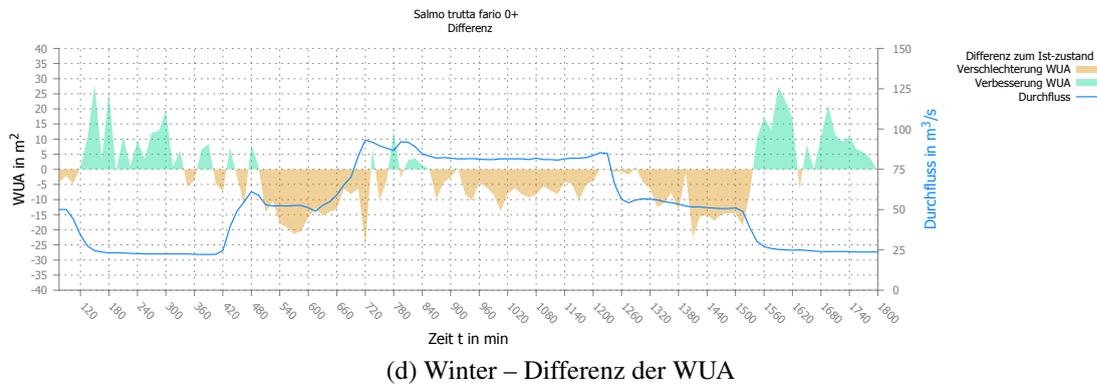


Abbildung 5.22: WUA während Schwall im Sommer und Winter (III) (Forts.)

### 5.2.3 Variante 2: Umgehungsgerinne

Eine wasserbauliche Maßnahme, die ein zufriedenstellendes Ergebnis erwarten lässt, ist die Gestaltung eines Umgehungsgerinnes. Linksufrig wird in der Variante 2 eine kleine Wassermenge von 200 l/s über eine naturnah gestaltete Strecke von ca. 540 m ausgeleitet. Der Höhenunterschied beträgt über diese Länge 2,40 m, als Strickler-Wert  $k_s t$  wurde  $25 \text{ m}^{\frac{1}{3}} \text{ s}^{-1}$  für das Gerinne angenommen (BMLFUW 2012, S. 78), die Sohle ist 3 m breit, die Böschung 1 : 1 geneigt – es ergibt sich eine rechnerische Wassertiefe von 15 cm.

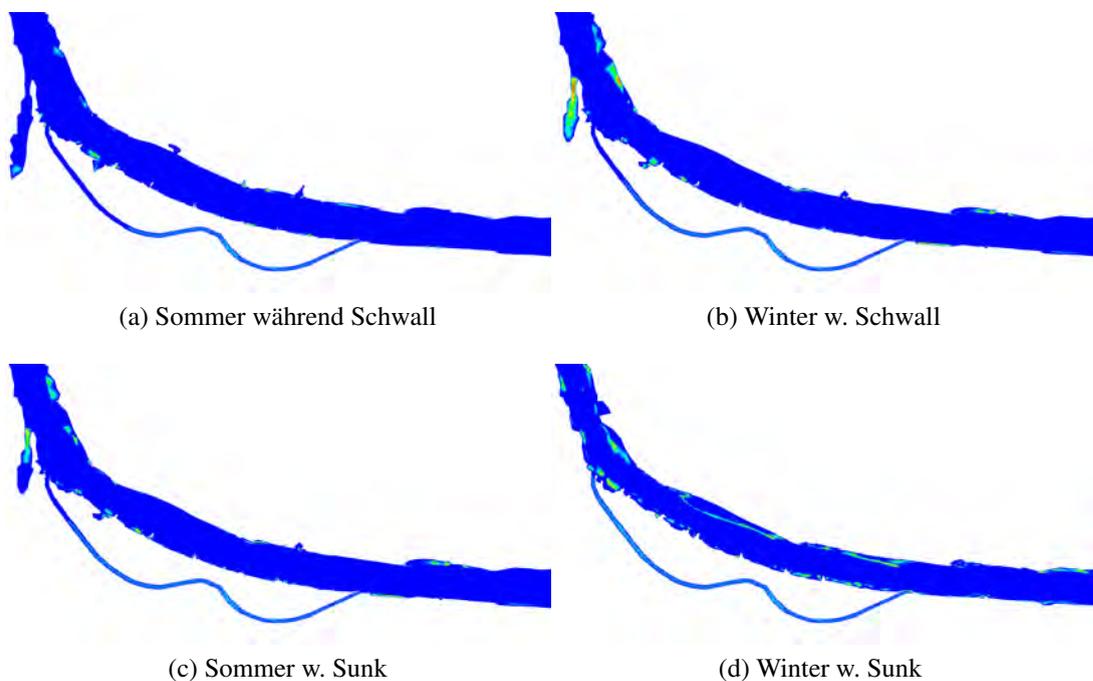


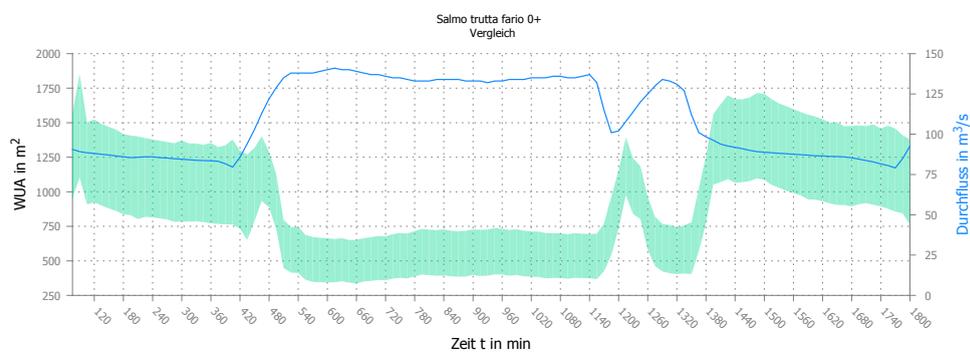
Abbildung 5.23: Habitatverteilung für die Variante im Sommer und Winter (III)

### Verlauf der WUA

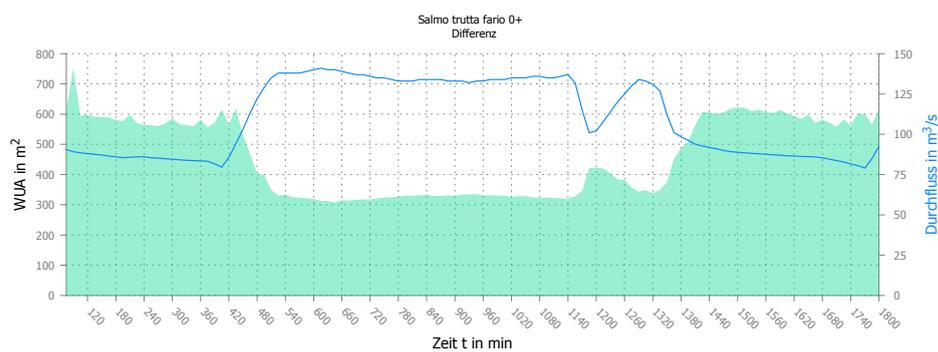
Der Verlauf in Abbildung 5.24 zeigt, dass durch diese Maßnahme während des Schwall eine Erhöhung der WUA um ca.  $+320 \text{ m}^2$  (Sommer) bzw. annähernd  $+540 \text{ m}^2$  (Winter)

erzielt werden kann – wobei fest steht, dass sich dieses Habitat fast zur Gänze auf das Umgehungsgerinne konzentriert, während der Hauptstrom keine großartigen Änderungen erfährt.

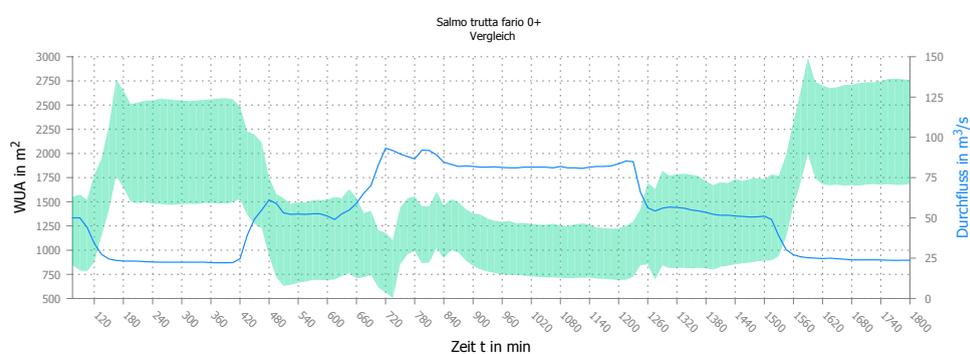
Durch raue Strukturelemente (Wasserbausteine) kann die Eignung noch weiterhin gesteigert werden und optimal an die vorhandene Fischfauna angepasst werden. Für die 2D-Modellierung sollen allerdings die vereinfachten Annahmen und ein fixer Rauigkeitswert ausreichen.



(a) Sommer – WUA parallel



(b) Sommer – Differenz der WUA



(c) Winter – WUA parallel

Abbildung 5.24: WUA während Schwall im Sommer und Winter (III)

Die Verläufe der WUA für Frühling und Herbst finden sich im Anhang 8.3.2 auf Seite 122.

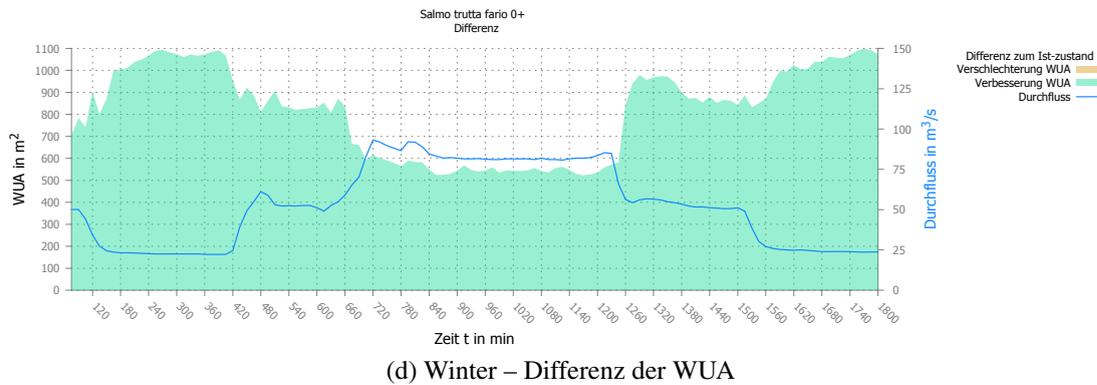


Abbildung 5.24: WUA während Schwall im Sommer und Winter (III) (Forts.)

### Probleme bei der Ausführung

Bei der Modellierung des Gerinnes wurde zuerst eine Öffnung am linken Ufer angenommen, durch die das Wasser ab einem bestimmten Wasserstand fließt – jedoch soll der künstlich geschaffene Bach bei niedrigen Durchflüssen nicht trocken fallen. Bei einer derartigen Herangehensweise zeigt sich allerdings, dass eventuell im Winter optimale Voraussetzungen geschaffen werden können, bei einem Schwall (vor allem im Sommer) jedoch viel zu große Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen herrschen (aufgrund der Energiehöhe beim Einlass).

Simple Methoden, das Wasser aus dem Hauptstrom abzuführen (feste Überfälle, Durchlässe) bewirken einen zu großen Anstieg des Durchflusses, der nicht mehr vorteilhaft ist. Organismenwanderhilfen (Fischaufstiegshilfen) bei Laufkraftwerken haben dieses Problem oft nicht, weil im Oberwasser ein konkretes Stauziel und somit eine konstante Energiehöhe des Wassers eingehalten wird.

Aus den genannten Gründen erfolgte die endgültige Modellierung so, dass der Fluss vom Umgehungsgerinne getrennt und der Zufluss zum Gerinne konstant definiert wurde. Diese Modellannahme ließe sich in der Realität durch einen Regelmechanismus und einem beweglichen Einlass, der abhängig von Wasserstand oder Durchfluss ist, realisieren. So kann dafür gesorgt werden, dass das geschaffene Habitat vom Schwallbetrieb weitgehend unbeeinflusst ist.

Des weiteren zeigt die Berechnung, dass bei großen Abflüssen bzw. Wasserständen das Umgehungsgerinne von unten teilweise eingestaut wird – das damit verbundene Problem ist zwar nicht so gravierend, bei einer Umsetzung der Maßnahme muss dies ebenfalls berücksichtigt werden.

#### 5.2.4 Variante 3: Streckenweise Aufweitung

Am Beispiel der Drau (sh. Abschnitt 5.1) wurde erfolgreich verifiziert, dass eine Aufweitung bzw. die damit einhergehende eigendynamische Neustrukturierung weitreichende positive Auswirkungen für die Gewässerfauna haben kann. In Abbildung 5.25 ist zu sehen, wo die Aufweitung im Modell der III umgesetzt wurde: die Buhnen wurden entfernt und die Breite auf das ca. 1,5-Fache vergrößert.

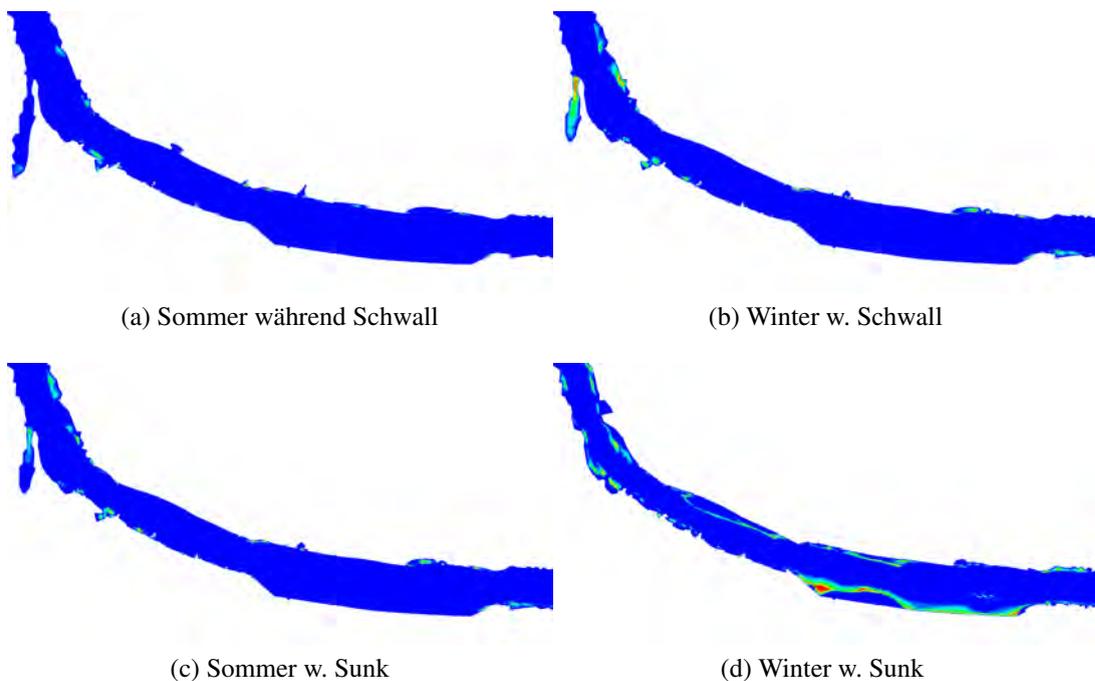


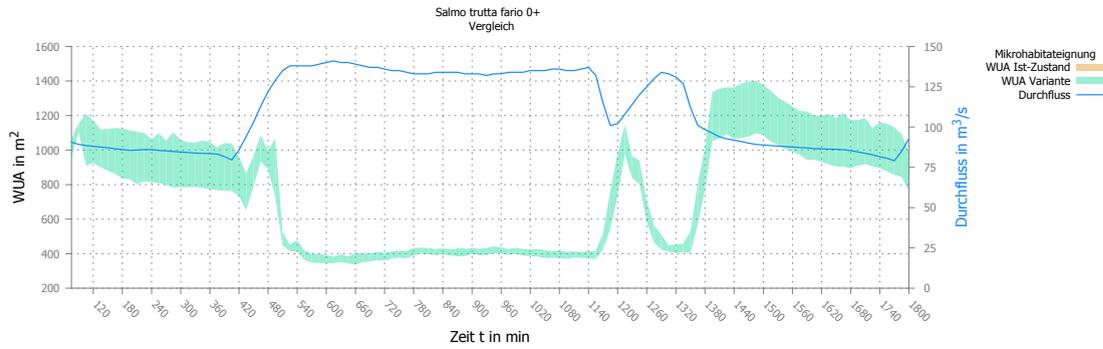
Abbildung 5.25: Habitatverteilung für die Variante im Sommer und Winter (III)

Die Habitate, wie sie in Abbildung 5.25d zu erkennen sind, dient als Beispiel dafür, wie die Ablagerungen von Sedimenten aufgrund der reduzierten Fließgeschwindigkeiten neue Strukturen im flachen Uferbereich entstehen lassen können.

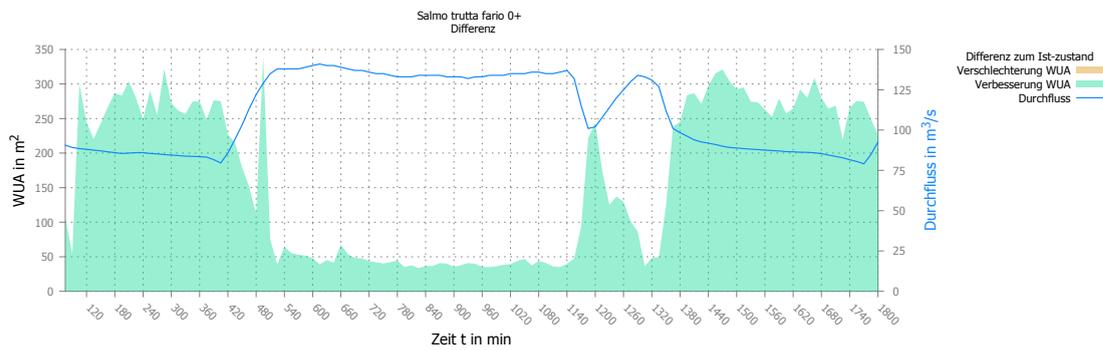
### Verlauf der WUA

Für das durch die Maßnahme der Aufweitung geschaffene Szenario ist in Abbildung 5.26 der Verlauf der WUA abgebildet, der insgesamt als positiv bewertet werden kann: treten im Sommer relativ geringe Verbesserungen auf, vergrößert sich die WUA im Winter während des Schwalls um ca.  $+2000\text{m}^2$  während des Schwalls und um  $+200\text{m}^2$  beim Sunk.

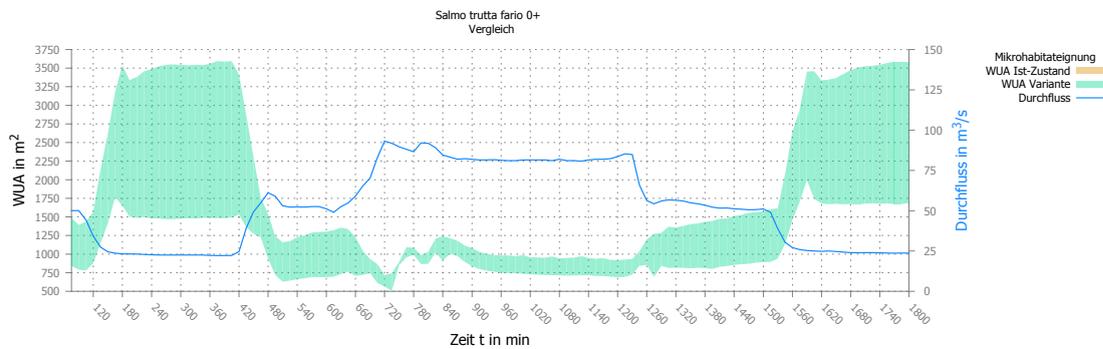
Die Verläufe der WUA für Frühling und Herbst finden sich im Anhang 8.3.3 auf Seite 123.



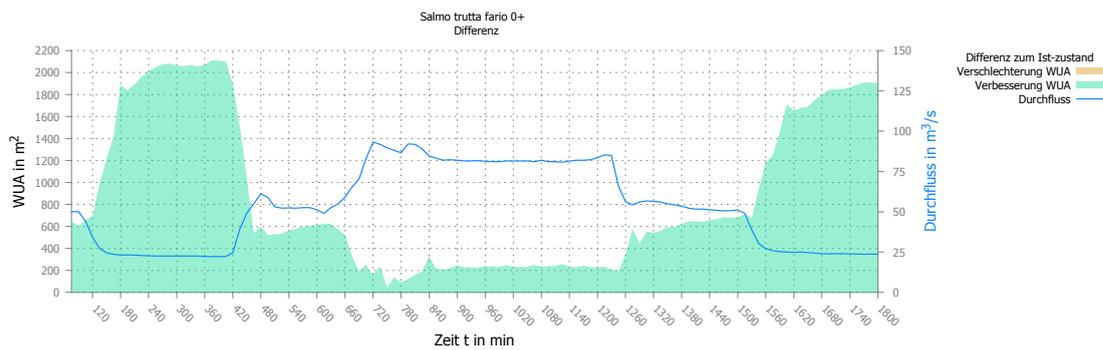
(a) Sommer – WUA parallel



(b) Sommer – Differenz der WUA



(c) Winter – WUA parallel



(d) Winter – Differenz der WUA

Abbildung 5.26: WUA während Schwall im Sommer und Winter (III)

### 5.2.5 Habitatverfügbarkeit im Vergleich

Der statistische Vergleich (sh. Abbildung 5.27) macht deutlich, wie wirkungsvoll die zweite und dritte Variante sind. Obwohl das Szenario der Aufweitung im Frühling und Winter eine sehr große Spannweite aufweist, die die insgesamt größten WUA-Werte umfasst, liegt der Median durchwegs niedriger als der der Variante mit Umgehungsgerinne.

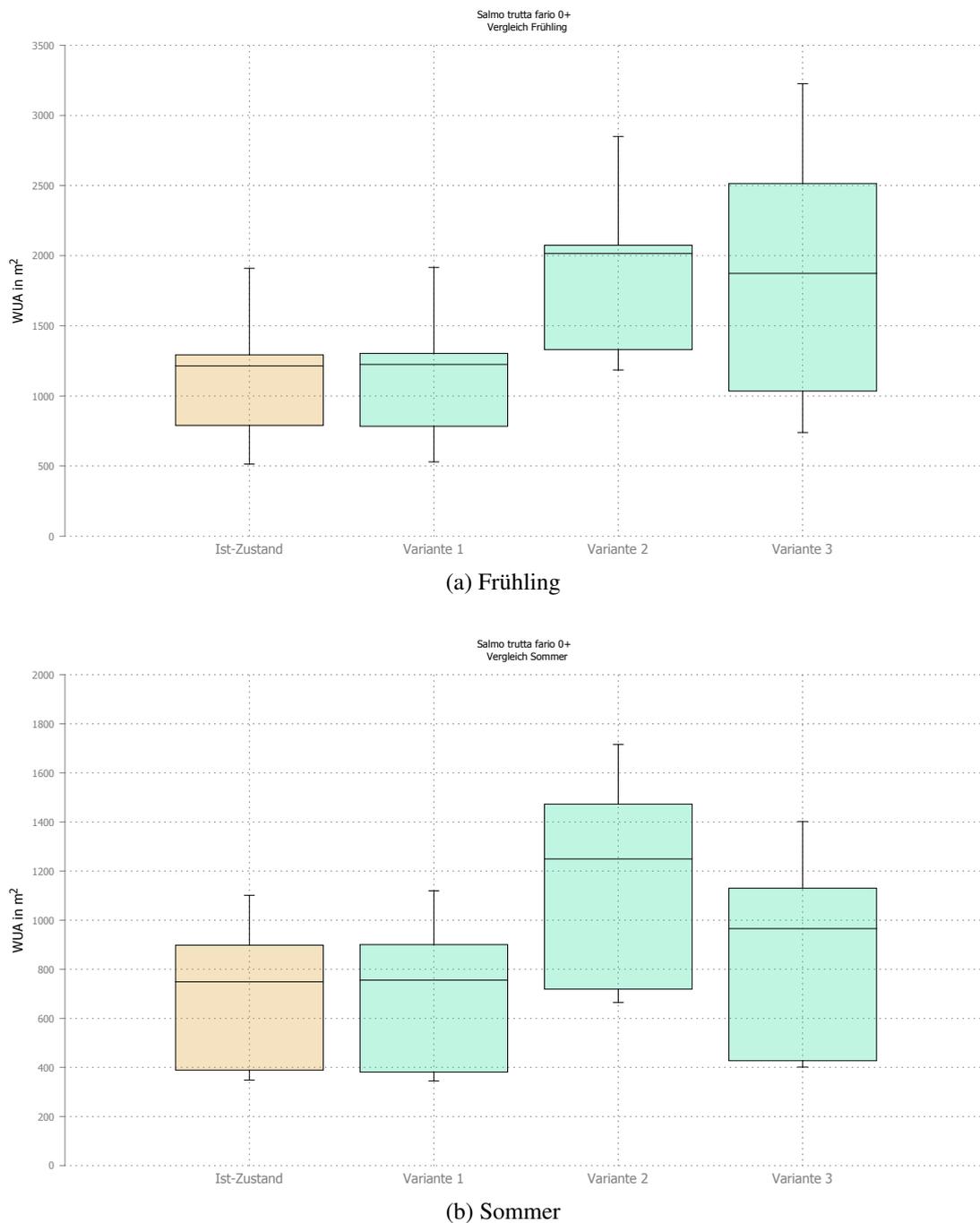


Abbildung 5.27: Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (III) – Frühling und Sommer

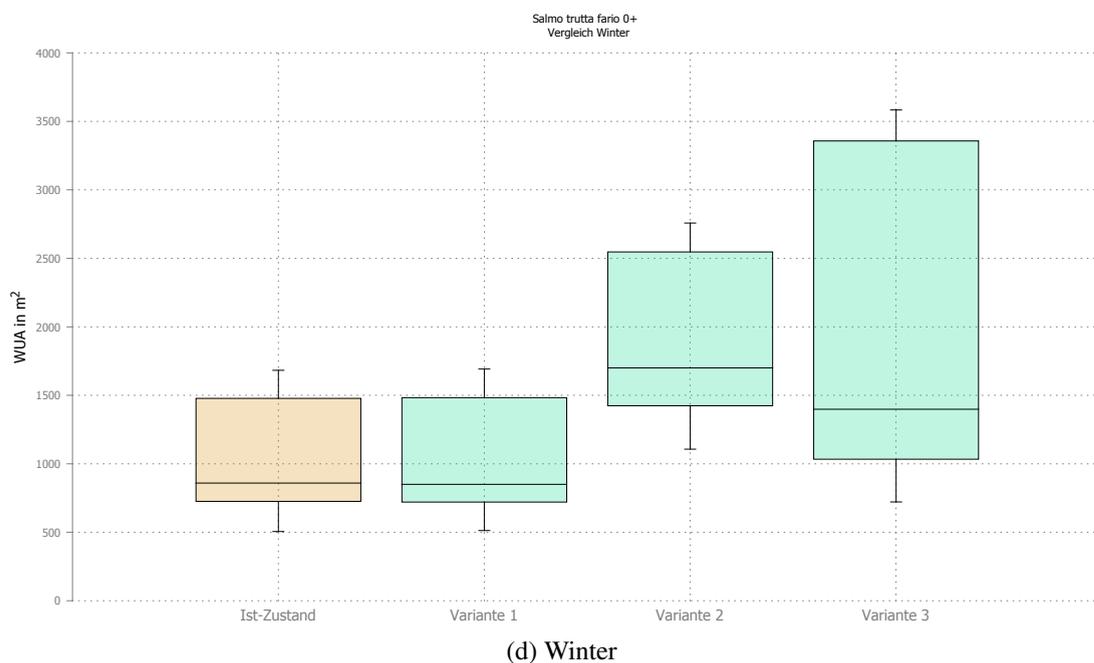
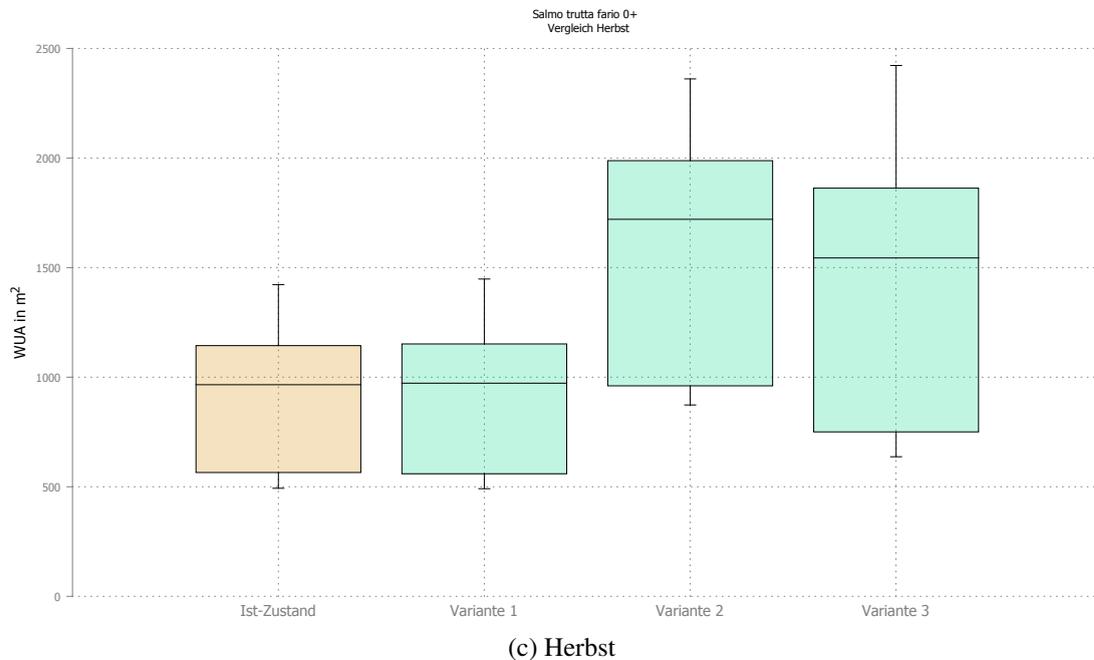


Abbildung 5.27: Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (III) – Herbst und Winter

Im Sommer und Herbst sowie in Abbildung 5.28 ist auch deutlich, dass die zweite Variante (Umgehungsgerinne) die ökologisch bessere ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass diese Maßnahme sich aufgrund des viel geringeren Erdaushubs auch als weniger aufwändig gestaltet.

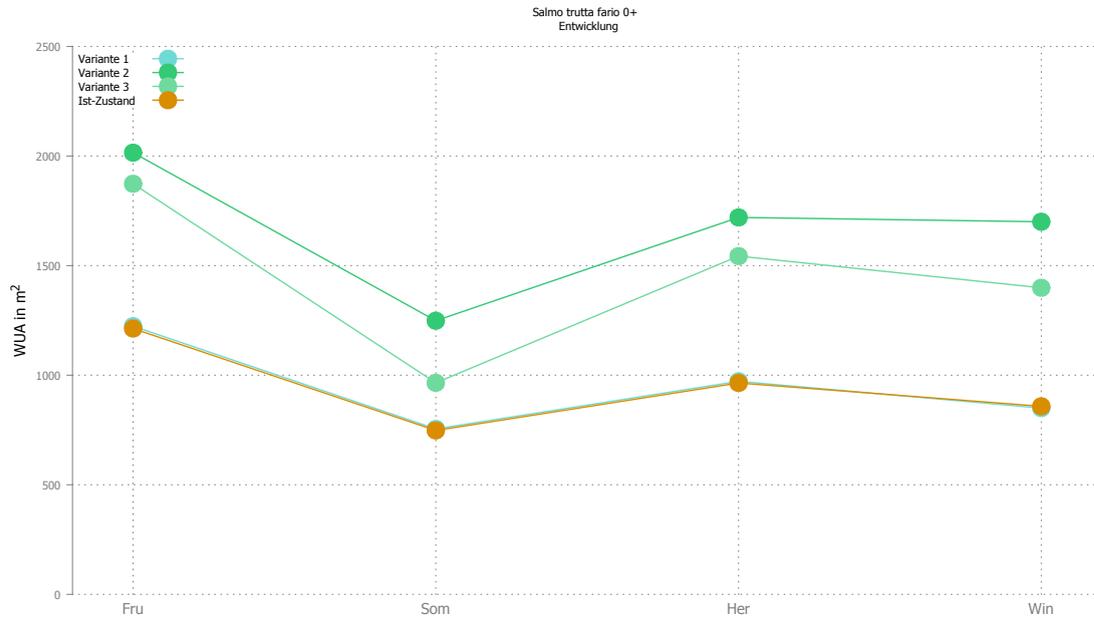


Abbildung 5.28: Jahreszeitliche Entwicklung der Mediane (III)

### Sedimenttransport bei Aufweitungen

Durch eine Aufweitung des Flussquerschnittes kommt es aufgrund von geringeren Geschwindigkeiten und Wassertiefen zu kleinere Sohlschubspannungen und damit verbunden zu einer verminderten Sedimenttransportkapazität. Dies führt – genügend Feststoffeintrag vorausgesetzt – über eine längere Zeit zu Anlandungen und Umlagerungen in diesem Bereich. Je nach Sedimentvoraussetzungen können sich Kiesbänke und Nebenarme eigendynamisch ausbilden.

Bei weiterführenden Überlegungen zu dieser Variante sollte eine Simulation der Transportprozesse durchgeführt werden – dadurch kann zumindest eine grobe, qualitative Abschätzung der entstehenden Sohle getroffen werden.

## 5.3 Inn – Strecke 1

### 5.3.1 Istzustand

Für diesen Gewässerabschnitt werden die bestehenden Bühnenfelder großräumig ausgedehnt und angehoben, um künstlich im Modell ein flaches Habitat zu schaffen, dessen Strömung beruhigt ist. In der Abbildung 5.29 ist die Ist-Situation des HSI dargestellt. Für die Habitatmodellierung wurde (wie bereits bei Modellierung der Drau und der Ill), die Bachforelle im Alterstadium 0+ eingesetzt.

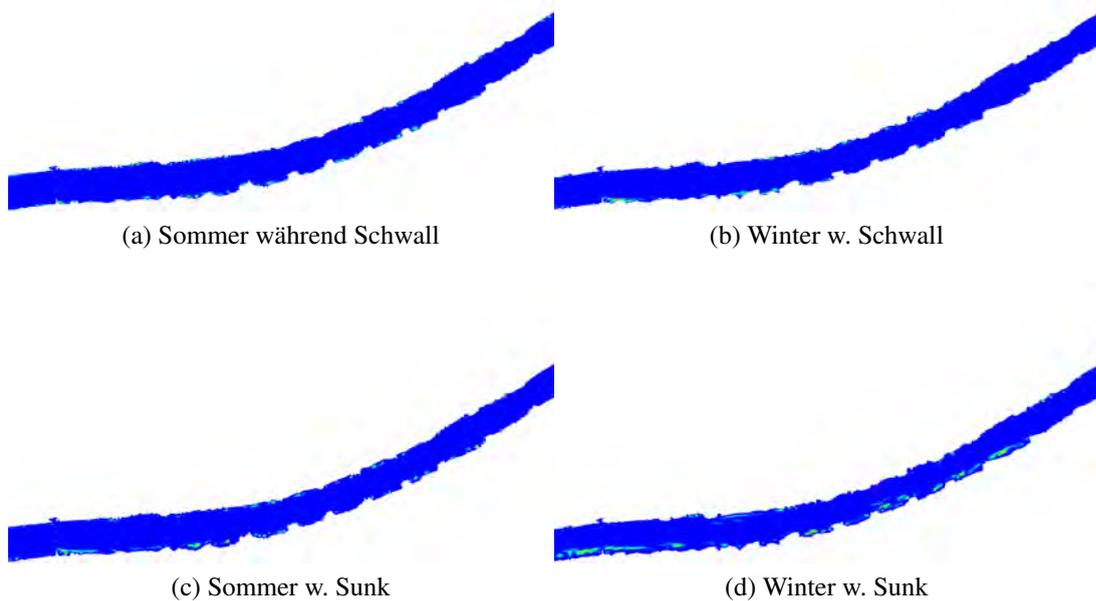


Abbildung 5.29: Habitatverteilung für den Istzustand im Sommer und Winter (Inn Str. 1)

### 5.3.2 Variante: ausgedehnte Bühnenfelder

Für die untersuchte Variante wurden (willkürlich) vier Bühnenfelder gewählt und das Gerinne in diesem Bereich verbreitert (sh. Abbildung 5.30). Bei dieser Vorgehensweise machen sich die Probleme der Wasserspiegelschwankungen schon beim Modellieren am Computer bemerkbar – so musste diese Variante einige Male optimiert werden, um die gewünschten niedrigen Wasserstände bei dem geringstem Durchfluss (bei Sunk im Winter) zu gewährleisten (sh. 5.30d). Ein Trockenfallen dieser Flächen soll so häufig wie möglich verhindert werden, da dies zum Stranden der Fische (und anderer Organismen wie z. B. Makrozoobenthos) führen kann. Durch diesen limitierenden Umstand kann die Geometrie generell nur so ausgeführt werden, dass sie bei dem tiefsten Wasserstand den größten Nutzen bietet.

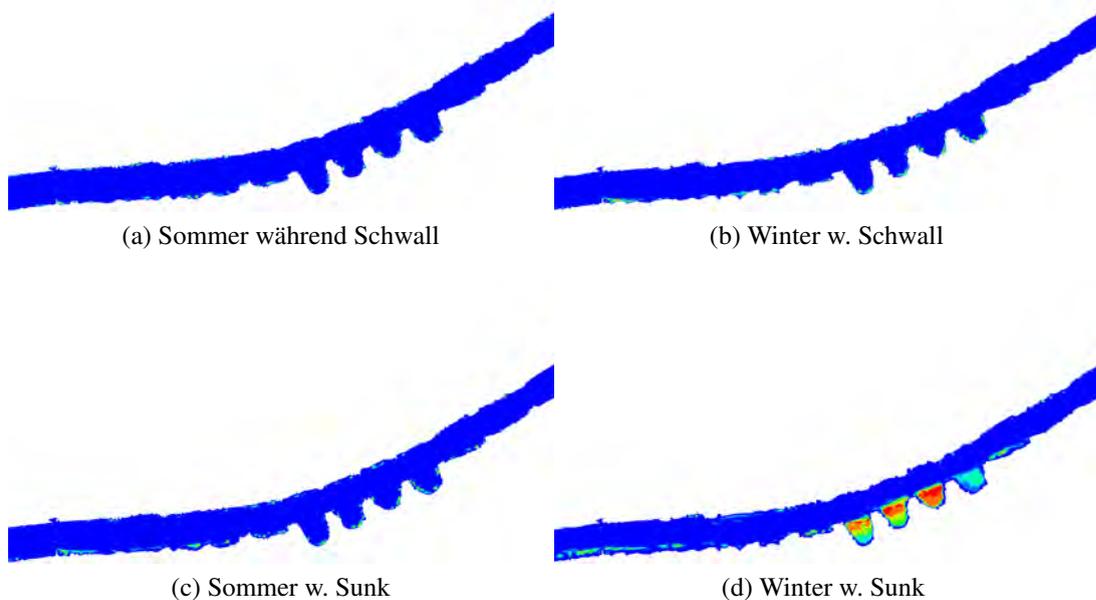


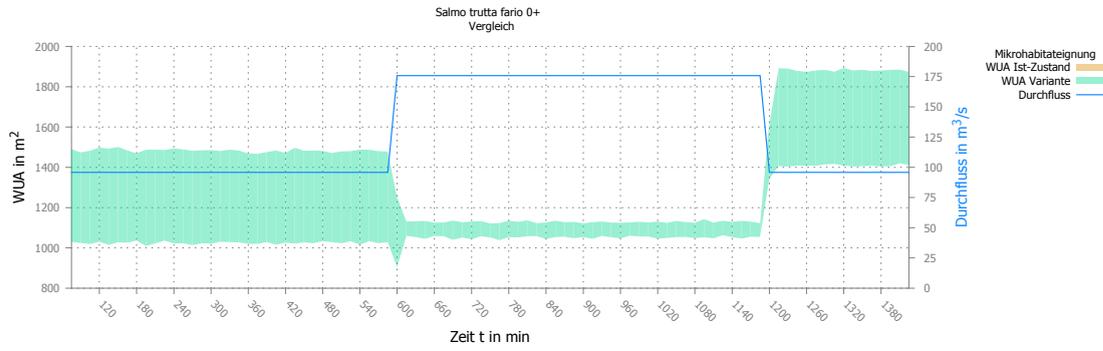
Abbildung 5.30: Habitatverteilung für die Variante im Sommer und Winter (Inn Str. 1)

Für die Modellierungsergebnisse von Frühling und Herbst siehe Anhang 8.4.1 auf Seite 124.

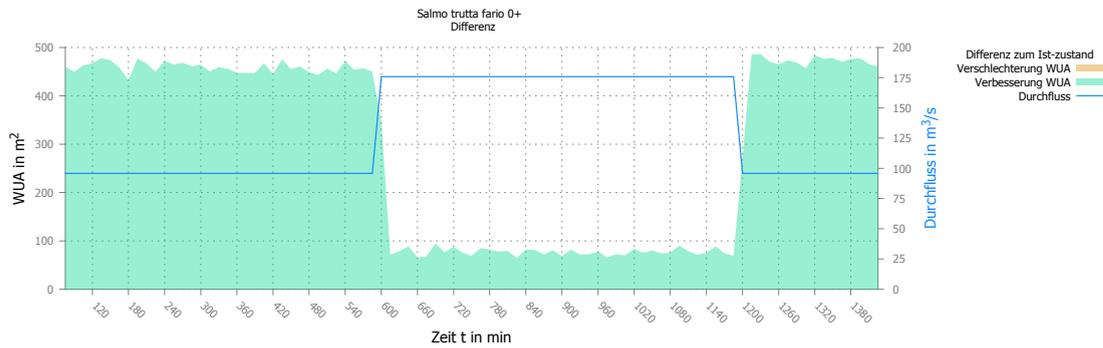
### 5.3.3 Verlauf der WUA

Wie in Abbildung 5.31 deutlich zu erkennen ist, vergrößert sich das Habitat der Bachforelle durch die gesetzten Maßnahmen in großem Ausmaß. Im Winter steigt die WUA beim Sunk durch die seichten Bühnenfelder von ca.  $2000\text{m}^2$  auf  $7000\text{m}^2$  – während des Schwalls kann immerhin eine Veränderung von ca.  $+50\%$  verzeichnet werden, was  $+500\text{m}^2$  entspricht.

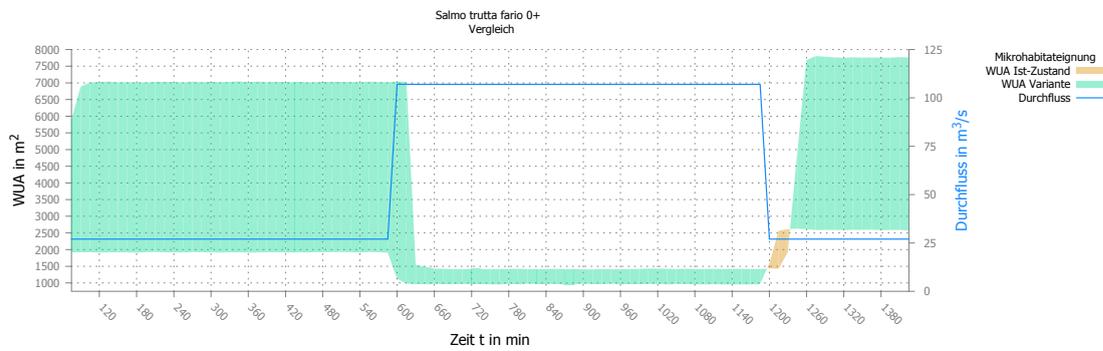
Im Sommer steigt die nutzbare Fläche im Vergleich nur geringfügig an. Die Verbesserung der WUA von ca.  $+450\text{m}^2$  bei Sunk bzw.  $+80\text{m}^2$  während des Schwalls wird durch die Vergrößerung der benetzten Fläche und der Verringerung der Fließgeschwindigkeit in den beruhigten Bereichen hervorgerufen.



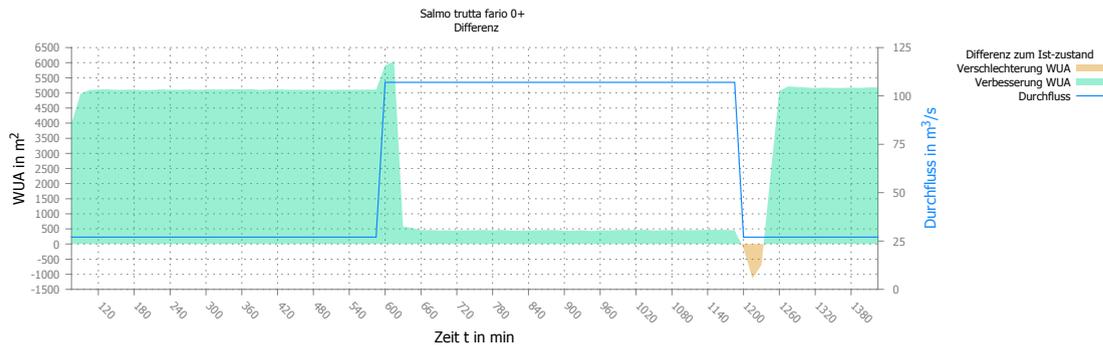
(a) Sommer – WUA parallel



(b) Sommer – Differenz der WUA



(c) Winter – WUA parallel



(d) Winter – Differenz der WUA

Abbildung 5.31: WUA während Schwall im Sommer und Winter (Inn Str. 1)

Die Verläufe der WUA für Frühling und Herbst findet sich im Anhang 8.4.1 auf Seite 124.

### 5.3.4 Habitatverfügbarkeit im Vergleich

Was der WUA-Verlauf bereits gezeigt hat, wird durch Abbildung 5.32 noch einmal bestätigt: die Ausdehnung der Bühnenfelder bewirkt zu jeder Jahreszeit und bei jedem Durchfluss und Wasserstand eine deutliche Vergrößerung des Lebensraumes.

Markant ist in diesen Diagrammen auch, dass die Mediane sich sehr dicht am oberen Quartil befinden, während der Bereich bis zum unteren Quartil weiter ausgedehnt ist. Das hängt mit den über langen Zeitraum als konstant angenommenen Durchflüssen und dem schnellen Ansprung auf den Schwall zusammen. Aufgrund dessen befinden sich nicht viele Werte zwischen WUA-Minimum und -Maximum.

In Abbildung 5.33 ist der große Vorteil im Winter aufgrund der geringen Wassertiefe in den Bühnenfeldern besonders deutlich zu erkennen.

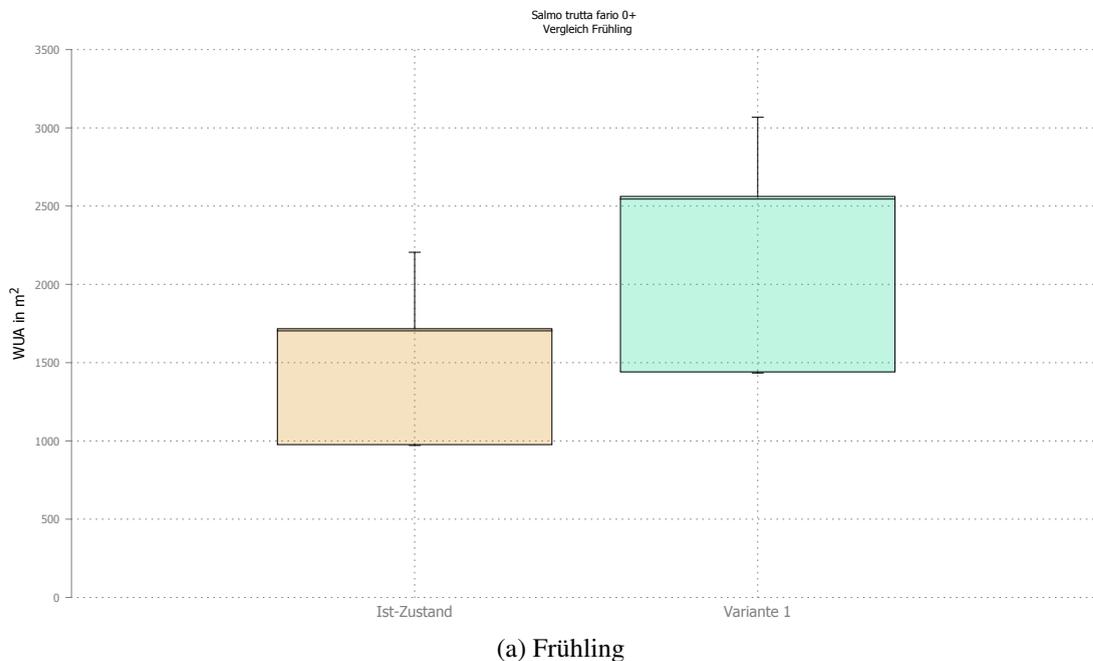
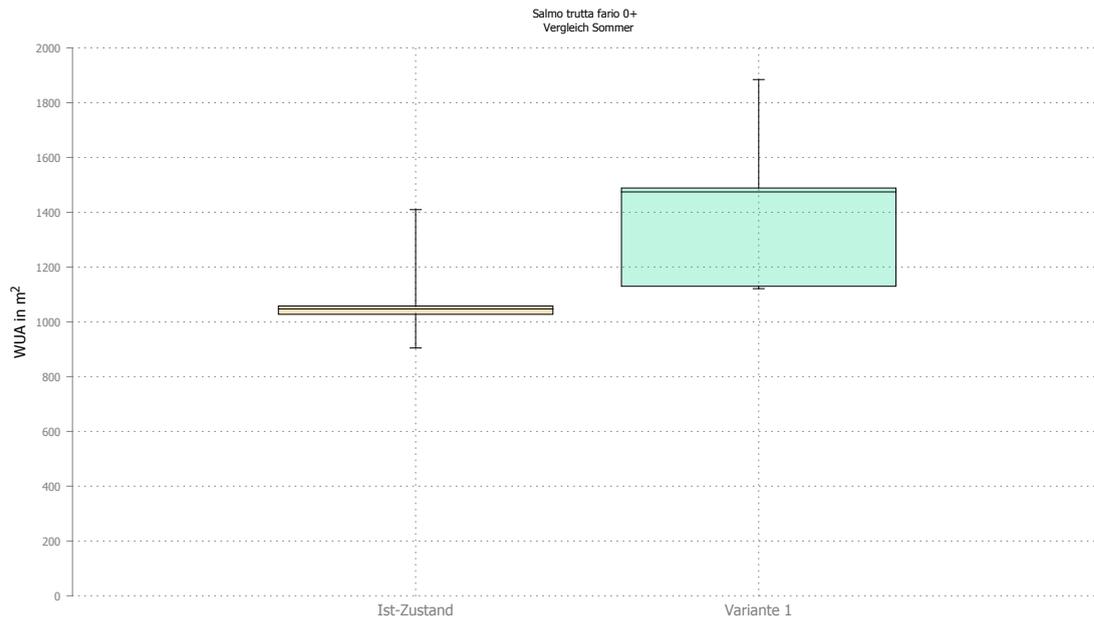
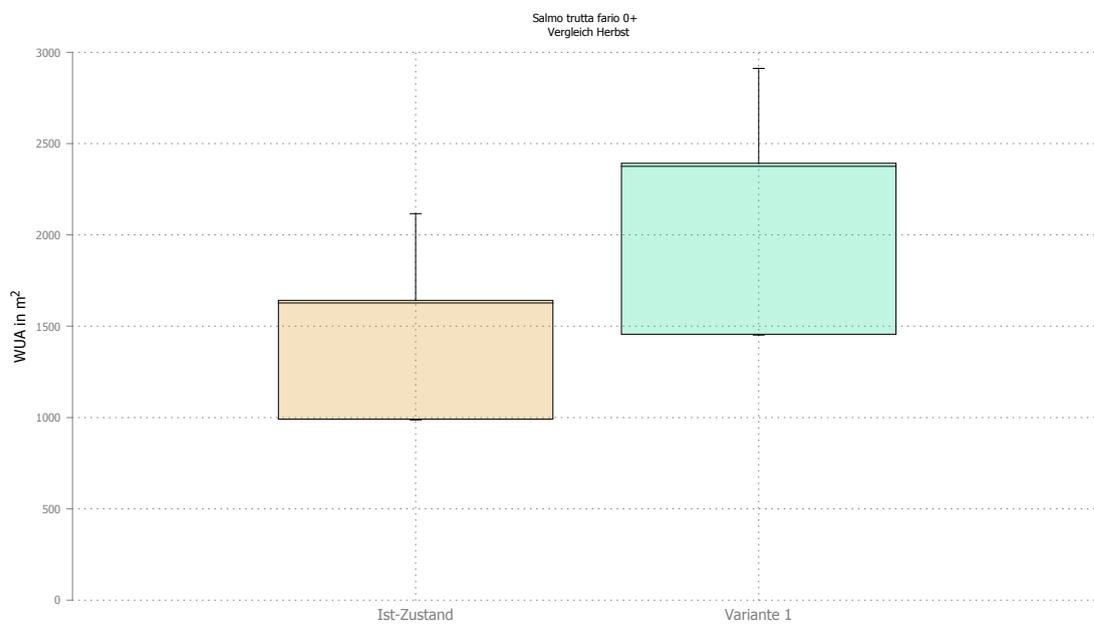


Abbildung 5.32: Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Inn Str. 1) – Frühling



(b) Sommer



(c) Herbst

Abbildung 5.32: Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Inn Str. 1) – Sommer und Herbst

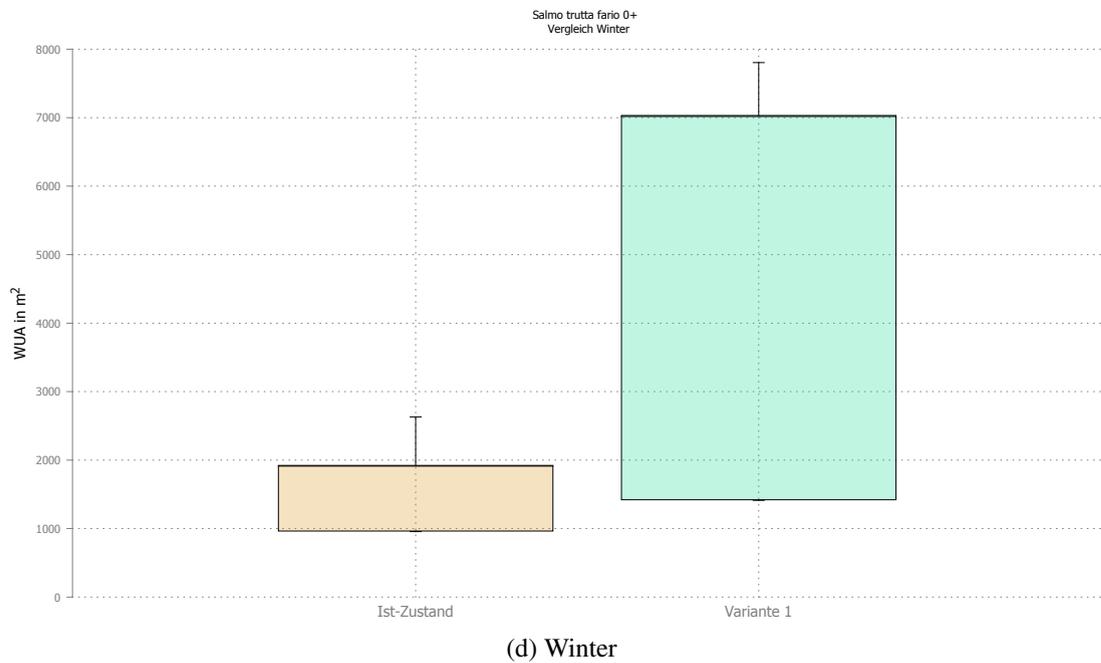


Abbildung 5.32: Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Inn Str. 1) – Winter

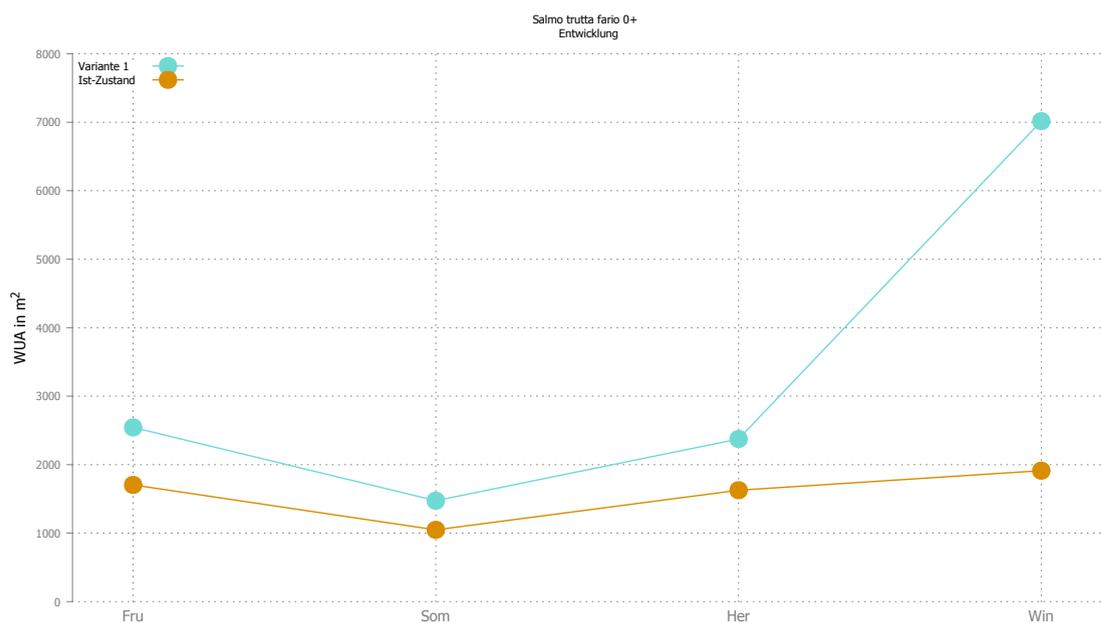


Abbildung 5.33: Jahreszeitliche Entwicklung der Mediane (Inn Str. 1)

## 5.4 Inn – Strecke 2

### 5.4.1 Istzustand

Wie bei der Untersuchung des Drau-Abschnittes (sh. 5.1) wird bei dieser Strecke des Inns aufgrund der Schotterbänke und Seitenarm-Strukturen von einer geringen Belastung der Ökologie ausgegangen. Die Analyse erfolgt deshalb in die umgekehrte Richtung und stellt die Vorteile des Istzustands einer künstlich im Modell regulierten Variante gegenüber. Als untersuchte Fischart dient erneut die Bachforelle.

Gerade die teilweise angebundenen Nebenarme im oberen Bereich des Untersuchungsgebiets bieten im Sommer ansprechende Habitate (sh. Abbildung 5.34), ebenso wie das untere Bühnenfeld. Im Winter werden die Schotterbänke nicht durchflossen – zusätzlich zu den isolierten Nischen zwischen den Bühnen, bietet der Abschnitt flussab ein langgezogenes nutzbares Habitat parallel zum Strom (sh. 5.34d), das während des Schwall näher an das Ufer gedrängt wird.

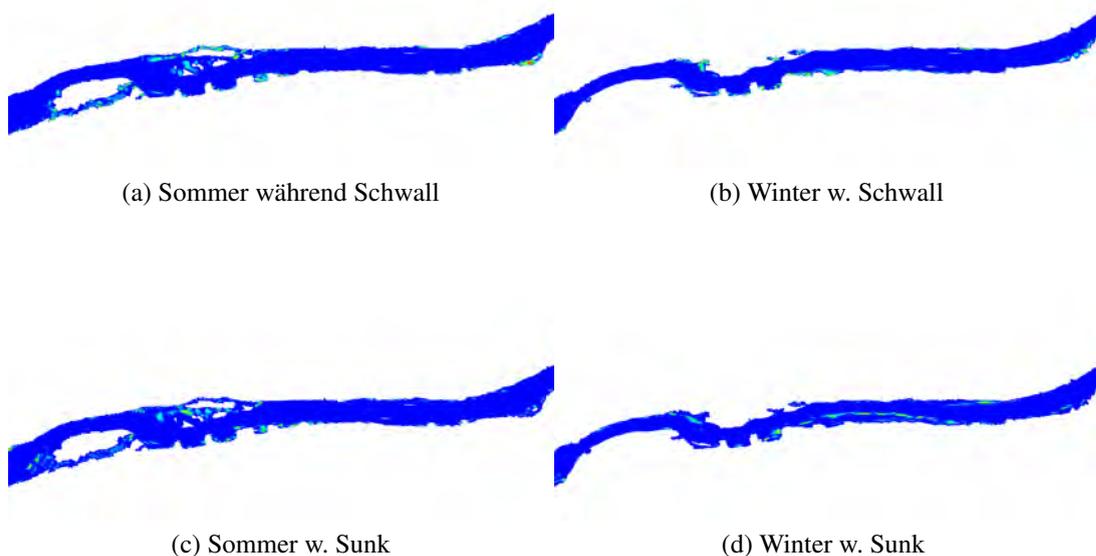


Abbildung 5.34: Habitatverteilung für den Istzustand im Sommer und Winter (Inn Str. 2)

### 5.4.2 Variante: Schotterbänke unüberströmbar

Die Variante wird so gewählt, dass die im Istzustand vorhandenen Schotterbänke als nicht überströmbar ausgeführt werden. Der Flussverlauf ist in diesem Bereich weiterhin gewunden, die Ufer verhalten sich jedoch starr und entsprechen einem regulierten Gewässer.

Die schmalen Seitenarme, die beim Istzustand im Sommer ein wertvolles Habitat darstellen, sind zur Gänze verschwunden (sh. Abbildung 5.35). Im Winter bzw. an den Bühnenfeldern sind nur marginale Veränderungen bemerkbar.

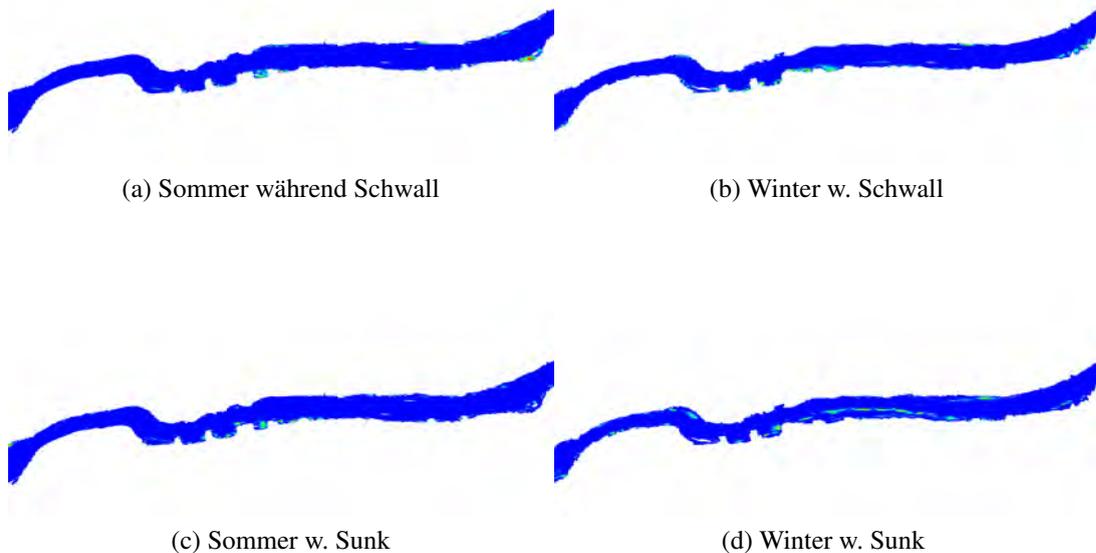
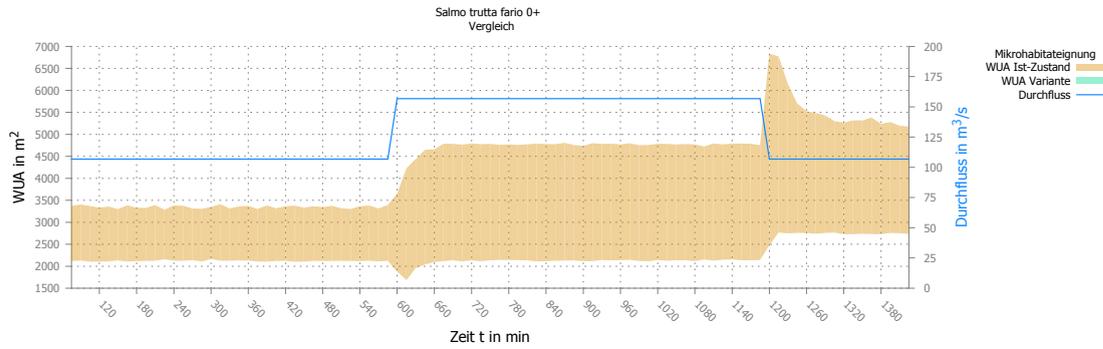


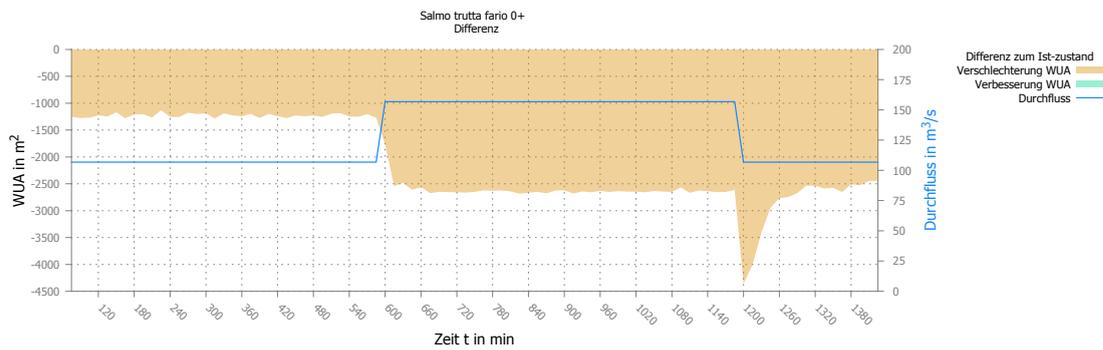
Abbildung 5.35: Habitatverteilung für die Variante im Sommer und Winter (Inn Str. 2)

#### 5.4.3 Verlauf der WUA

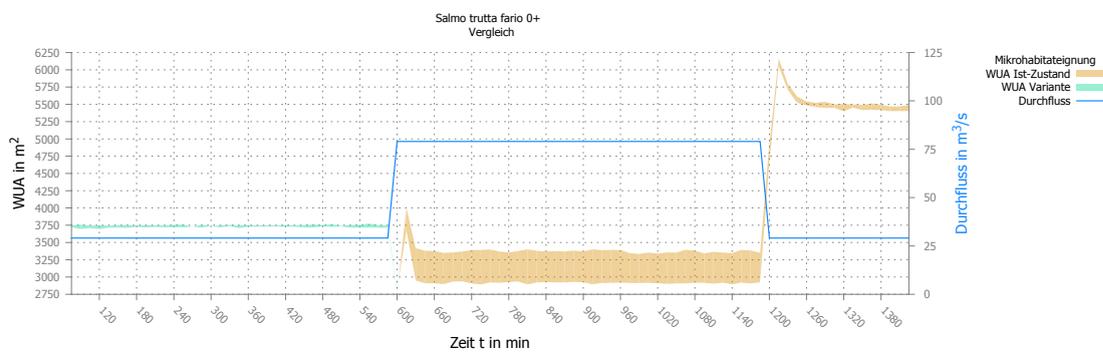
Abbildung 5.36 zeigt, dass durch den Wegfall der Strukturen der Anlandungen in diesem Abschnitt ein starkes Defizit an WUA entsteht. Das volle Ausmaß zeigt sich besonders während des Schwalls im Sommer: die beim Istzustand vorhandene nutzbare Fläche von ca.  $4800\text{m}^2$  wird um  $-2600\text{m}^2$  verringert – im Winter beträgt die Veränderung nur ca.  $-450\text{m}^2$ .



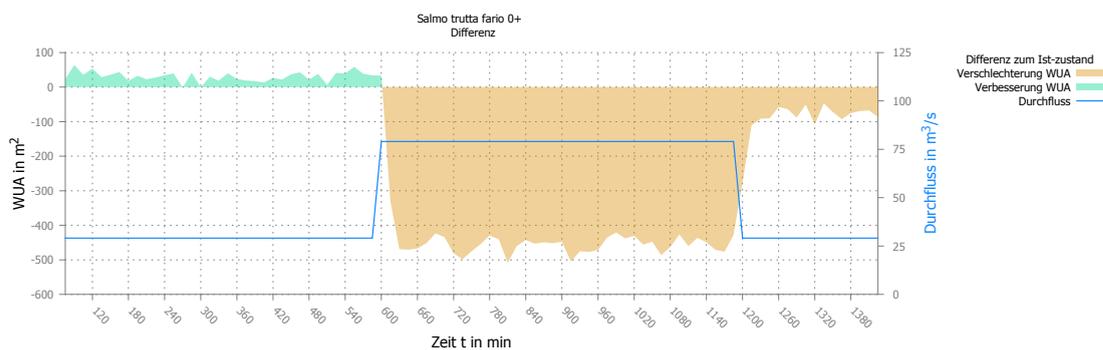
(a) Sommer – WUA parallel



(b) Sommer – Differenz der WUA



(c) Winter – WUA parallel



(d) Winter – Differenz der WUA

Abbildung 5.36: WUA während Schwall im Sommer und Winter (Inn Str. 2)

Die Verläufe der WUA für Frühling und Herbst finden sich im Anhang 8.5.1 auf Seite 126.

An den Diagrammen ist außerdem festzustellen, dass sich bei gleichem Sunk-Durchfluss unterschiedliche WUA-Werte ergeben. Dieser Effekt ist der Modellierung anzurechnen, da beim Schwallanstieg gewisse Bereiche (in der Simulation) zum ersten Mal durchflossen werden – diese tragen zur Gesamt-WUA bei und bleiben bis zum Ende mit Wasser gefüllt, auch wenn sie längst nicht mehr durchflossen werden. Diese Zonen, die sich bei Sunk nicht entleeren, sind mit einem erhöhten Strandungsrisiko behaftet – näheres zu diesem Problem wird in 6.1 auf Seite 89 erläutert.

Die WUA-Spitze des Istzustands (erkennbar im Diagramm 5.36a) lässt sich einerseits durch den Effekt der erstmaligen Benetzung erklären, sowie mit der Verzögerung der Welle im untersuchten Gebiet, die bewirkt, dass nicht in jedem Querschnitt derselbe Abfluss vorherrscht.

#### 5.4.4 Habitatverfügbarkeit im Vergleich

Abbildung 5.37 zeigt, dass die für die Bachforelle nutzbare Fläche im Frühling, Herbst und Winter etwas niedriger ist als beim Istzustand – der Sommer macht jedoch deutlich, wann die regulierte Variante negative Auswirkungen mit sich bringt (sh. auch Abbildung 5.38). Besonders in diesem Zeitraum sind viele schwächere (jüngere) Individuen vom Abschwemmen betroffen. Die Kiesstrukturen am Uferrand bieten beim Istzustand eine hervorragende Rückzugsmöglichkeit, bergen jedoch auch ein erhöhtes Strandungsrisiko.

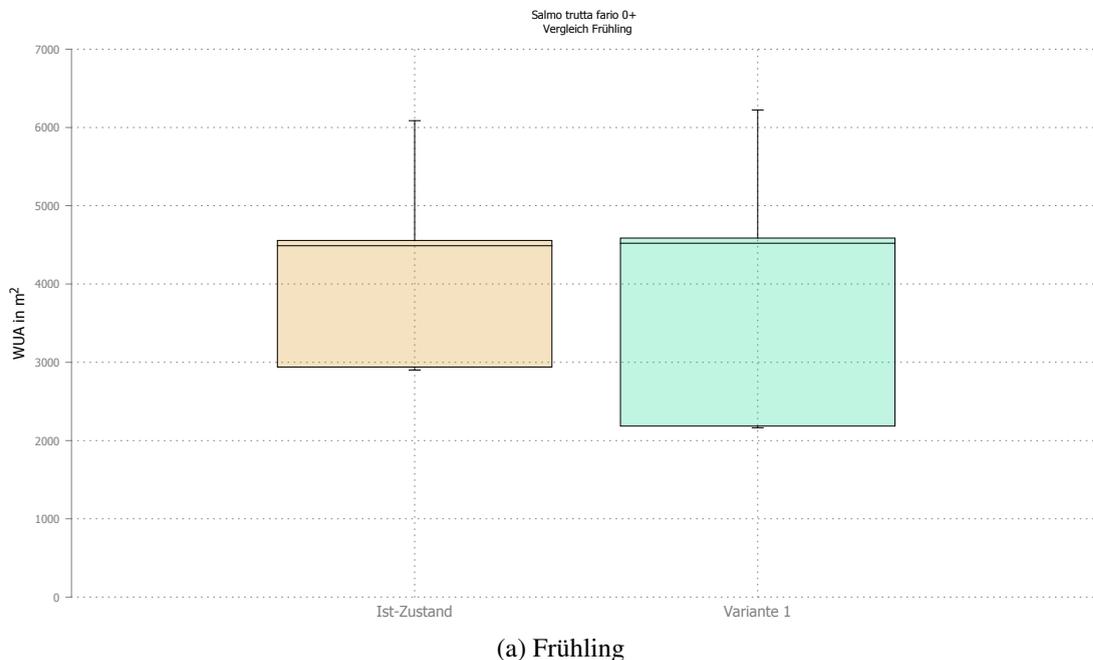
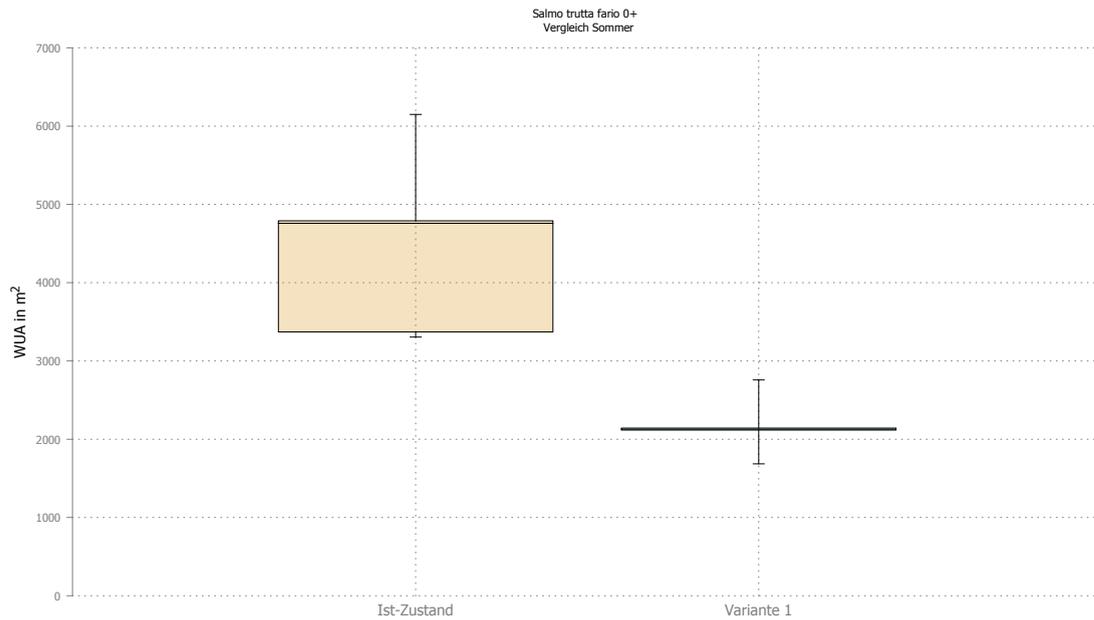
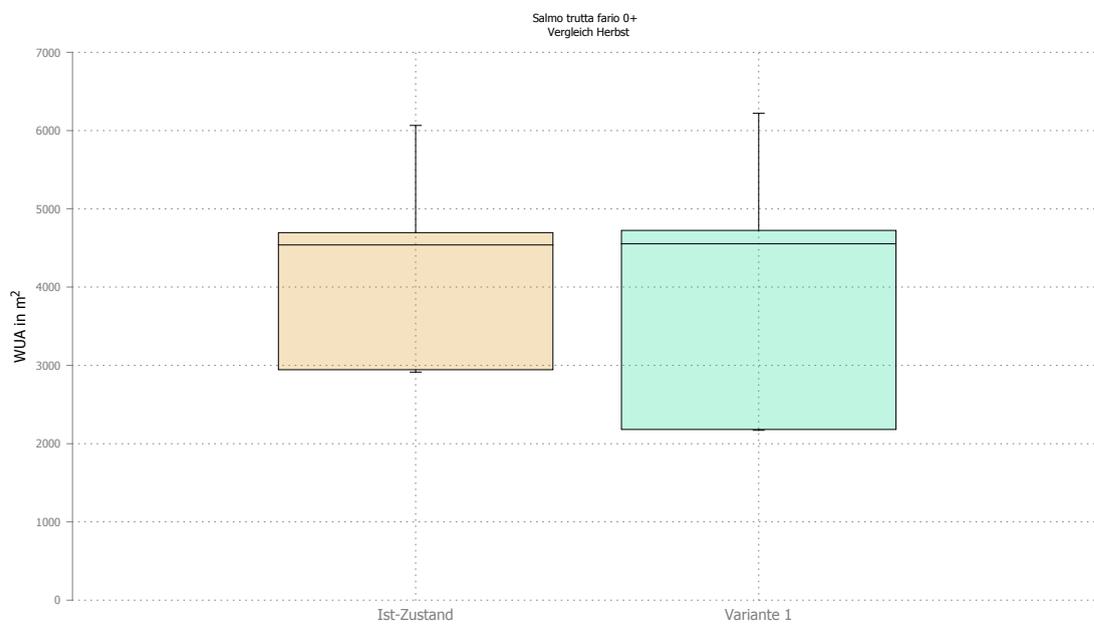


Abbildung 5.37: Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Inn Str. 2) – Frühling

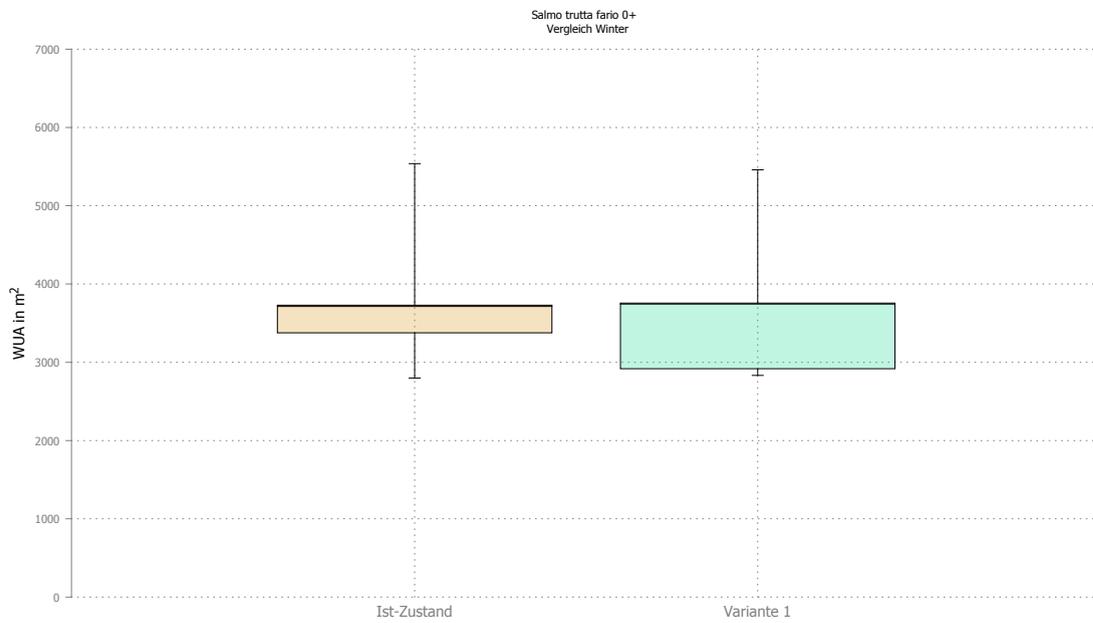


(b) Sommer



(c) Herbst

Abbildung 5.37: Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Inn Str. 2) – Sommer und Herbst



(d) Winter

Abbildung 5.37: Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Inn Str. 2) – Winter

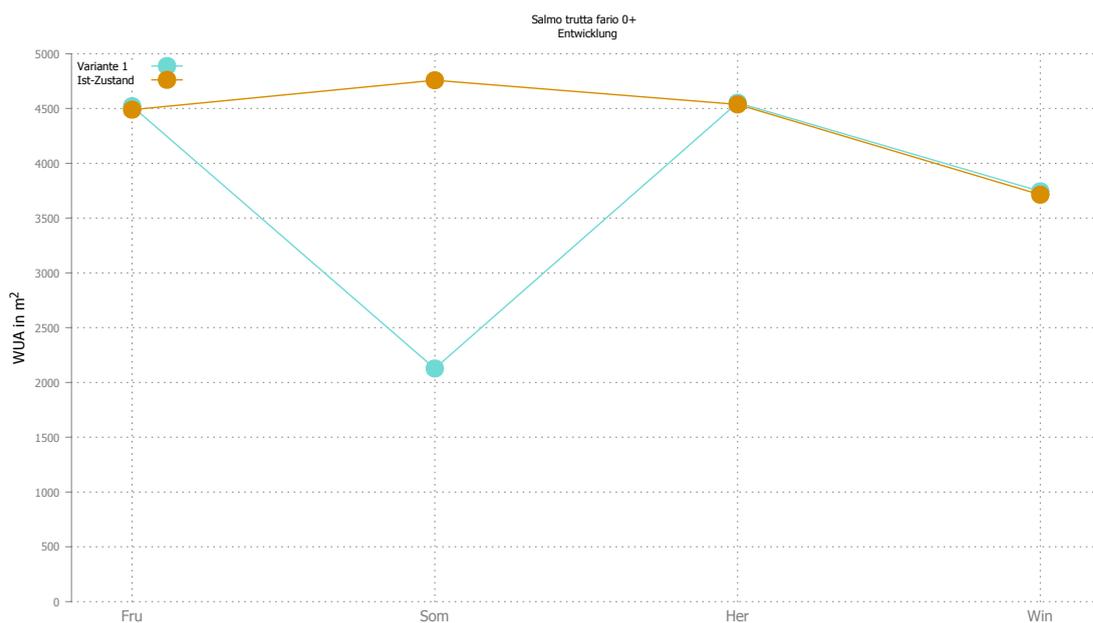


Abbildung 5.38: Jahreszeitliche Entwicklung der Mediane (Inn Str. 2)

## 5.5 Inn – Strecke 4

Für diese ca. 2100 m lange Teilstrecke des Inns wurde untersucht, inwiefern sich die Welle des Schwall verformt, wenn ein Teil des Durchflusses in das Augebiet, das sich linksufrig des Flusses befindet, strömt. Im digitalen Höhenmodell (sh. Abbildung 5.39) lässt sich erkennen, dass nördlich ein Altarm (grün) parallel zum Inn verläuft.

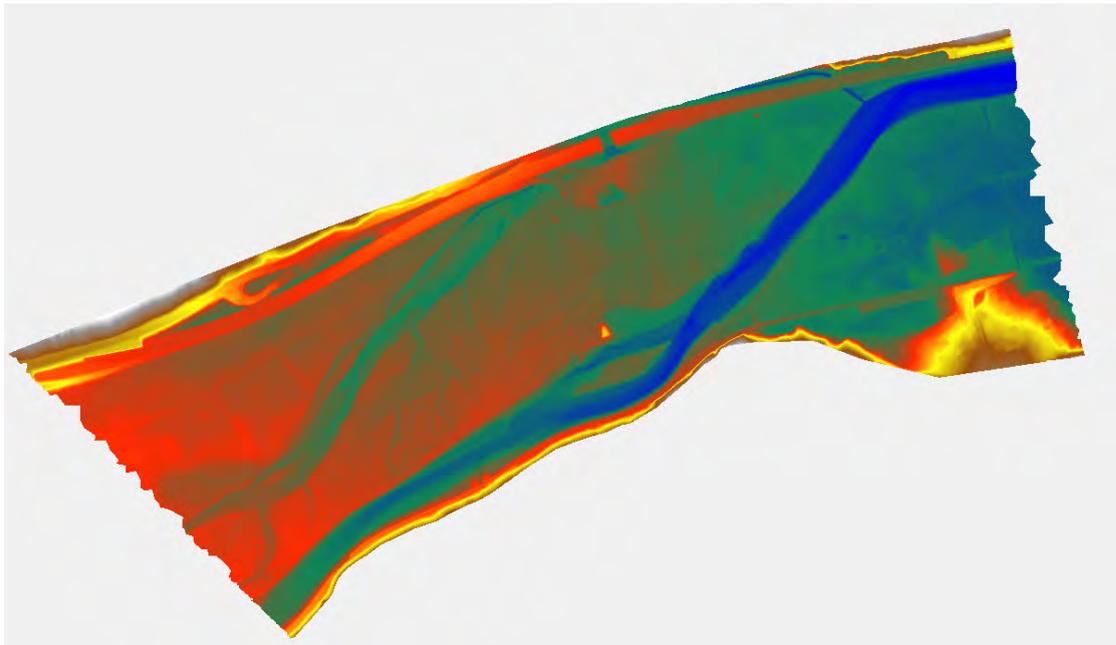


Abbildung 5.39: Digitales Geländemodell der Strecke 4

### 5.5.1 Istzustand

Beim Istzustand findet der gesamte Abfluss inklusive Schwall im momentanen Flussbett statt. Da der Abschnitt reguliert ist, bewegt sich das Wasser vom Zulauf zum Auslauf fast geradlinig und sehr schnell – es kann nur mit einer geringen Verzögerung und Dämpfung der Welle gerechnet werden.

### 5.5.2 Variante: Augebiet angebunden

Hierbei werden 90 % des Basisabflusses im Flussbett abgeführt und die Auflage erschlossen, indem 10 % des Basisabflusses und zusätzlich der gesamte Schwall in den Altarm geleitet werden.

Das abflusswirksame Gebiet findet im Norden seine Begrenzung an der Böschung einer Straße bzw. fließt durch eine Unterführung hindurch, nachdem die Modellbegrenzung das Wasser zum Hauptarm leitet (sh. Abbildung 5.40). In der Realität müsste diese Überflutung mit einer Absperrung ferngehalten bzw. schon vorher in das Flussbett des Inns geführt werden. Für die beispielhafte Betrachtung der Wellenverformung – wie sie hier durchgeführt wird – hat diese Tatsache jedoch keine großen Auswirkungen.

In der Abbildung 5.40 sind Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten dargestellt und verdeutlichen das Ausmaß der überfluteten Fläche sowie bevorzugte Fließwege.

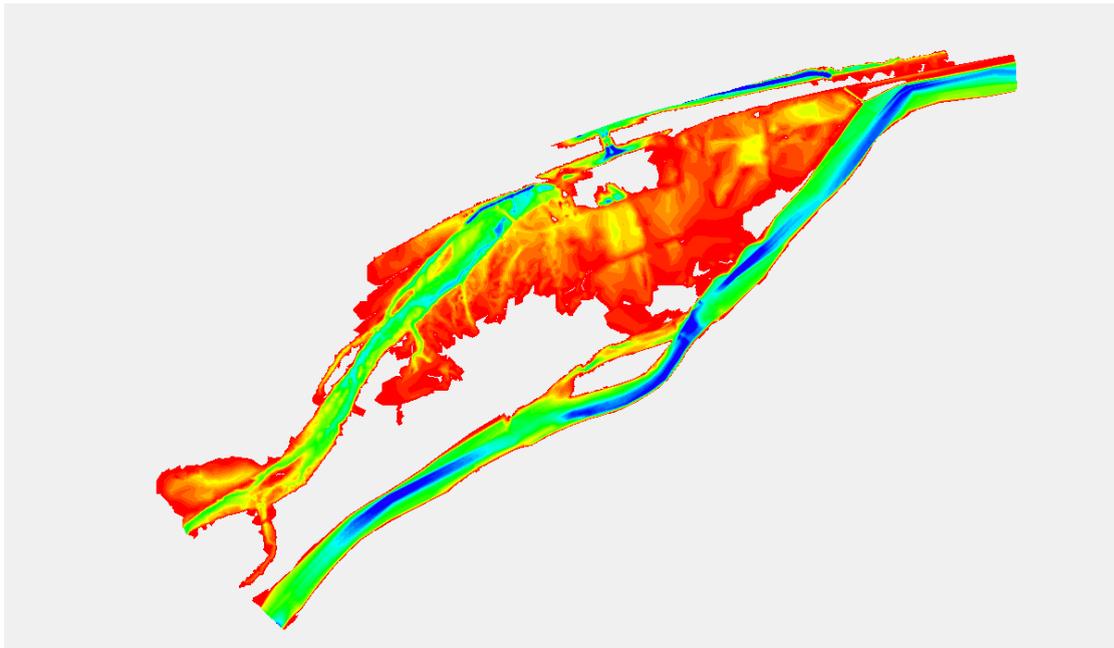
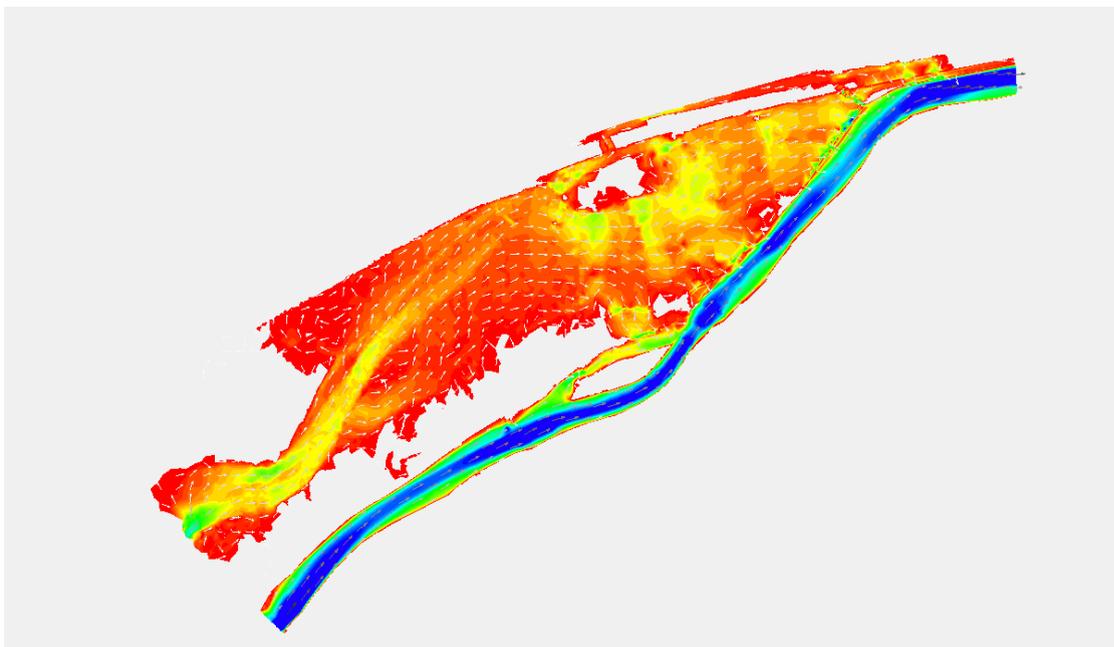
(a) Wassertiefe (rot:  $0m$  – blau:  $\geq 3m$ )(b) Fließgeschwindigkeit und -richtung (rot:  $0m$  – blau:  $\geq 3\frac{m}{s}$ )

Abbildung 5.40: Hydrodynamik der Variante mit überflutetem Auegebiet (Sommer, bei Schwall)

### 5.5.3 Wellenverformung im Vergleich

Durch die Anbindung des Auegebiets entsteht bereits auf diesem kurzen, beispielhaften Gewässerabschnitt eine merkliche Verzögerung der Hochwasserwelle bzw. des Turbinenschwells.

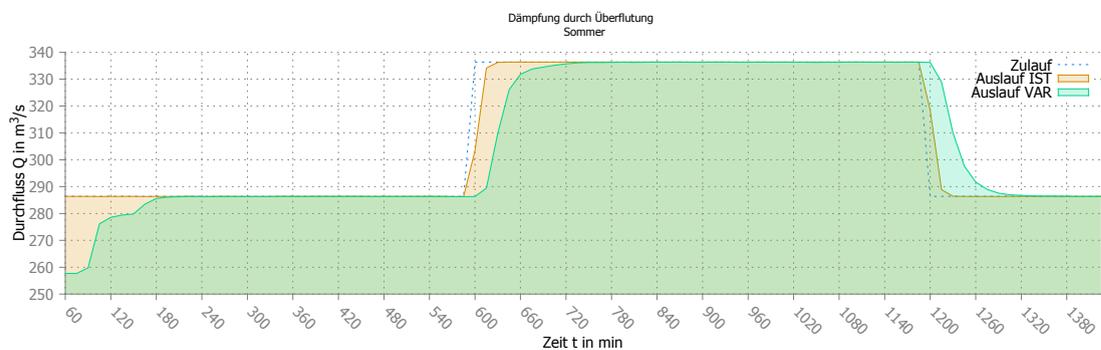
Die Abbildungen 5.41 und 5.42 zeigen den Durchfluss des Zulaufs (blaue, strichlierte Linie), dessen Anstieg innerhalb eines Timesteps von 15 min erfolgt, sowie den Durchfluss des Auslaufs mit (grün) und ohne Einleitung des Schwalls in die Au (orange).

Ohne Aufteilung der Wassermenge (Istzustand) kann sich am Auslauf des Projektgebiets nur eine geringe Verzögerung des Anstiegs von 15 min verzeichnen lassen (5.41b, orange). Die Spitze der Welle wird nur schwach gedämpft und erreicht nach insgesamt 30 min den Kontrollquerschnitt am Auslauf.

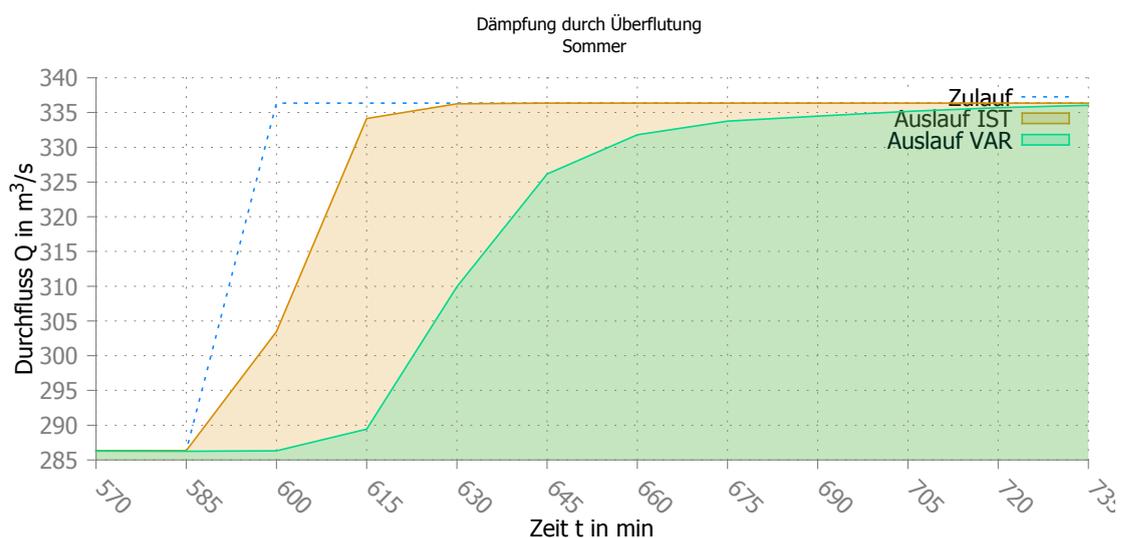
Hingegen bei der Variante mit durchflossener Au beginnt der Anstieg am Auslauf der Strecke erst 30 min (Sommer) bzw. 45 min (Winter) nachdem der Schwall den Zulauf passiert hat – eine in den Diagrammen deutlich erkennbare Verzögerung (grün).

Der Anstieg des Durchflusses ist zu Beginn stark gedämpft und flacht bei hohen Durchflüssen zunehmend ab – insgesamt stellt sich der Verlauf als S-förmige Kurve mit einer Annäherung an den Schwalldurchfluss dar.

Das Maximum der Welle stellt sich nur sehr langsam ein: erst nach 75 min (Sommer) bzw. 90 min (Winter) sind 90 % des zusätzlichen Turbinendurchflusses (Schwall) erreicht.

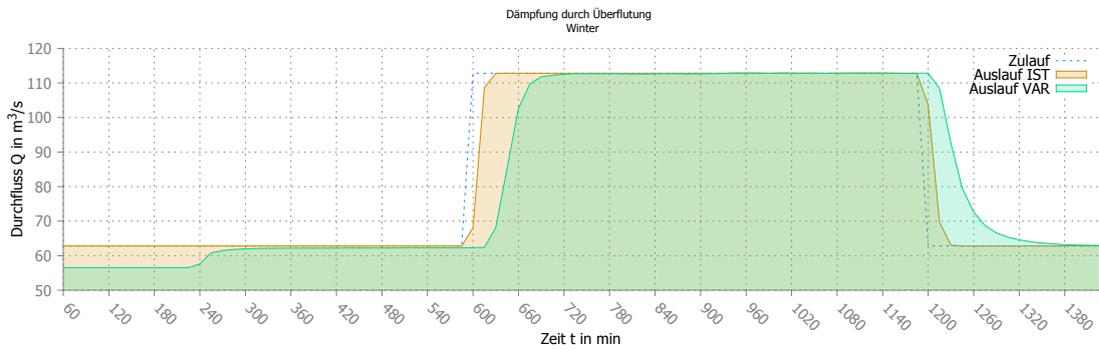


(a) Sommer

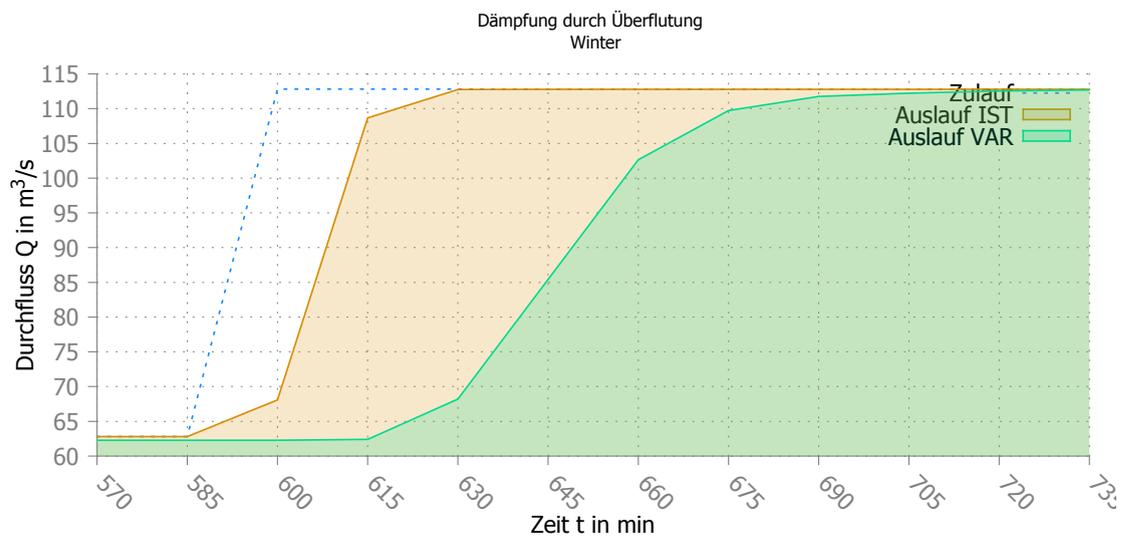


(b) Sommer – Zoom auf Schwallbeginn

Abbildung 5.41: Vergleich der Q-t-Diagramme mit und ohne Überflutung der Au (Inn Str. 4) – Sommer



(a) Winter



(b) Winter – Zoom auf Schwallbeginn

Abbildung 5.42: Vergleich der Q-t-Diagramme mit und ohne Überflutung der Au (Inn Str. 4) – Winter

Die Diagramme zur Wellendämpfung für Frühling und Herbst befinden sich im Anhang 8.31 auf Seite 127.

## 6 Diskussion

### 6.1 Probleme bei der Modellierung

#### 6.1.1 Erstmalige und dauerhafte Benetzung durch den Schwall

Bei der Modellierung der Fließstrecken wurde entweder eine aufgezeichnete Ganglinie des Events verwendet, oder der mittlere saisonale Abfluss mit Turbinendurchfluss. Jede Berechnung beginnt mit einem niedrigen Durchfluss, dem Sunk, und geht später in einen Schwall über.

Das Problem bei der Auswertung besteht darin, dass Hydro\_AS-2D keine Versickerung oder Verdunstung miteinbezieht: vor dem Eintreffen des Schwalls gibt es trockene Zellen, die während der Welle benetzt werden und bis zum Ende der Simulation mit Wasser gefüllt sind. Die Analyse von HSI und WUA vor und nach dem Ereignis zeigt, dass bei gleichem (Sunk-)Durchfluss unterschiedliche Flächen als Lebensraum zur Verfügung stehen, was die Bewertung mit statistischen Methoden (z. B. Median) etwas undurchsichtig macht. Der wahre Wert für die WUA bei Sunk ist dementsprechend nicht zwangsläufig der berechnete – er ist lokal abhängig von Gelände- und Bodenbeschaffenheit.

### 6.2 Stranden der Fische

Der erklärte Umstand, dass gewisse Flächen nach dem Schwall vom Hauptarm getrennt sind, führt auch in der Realität zu wesentlichen Problemen. So ist es möglich, dass die Regionen, die erst durch einen erhöhten Abfluss erschlossen werden, beim Sunk danach jedoch keine Wasserzufuhr mehr haben, zu Fallen für Organismen werden. Bei Versickerung und Austrocknung steht in diesen „Lacken“ zu wenig Wasser zur Verfügung – die Folge ist, dass dieses (Stunden zuvor eventuell gut geeignete) Habitat, zur Todesfalle für das Tier werden kann.

Was einerseits ein Problem für die Auswertung der exakten WUA darstellt (sh. 6.1.1), kann andererseits eine Methode sein, diese Bereiche auffindig zu machen, indem die Habitateignung und die benetzten Bereiche des Sunks vor und nach dem Schwall verglichen werden.

### 6.3 Erfolgreiche Umsetzung

In letzter Zeit wurde vorgeschlagen, dass statt einer gesamten Renaturierung lokale Anpassungen, besonders im Uferbereich, ausgeführt werden sollen (vgl. Ribi u. a. (2009)). Der Grund dafür ist, dass kleinere strukturelle Komponenten bei viel geringeren Kosten und höherer Effektivität umgesetzt werden können.

Knudsen u. Dille (1987) haben außerdem gezeigt, dass Blockwürfe im Uferbereich für Flüsse über 5 m<sup>3</sup>/s überwältigend positiv auf die Salmoniden wirken – sie sind jedoch nur ein schwacher Ersatz für natürliche Uferlinien. Hölzerne Elemente mit Deckfunktion

seien besonders wichtig (vgl. Tuhtan (2012)) und deshalb in Kombination mit harten Verbauungen auszuführen.

Das groß angelegte Renaturierungsprojekt an der Drau hat gezeigt, dass die Auswirkungen des Schwallbetriebs durch Aufweiten des Flusses reduziert werden können und dass damit ein merkbarer Anstieg der Population der juvenilen Äsche stattgefunden hat (vgl. Tuhtan (2012)).

Dieses Beispiel verdeutlicht auch, dass ein Monitoring der Maßnahmen sowie eine klare Definition von Zielen und Erfolgskriterien essentiell für die Bewertung und den positiven Nachhall eines Projekts sind.

# 7 Conclusio

## 7.1 Wenig Lebensraum für Jungfische

Die Habitatanalysen zeigen durchwegs, dass bei größeren Durchflüssen der Lebensraum für Jungfische deutlich abnimmt, bedingt durch erhöhte Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen. Durch den schnellen Anstieg der Geschwindigkeiten, müssen die Tiere rasch in flachere Zonen ausweichen, oder sie werden durch die Strömung weiter flussab getrieben (Drift).

Die Regulierung eines Gewässers ist (1) durch die Erhöhung des spezifischen Abflusses, (2) durch Wegnahme von gut geeigneten Habitatstrukturen und (3) durch Beschleunigung des Schwallanstiegs ein ernst zu nehmendes Problem der untersuchten Organismen und ein Hindernis für die Ausbildung einer ökologisch ausgewogenen Fauna.

## 7.2 Unterschiede zwischen Äsche und Bachforelle

Am Beispiel der Drau (sh. 5.1), wo beide Spezies untersucht wurden, hat sich gezeigt, dass Äschen, sofern sie über das Larvenstadium hinaus gewachsen sind, resistenter gegen die negativen Auswirkungen des Schwall sind, und dass auch bei größeren Durchflüssen (im Vergleich zur Bachforelle) genügend Lebensraum zur Verfügung steht. Das liegt mitunter daran, dass die Äsche besser mit tieferen Zonen und höheren Fließgeschwindigkeiten zurecht kommt.

Die Bachforelle eignet sich auf Grund ihrer Sensibilität besonders gut als Zeigerorganismus und sollte deshalb in Regionen, in denen sie beheimatet (bzw. die Leitfischart) ist, für die Habitatmodellierung verwendet werden, wenn ökologische Verbesserungen angestrebt werden.

## 7.3 Strukturelle Verbesserungen möglich

Die Untersuchungen in dieser Arbeit zeigen eindeutig die Wirksamkeit der ausgewählten wasserbaulichen Maßnahmen und vermögen den Nutzen für das Ökosystem zu quantifizieren.

Die umgekehrte Herangehensweise, naturnahe oder bereits aufgewertete Abschnitte als regulierten Abschnitt zu modellieren und zu vergleichen, kann als Verifizierung der Wirksamkeit verwendet werden – in den konkreten Fällen lieferte diese Methode die Bestätigung, dass der neu geschaffene Istzustand eine bedeutende ökologische Bereicherung darstellt.

Aus diesen Gründen und wegen des immer kleiner werdenden Aufwands bei Computermodellierungen wird empfohlen, bei Renaturierungsvorhaben eine 2-dimensionale Habitatanalyse durchzuführen, sofern die Datengrundlage vorhanden ist (Digitales Geländemodell, Abflussdaten, Präferenzkurven). Die Auswertung der Mikrohabitate mittels

HSI und WUA ist ein gutes Mittel, um im Vorhinein und über einen großen Flussabschnitt einen detaillierten Überblick zu bekommen. Eine gröbere Auflösung – z. B. die Betrachtung als Meso- oder Makrohabitate – ist in den meisten Fällen nicht ausreichend; eine 3D-Betrachtung würde hingegen einen übertriebenen Aufwand (Eingangsdaten und Rechendauer) darstellen.

Die beste Methode die Wirksamkeit einer Maßnahme zu beziffern ist es, einen statistischen Vergleich der Varianten mit Hilfe von Box-Plots oder Entwicklungsdiagrammen für jede Jahreszeit anzustellen. Diese Vorgehensweise stellt einen integrierten Ansatz über das gesamte Schwallereignis dar und liefert deshalb eine bessere Abschätzung als einzelne WUA-Werte oder ein Mittelwert. Des Weiteren vereinfacht die grafische Anschauung mittels Diagrammen die Auswertung und kann bei der Fehlersuche bzw. Optimierung hilfreich sein.

#### **7.4 Aktivierung von Nebenarmen**

Mithilfe der Strömungsmodellierung konnte auch anhand einer Strecke des Inns (sh. 5.5 auf Seite 85) gezeigt werden, wie wichtig Überflutungsflächen und Auegebiete für die Verzögerung und Dämpfung einer Welle sein können – sogar entlang nur weniger hundert Meter kann schon eine deutlich längere Fließdauer und ein langsames Ansteigen des Durchflusses und vor allem des Wasserspiegels bewirkt werden.

Obwohl weniger relevant für eine Habitatmodellierung ist diese erneute Bestätigung vor allem für den Hochwasserschutz interessant, da dadurch Vorwarnzeiten erheblich verlängert und das Risiko reduziert werden können. Die Anbindung von Nebengerinnen kann demnach nicht nur aus ökologischer Sicht sinnvoll sein.

#### **7.5 Feststoffhaushalt**

Anhand einiger Maßnahmen – besonders bei Aufweitungen – lässt sich feststellen, dass Sedimenttransport und Sohlentwicklung über einen längeren Zeitraum eine wichtige Rolle spielen. Ein Fluss, dem eigendynamische Prozesse zugesprochen werden, schafft sich selbst nutzbare Habitate für seine Fauna.

Kraftwerke und andere Querbauwerke halten jedoch das Geschiebe zurück, das für Umlagerungen, Kiesbänke und dergleichen von Nöten wäre, und stellen gemeinsam mit der Regulierung der Ufer ein Problem für viele Flüsse dar. Auf der anderen Seite sind Anlandungen in den Stauräumen eine finanzielle Belastung für den Energieproduzenten und bewirken, dass regelmäßig gespült bzw. gebaggert werden muss.

Ein übergeordnetes Feststoffmanagement, das den gesamten Flusslauf mitsamt seinen Stauketten einbezieht, und die natürlichen Erosions- und Sedimentationsprozesse berücksichtigt, ist dementsprechend anzustreben.

#### **7.6 Positive Aussichten**

Die negativen Auswirkungen, die der Schwallbetrieb auf die Bewohner des energiewirtschaftlich genutzten Flusses hat, wurden vom Menschen erkannt und werden auch in Zukunft Bestandteil von weiteren Untersuchungen sein.

Lösungen zur Reduktion der Problematik sollen vorangetrieben werden, um einen guten ökologischen Zustand für Österreichs Fließgewässer erreichen zu können.

---

Als Beispiel soll die IKRA genannt werden, die 16 Revitalisierungsprojekte am Alpenrhein verfolgt – mit Projektkosten beginnend bei ca. 90,000 € bis hin zu 20,3 Millionen € für die Renaturierung des Alpenrheins. Obwohl nicht alle Projekte mit der Schwallproblematik in Verbindung stehen, sprechen diese Vorhaben für einen positiven Wandel (vgl. Tuhtan (2012, S. 16)).

# Literaturverzeichnis

## **BMLFUW 2012**

BMLFUW: *Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Dezember 2012

## **Bovee 1986**

BOVEE, K.D.: Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology. In: *USDI Fish and Wildlife Service Instream Flow Information Paper 21 FWS/OBS-86/7*. (1986), S. 235

## **Giesecke u. Mosonyi 2009**

GIESECKE, Jürgen ; MOSONYI, Emil ; GIESECKE, Jürgen (Hrsg.) ; HEIMERL, Stephan (Hrsg.): *Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb (5. Auflage)*. Springer, 2009

## **Gore u. Nestler 1988**

GORE, J. A. ; NESTLER, J. M.: Instream flow studies in perspective. In: *Regulated Rivers* Vol. 2, No. 2 (1988), S. 93–101

## **Guger 2012**

GUGER, Leopold: *Grundlagenuntersuchung und Methodikentwicklung zur Bewertung des Schwalleinflusses mittels numerischer Habitatmodellierung an der Drau*, Universität für Bodenkultur, Wien, Diplomarbeit, 2012

## **Habersack u. Hauer 2012**

HABERSACK, Helmut ; HAUER, Christoph: Grundlagenuntersuchungen und Methodikentwicklung zur Bewertung des Schwalleinflusses bei unterschiedlichen Flusstypen – SCHWALL\_2012 / Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur Wien. 2012. – Forschungsbericht

## **Harby u. a. 2004**

HARBY, Atle ; BAPTIST, Martin ; DUNBAR, Michael J. ; STEFANSCHMUTZ: State-of-the-art in data and sampling and modelling analysis and applications of river habitat and modelling / COST Action 626 European Aquatic Modelling Network. 2004 (COST Action 626 Report). – Forschungsbericht

## **Hauer 2008**

HAUER, Christoph: Habitatmodellierung - Integrative Methodiken zur Bewertung von Fließgewässern. In: *ÖWAV-Seminar: Fließgewässermodellierung - Praxis und Herausforderungen*, 2008

## **Haunschmid u. a. 2006**

HAUNSCHMID, R. ; WOLFRAM, G. ; SPINDLER, T. ; HONSIG-ERLENBURG, W. ; WIMMER, R. ; JAGSCH, A. ; KAINZ, E. ; HEHENWARTER, K. ; WAGNER,

B. ; KONECNY, R. ; RIEDLMÜLLER, R. ; IBEL, G. ; SASANO, B. ; SCHOTZKO, N.: Erstellung einer fischbasierten Typologie Österreichischer Fließgewässer sowie einer Bewertungsmethode des fischökologischen Zustands gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie. In: *Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft* Band 23 (2006)

#### **Hunter 1992**

HUNTER, Mark A.: Hydropower Flow Fluctuations and Salmonids: A Review of the Biological Effects, Mechanical Causes, and Options for Mitigation / Washington Department of Fisheries. 1992. – Forschungsbericht

#### **Hydrographischer Dienst in Österreich 2012**

HYDROGRAPHISCHER DIENST IN ÖSTERREICH: *Hydrographisches Jahrbuch 2010*. Bd. 118. Band. Abteilung VII 3 - Wasserhaushalt im Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft, 2012

#### **Hydrotec a**

HYDROTEC: *Arbeitsblatt – Geschiebe*

#### **Hydrotec b**

HYDROTEC: *Hydro\_GS-2D - Software für die 2D-Simulation des Geschiebetransports*. Online. [http://www2.hydrotec.de/vertrieb/hydro\\_as\\_2d/hydro-gs-2d](http://www2.hydrotec.de/vertrieb/hydro_as_2d/hydro-gs-2d)

#### **Hydrotec 2004**

HYDROTEC: *Das 2D-Strömungsmodell HYDRO\_AS-2D*. Online. <http://www2.hydrotec.de/unternehmen/hydrothemen/hydrothemen07/hydro-as-2d/>. Version: Oktober 2004

#### **KFV Mallersdorf 2013**

KFV MALLERSDORF: *Bild Äsche*. Online. <http://www.kfv-mallersdorf.de/Aesche.html>. Version: Okt. 2013

#### **Knudsen u. Dilley 1987**

KNUDSEN, E.E. ; DILLEY, S.J.: Effects of Riprap Bank Reinforcement on Juvenile Salmonids in Four Western Washington Streams. In: *North American Journal of Fisheries Management* 7 (1987), S. 351

#### **Köfmüller 2010**

KÖFMÜLLER, Stefan: *Grundlagenuntersuchung und Methodikentwicklung zur Bewertung des Schwalleinflusses bei unterschiedlichen Flusstypen - Fallbeispiel ILL*, Universität für Bodenkultur, Wien, Diplomarbeit, 2010

#### **Lasne u. a. 2007**

LASNE, Emilien ; BERGEROT, Benjamin ; LEK, Sovan ; LAFFAILLE, Pascal: Fish zonation and indicator species for the evaluation of the ecological status of rivers: example of the Loire basin (France). In: *River Research and Applications* 23 (2007), Oct, Nr. 8, 877-890. <http://dx.doi.org/10.1002/rra.1030>. – DOI 10.1002/rra.1030

**Limnex 2004**

LIMNEX: Auswirkungen des Schwallbetriebes auf das Ökosystem der Fließgewässer: Grundlagen zur Beurteilung / Limnex AG. 2004. – Forschungsbericht

**Mattersberger u. Payerl 2011**

MATTERSBERGER, Elisabeth ; PAYERL, Vanessa: *Ökologische Auswirkungen von Wasserkraftwerken mit Schwallbetrieb*, Universität für Bodenkultur, Wien, Diplomarbeit, April 2011

**NGP 2010**

NGP: *Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2009*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2010

**ÖWAV 2007**

ÖWAV: *Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Hydrodynamik*. ÖWAV und Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2007

**ÖWAV 2008**

ÖWAV: *Schwall und Sunk an österreichischen Fließgewässern (Positionspapier)*. Arbeitsgruppe „Schwall“, 2008

**Paola u. Voller 2005**

PAOLA, C. ; VOLLER, V. R.: A generalized Exner equation for sediment mass balance. In: *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 110 (2005), Nr. F4, n/a–n/a. <http://dx.doi.org/10.1029/2004JF000274>. – DOI 10.1029/2004JF000274. – ISSN 2156–2202

**Parker 2004**

PARKER, G.: *1D Sediment Transport Morphodynamics with applications to Rivers and Turbidity Currents*. 2004

**Ribi u. a. 2009**

RIBI, J.M. ; STEFFEN, K. ; BOILLAT, J.L. ; PETER, A. ; SCHLEISS, A.J.: *Influence of geometry of fish shelters in river banks on their attractiveness for fishes during hydropeaking*. 2009

**Rieger 2012**

RIEGER, Robert: *Grundlagenuntersuchung und Methodikentwicklung zur Bewertung des Schwalleinflusses bei unterschiedlichen Flusstypen - Fallbeispiel Drau*, Universität für Bodenkultur, Wien, Diplomarbeit, 2012

**RIWA-T 2006**

RIWA-T: *Technische Richtlinien für die Bundeswasserbauverwaltung*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2006

**Schmutz u. a. 2013**

SCHMUTZ, S. ; FOHLER, N. ; FRIEDRICH, T. ; FUHRMANN, M. ; GRAF, W. ; GREIMEL, F. ; HÖLLER, N. ; JUNGWIRTH, M. ; LEITNER, P. ; MOOG, O. ; MELCHER, A. ; MÜLLNER, K. ; OCHSENHOFER, G. ; SALCHER, G. ; STEIDL, C. ; UNFER,

G. ; ZEIRINGER, B. ; BMFLUW (Hrsg.): *Schwallproblematik an Österreichs Fließgewässern*. BMFLUW, 2013

**Schmutz u. a. 1993**

SCHMUTZ, S. ; WIMMER, R. ; ZAUNER, G.: Fischökologische Erhebungen - Modelle und ihre Aussagen. In: *14. Seminar f. Landschaftswasserbau der TU Wien*, 1993

**Spindler 1997**

SPINDLER, Thomas ; UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): *Fischfauna in Österreich*. Bundesministerium f. Umwelt, Jugend und Familie, 1997

**Stalnaker u. a. 1995**

STALNAKER, C. B. ; LAMB, B. L. ; HENRIKSEN, J. ; BOVEE, K. ; BARTHOLOW, J.: The Instream flow incremental methodology: A primer for IFIM. In: *U.S. Geological Survey Biological Report* (1995)

**Tuhtan u. a. 2012**

TUHTAN, Jeff A. ; NOACK, Markus ; WIEPRECHT, Silke: Estimating stranding risk due to hydropeaking for juvenile European grayling considering river morphology. In: *KSCE Journal of Civil Engineering* 16 (2012), Feb, Nr. 2, 197-206. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-012-0002-5>. – DOI 10.1007/s12205-012-0002-5

**Tuhtan 2012**

TUHTAN, Jeffrey A.: *A Modeling Approach for Alpine Rivers Impacted by Hydropeaking Including the Second Law Inequality*, Universität Stuttgart, Diss., 2012

**U. S. Fish and Wildlife Service 2005**

U. S. FISH AND WILDLIFE SERVICE: *Bild Bachforelle*. Online. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bachforelle\\_Zeichnung.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bachforelle_Zeichnung.jpg). Version: Mai 2005. – Public Domain

**Unfer u. a. 2012**

UNFER, G. ; ZEIRINGER, B. ; HAUER, C.: The influence of stranding due to hydropeaking on grayling (*Thymallus thymallus*) population of the Drau River, Austria. In: *Institute of Water Management, Hydrology and Hydraulic Engineering, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, 9th International Symposium on Ecohydraulics USB-Proceedings* (2012)

**Unfer 2011**

UNFER, Günther: The brown trout - Ecology and Occurrence in Austria / Institute of Hydrobiology and Aquatic Ecosystem Management. 2011. – Forschungsbericht

**Vorarlberger Illwerke 2014**

VORARLBERGER ILLWERKE: *Technische Daten*. Online. <http://www.illwerke.at>. Version: 2 2014

**WRRL 2000**

WRRL: *Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik*, 2000

**Zukunft Alpenrhein 2012**

ZUKUNFT ALPENRHEIN: Alpenrhein: Quantitative Analyse von Schwall/Sunk-Ganglinien für unterschiedliche Anforderungsprofile / Internationale Regierungskommission Alpenrhein (IRKA). 2012. – Forschungsbericht

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Drau Strecke 2 . . . . .	6
2.2	Tagesganglinien für Drau Strecke 2 . . . . .	7
2.2	Tagesganglinien für Drau Strecke 2 ( <i>Forts.</i> ) . . . . .	8
2.3	Ill Strecke 2 . . . . .	8
2.4	Tagesganglinien für Ill Strecke 2 . . . . .	9
2.5	Inn Strecke 1 . . . . .	10
2.6	Tagesganglinien für Inn Strecke 1 . . . . .	11
2.7	Inn Strecke 2 . . . . .	12
2.8	Tagesganglinien für Inn Strecke 2 . . . . .	13
2.9	Inn Strecke 4 . . . . .	14
2.10	Tagesganglinien für Inn Strecke 4 . . . . .	15
3.1	Untersuchte Fischarten . . . . .	21
3.2	Präferenzkurven für <i>Salmo trutta fario</i> 0+ . . . . .	22
3.3	Präferenzkurven für ältere Exemplare . . . . .	23
3.4	Präferenzkurven von Bachforelle und Äsche im Vergleich . . . . .	23
4.1	Flowchart zum Ablauf der hydrodynamischen sowie der Habitatmodellierung . . . . .	27
4.2	Digitales Geländemodell . . . . .	28
4.3	Screenshots des DGM aus SMS . . . . .	29
4.4	Hydrologische Eingangsdaten für die Modellierung . . . . .	30
4.5	Möglichkeit der Strömungsvisualisierung mit HEM . . . . .	33
4.6	Habitat Suitability für junge Bachforelle . . . . .	34
4.7	WUA- und HHS-Verlauf eines Gewässerabschnittes . . . . .	35
4.8	Vergleich der WUA von Variante und Istzustand . . . . .	36
4.9	Direkter Vergleich aller Varianten in einem Diagramm . . . . .	38
5.1	Markierung der Lage der Detailbetrachtungen – Habitatverteilung für den Istzustand im Sommer (Bachforelle) . . . . .	41
5.2	Habitatverteilung für den Istzustand im Sommer (Bachforelle) . . . . .	42
5.3	Habitatverteilung für den Istzustand im Winter (Bachforelle) . . . . .	42
5.4	Habitatverteilung für den Istzustand (Äsche) . . . . .	43
5.4	Habitatverteilung für den Istzustand (Äsche) ( <i>Forts.</i> ) . . . . .	44
5.5	Istzustand und Variante 1: HSI im Winter (Bachforelle) . . . . .	45
5.6	WUA während Schwall im Sommer und Winter (Drau, Bachforelle) . . . . .	46
5.7	WUA während Schwall im Winter (Drau, Äsche) . . . . .	47
5.7	WUA während Schwall im Winter (Drau, Äsche) ( <i>Forts.</i> ) . . . . .	48
5.8	Istzustand und Variante 2: HSI im Sommer (Drau, Bachforelle) . . . . .	49
5.9	WUA während Schwall im Sommer und Winter (Drau, Bachforelle) . . . . .	50

5.10	WUA während Schwall im Sommer und Winter (Drau, Bachforelle) . . .	51
5.10	WUA während Schwall im Sommer und Winter (Drau, Bachforelle) (Forts.) . . . . .	52
5.11	HSI der Variante 3 im Sommer und Winter (Drau, Bachforelle) . . . .	53
5.12	WUA während Schwall im Sommer und Winter (Drau, Bachforelle) . . .	54
5.13	Ausschnitt: Habitatverteilung im Sommer (Drau, Äsche) . . . . .	55
5.14	WUA während Schwall im Sommer und Winter (Drau, Äsche) . . . . .	55
5.14	WUA während Schwall im Sommer und Winter (Drau, Äsche) (Forts.) .	56
5.15	Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Drau, Bach- forelle) – Frühling und Sommer . . . . .	57
5.16	Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Drau, Bach- forelle) – Herbst und Winter . . . . .	58
5.17	Jahreszeitliche Entwicklung der Mediane (Drau, Bachforelle) . . . . .	59
5.18	Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Drau, Äsche) – Frühling und Sommer . . . . .	60
5.19	Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Drau, Äsche) – Herbst und Winter . . . . .	61
5.20	Jahreszeitliche Entwicklung der Mediane (Drau, Äsche) . . . . .	62
5.21	Habitatverteilung für den Istzustand im Sommer und Winter (III) . . . .	63
5.22	WUA während Schwall im Sommer und Winter (III) . . . . .	64
5.22	WUA während Schwall im Sommer und Winter (III) (Forts.) . . . . .	65
5.23	Habitatverteilung für die Variante im Sommer und Winter (III) . . . . .	65
5.24	WUA während Schwall im Sommer und Winter (III) . . . . .	66
5.24	WUA während Schwall im Sommer und Winter (III) (Forts.) . . . . .	67
5.25	Habitatverteilung für die Variante im Sommer und Winter (III) . . . . .	68
5.26	WUA während Schwall im Sommer und Winter (III) . . . . .	69
5.27	Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (III) – Früh- ling und Sommer . . . . .	70
5.27	Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (III) – Herbst und Win- ter . . . . .	71
5.28	Jahreszeitliche Entwicklung der Mediane (III) . . . . .	72
5.29	Habitatverteilung für den Istzustand im Sommer und Winter (Inn Str. 1)	73
5.30	Habitatverteilung für die Variante im Sommer und Winter (Inn Str. 1) .	74
5.31	WUA während Schwall im Sommer und Winter (Inn Str. 1) . . . . .	75
5.32	Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Inn Str. 1) – Frühling . . . . .	76
5.32	Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Inn Str. 1) – Sommer und Herbst . . . . .	77
5.32	Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Inn Str. 1) – Winter . . . . .	78
5.33	Jahreszeitliche Entwicklung der Mediane (Inn Str. 1) . . . . .	78
5.34	Habitatverteilung für den Istzustand im Sommer und Winter (Inn Str. 2)	79
5.35	Habitatverteilung für die Variante im Sommer und Winter (Inn Str. 2) .	80
5.36	WUA während Schwall im Sommer und Winter (Inn Str. 2) . . . . .	81
5.37	Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Inn Str. 2) – Frühling . . . . .	82

5.37	Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Inn Str. 2) – Sommer und Herbst . . . . .	83
5.37	Vergleich von Varianten und Istzustand mittels Box-Plots (Inn Str. 2) – Winter . . . . .	84
5.38	Jahreszeitliche Entwicklung der Mediane (Inn Str. 2) . . . . .	84
5.39	Digitales Geländemodell der Strecke 4 . . . . .	85
5.40	Hydrodynamik der Variante mit überflutetem Auegebiet (Sommer, bei Schwall) . . . . .	86
5.41	Vergleich der Q-t-Diagramme mit und ohne Überflutung der Au (Inn Str. 4) – Sommer . . . . .	87
5.42	Vergleich der Q-t-Diagramme mit und ohne Überflutung der Au (Inn Str. 4) – Winter . . . . .	88
8.1	Präferenzkurven für <i>Salmo trutta fario</i> 0+ . . . . .	103
8.2	Präferenzkurven für <i>Salmo trutta fario</i> 1+ . . . . .	103
8.3	Präferenzkurven für <i>Salmo trutta fario</i> 2+ . . . . .	104
8.4	Präferenzkurven für <i>Thymallus thymallus</i> 0+, im Juni . . . . .	104
8.5	Präferenzkurven für <i>Thymallus thymallus</i> 0+, im Juli . . . . .	104
8.6	Präferenzkurven für <i>Thymallus thymallus</i> 0+, im August . . . . .	105
8.7	Präferenzkurven für <i>Thymallus thymallus</i> 0+, im Oktober . . . . .	105
8.8	Habitatverteilung für den Istzustand im Sommer (Äsche) . . . . .	106
8.9	Habitatverteilung für den Istzustand im Winter (Äsche) . . . . .	107
8.10	Vergleich der Habitate im Sommer (Bachforelle) . . . . .	107
8.11	Vergleich der Habitate im Sommer (Bachforelle) . . . . .	108
8.12	Vergleich der Habitate im Winter (Bachforelle) . . . . .	108
8.13	WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Bachforelle) . . . . .	109
8.14	Vergleich der Habitate bei Schwall im Sommer (Äsche) . . . . .	110
8.15	Vergleich der Habitate bei Sunk im Sommer (Äsche) . . . . .	111
8.16	Vergleich der Habitate bei Schwall im Winter (Äsche) . . . . .	112
8.17	Vergleich der Habitate bei Sunk im Winter (Äsche) . . . . .	113
8.18	WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Äsche) . . . . .	114
8.19	WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Bachforelle) . . . . .	115
8.20	WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Äsche) . . . . .	116
8.21	WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Bachforelle) . . . . .	117
8.22	Habitatverteilung für die Variante 3 im Sommer (Äsche) . . . . .	118
8.23	WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Äsche) . . . . .	119
8.24	Habitatverteilung für die Variante im Sommer und Winter (Bachforelle) . . . . .	120
8.25	WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Bachforelle) . . . . .	121
8.26	WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Bachforelle) . . . . .	122
8.27	WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Bachforelle) . . . . .	123
8.28	Habitatverteilung für die Variante im Frühling und Herbst (Bachforelle) . . . . .	124
8.29	WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Bachforelle) . . . . .	125
8.30	WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Bachforelle) . . . . .	126
8.31	Vergleich der Q-t-Diagramme mit und ohne Überflutung der Au – Frühling . . . . .	127
8.32	Vergleich der Q-t-Diagramme mit und ohne Überflutung der Au – Frühling	128

# Tabellenverzeichnis

3.1	Habitatskala Einteilung . . . . .	19
4.1	Flüsse, Strecken und Varianten im Überblick, mit zugehörigem Untersuchungsumfang . . . . .	32
5.1	Vergleich der WUA bei Regulierung (Drau, Variante 1) . . . . .	62

# 8 Anhang

## 8.1 Präferenzkurven

### 8.1.1 Bachforelle

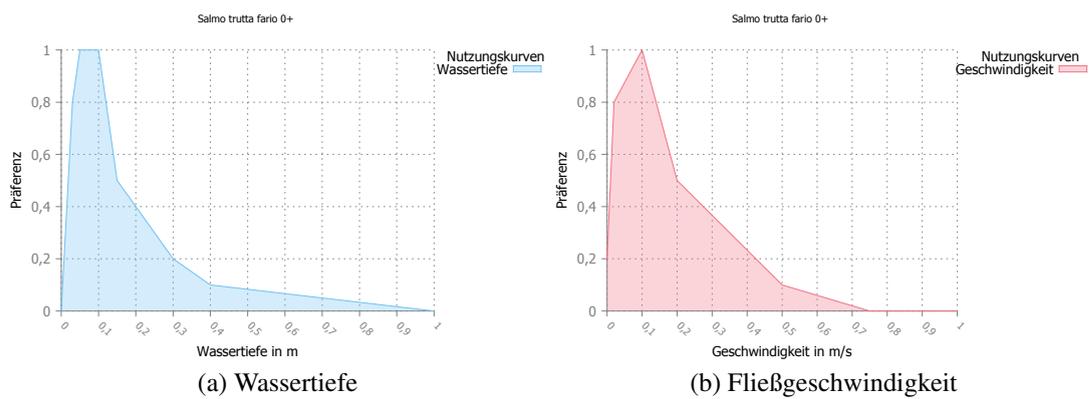


Abbildung 8.1: Präferenzkurven für *Salmo trutta fario* 0+

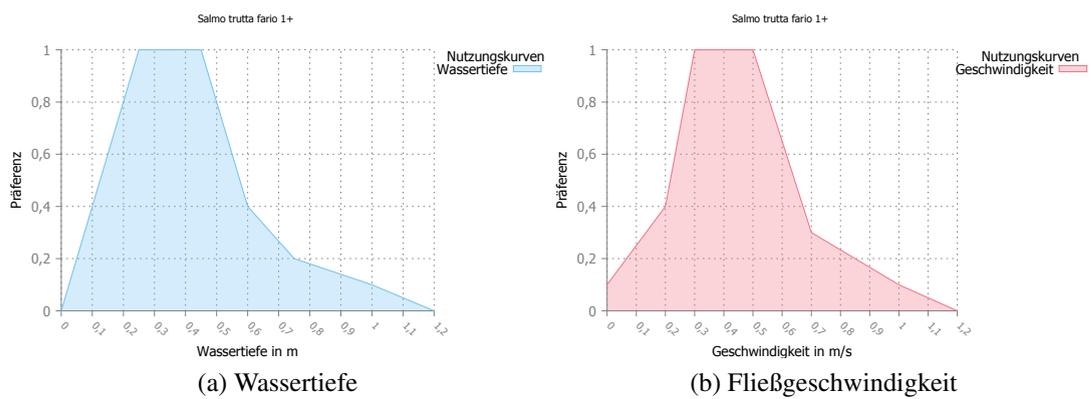


Abbildung 8.2: Präferenzkurven für *Salmo trutta fario* 1+

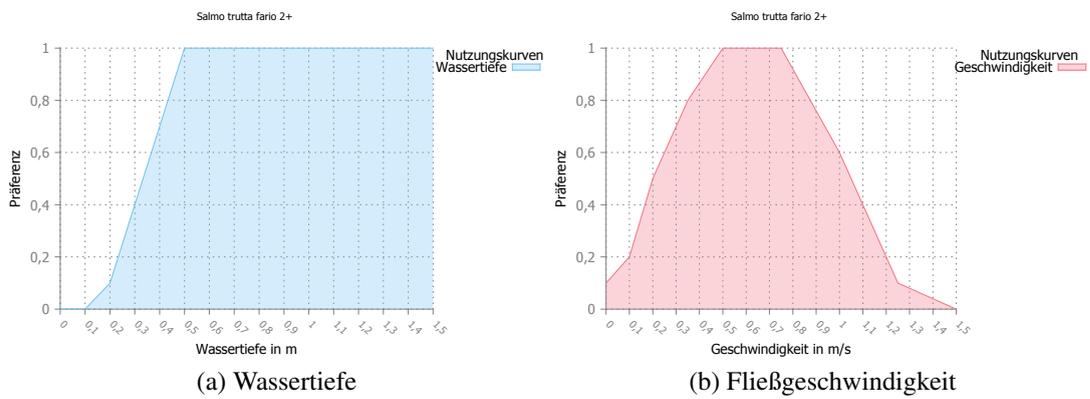


Abbildung 8.3: Präferenzkurven für *Salmo trutta fario* 2+

8.1.2 Europäische Äsche

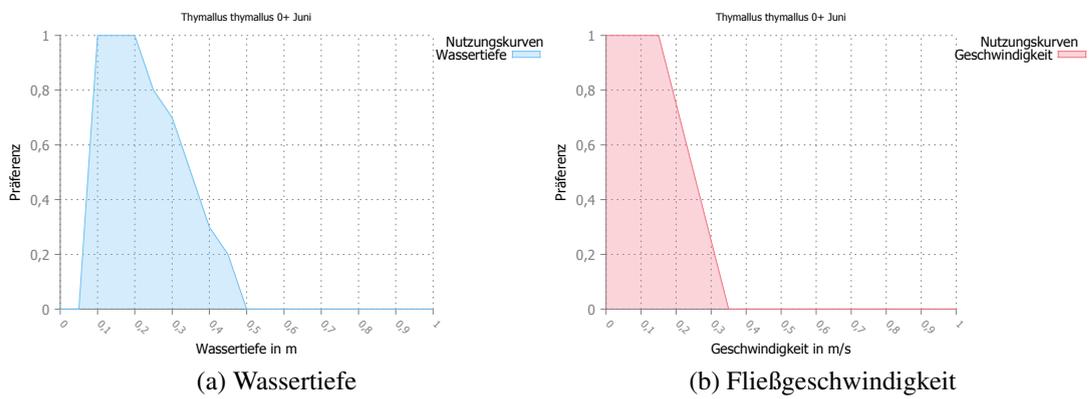


Abbildung 8.4: Präferenzkurven für *Thymallus thymallus* 0+, im Juni

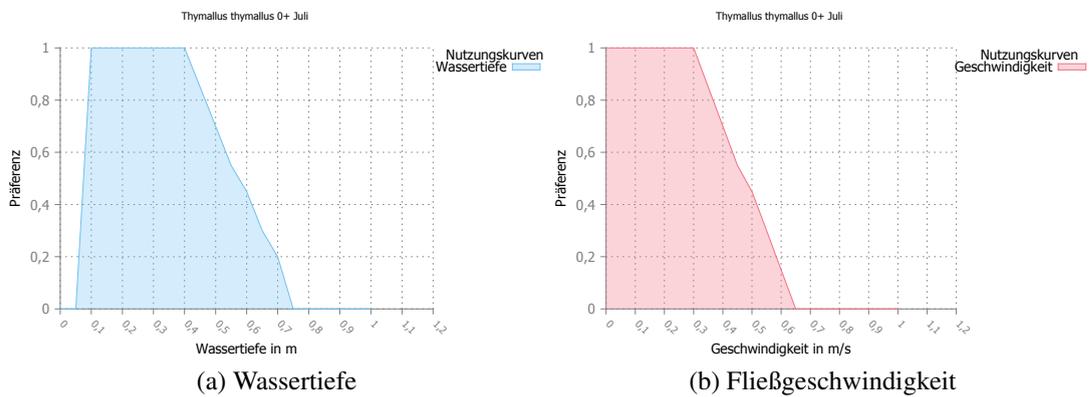
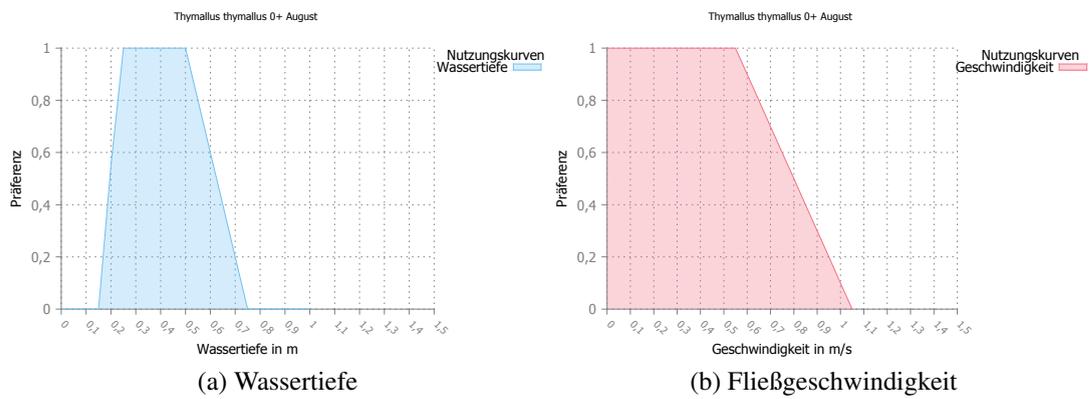
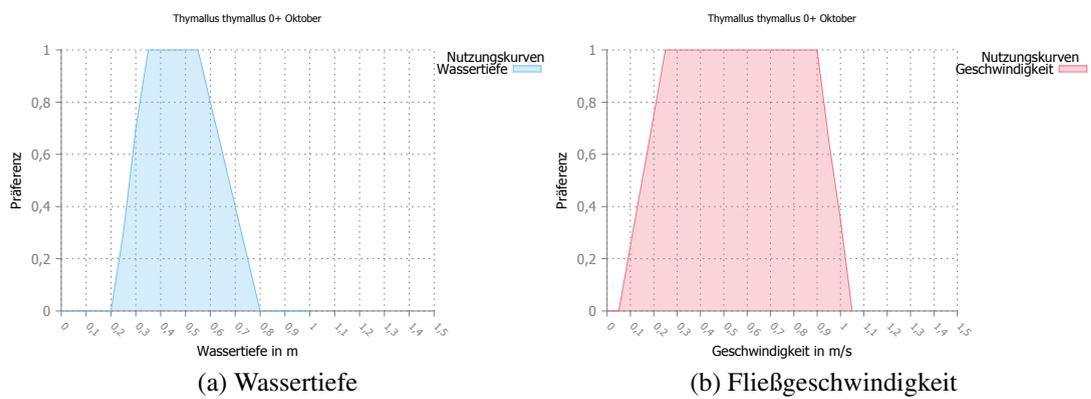


Abbildung 8.5: Präferenzkurven für *Thymallus thymallus* 0+, im Juli

Abbildung 8.6: Präferenzkurven für *Thymallus thymallus* 0+, im AugustAbbildung 8.7: Präferenzkurven für *Thymallus thymallus* 0+, im Oktober

## 8.2 Drau – Strecke 2

### 8.2.1 Istzustand

#### Bachforelle

Die Darstellung der HSI für die Bachforelle findet sich zur Gänze im Abschnitt 5.1.1 auf Seite 40.

#### Europäische Äsche

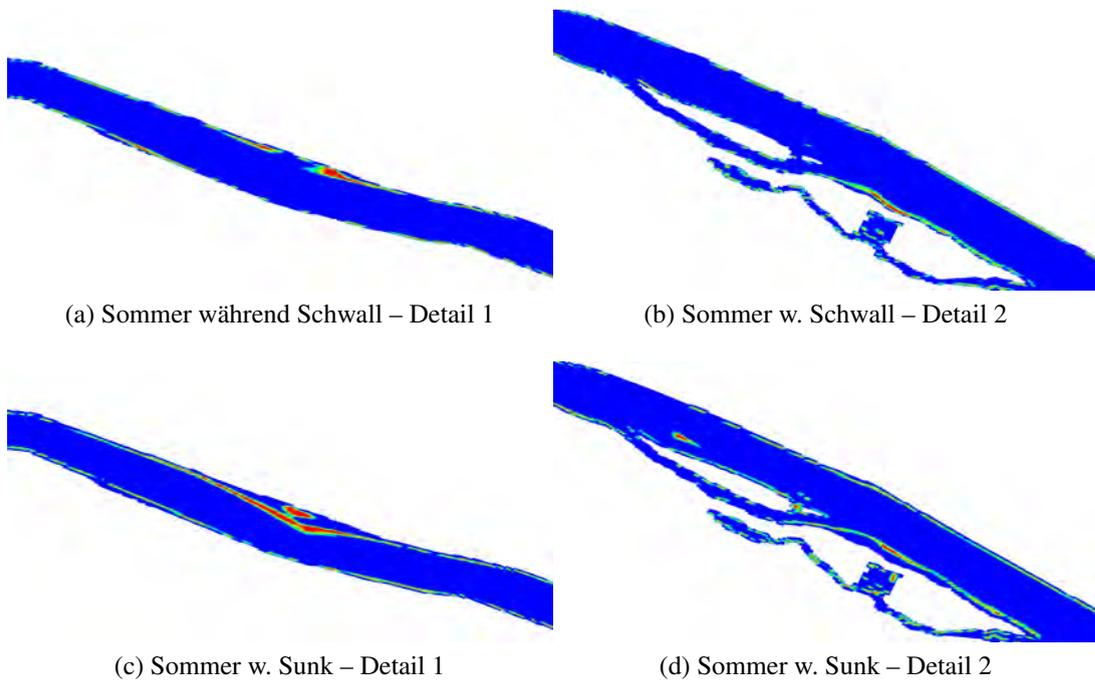


Abbildung 8.8: Habitatverteilung für den Istzustand im Sommer (Äsche)

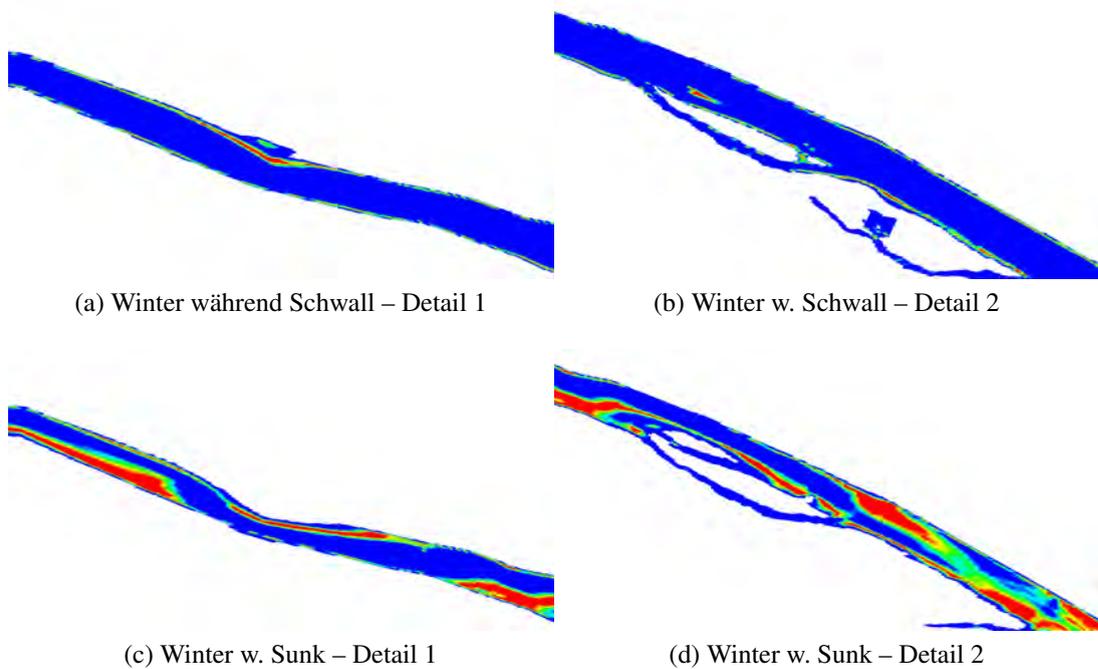


Abbildung 8.9: Habitatverteilung für den Istzustand im Winter (Äsche)

### 8.2.2 Variante 1

#### Bachforelle

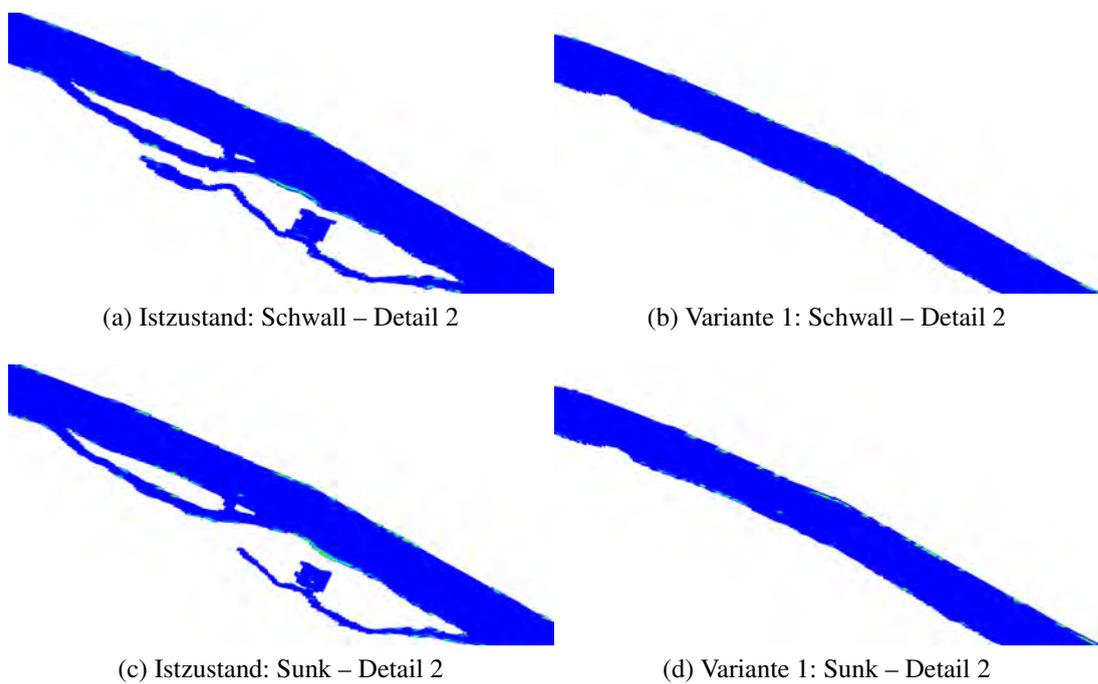


Abbildung 8.10: Vergleich der Habitate im Sommer (Bachforelle)

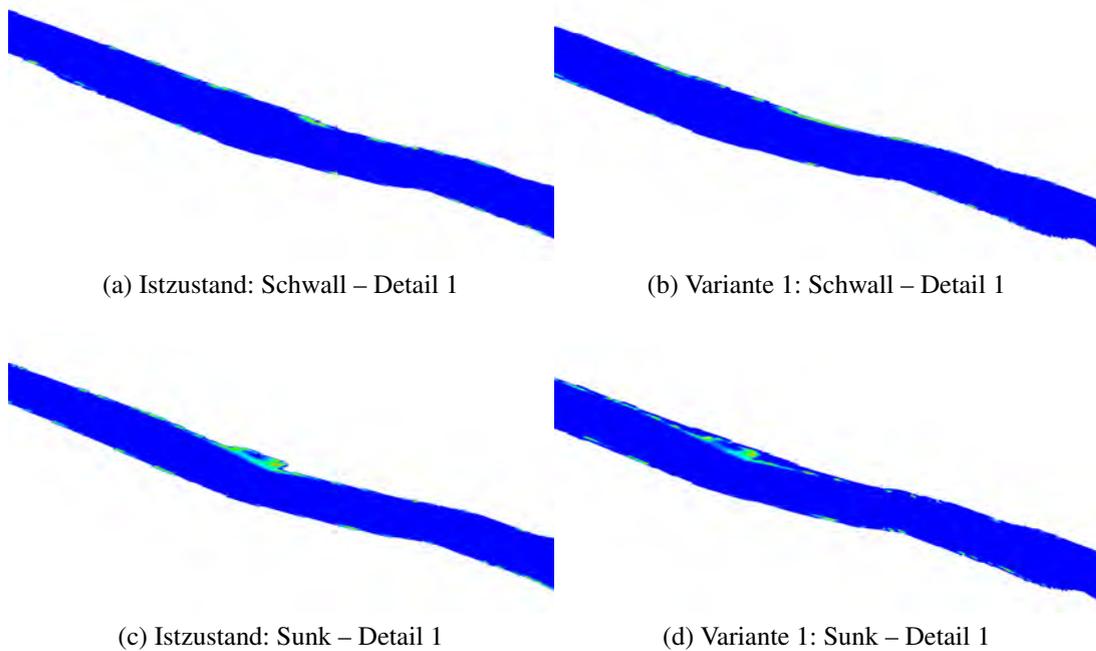


Abbildung 8.11: Vergleich der Habitate im Sommer (Bachforelle)

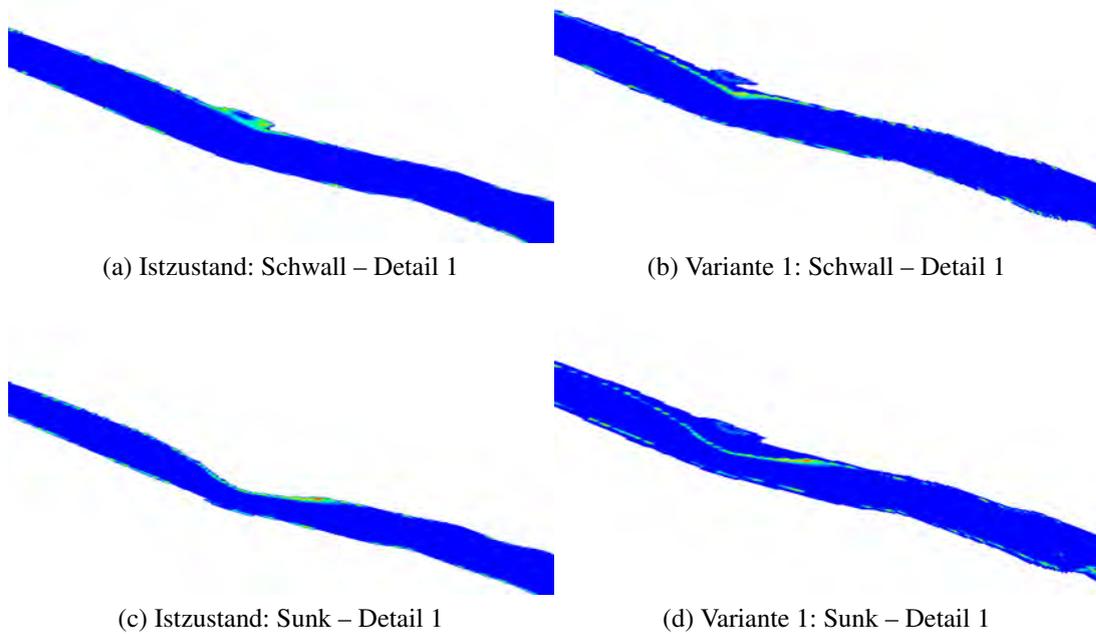
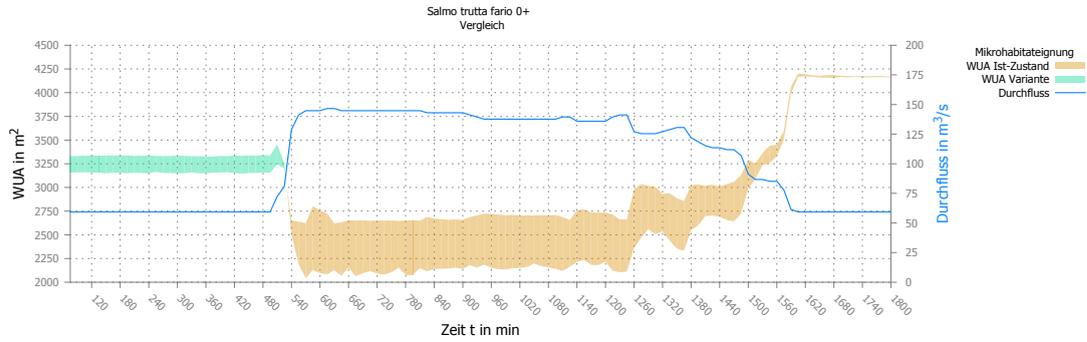
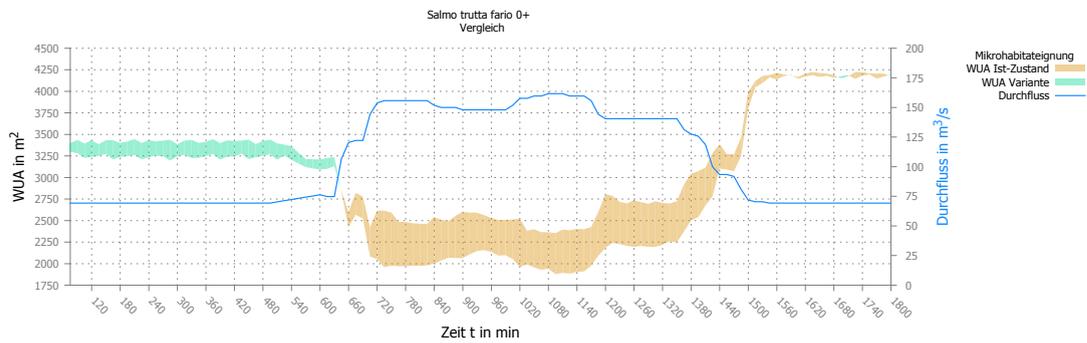


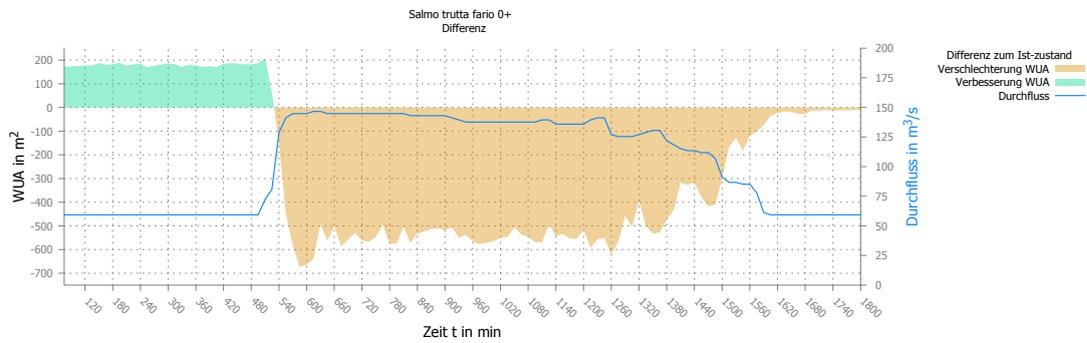
Abbildung 8.12: Vergleich der Habitate im Winter (Bachforelle)



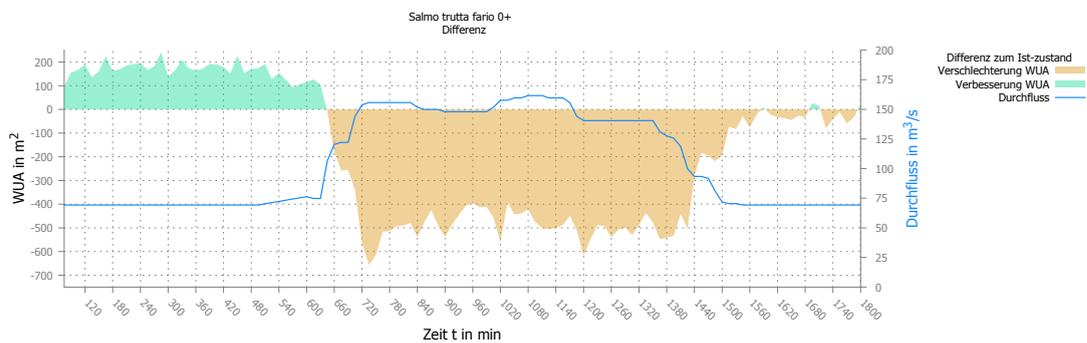
(a) Frühling – WUA parallel



(b) Herbst – WUA parallel



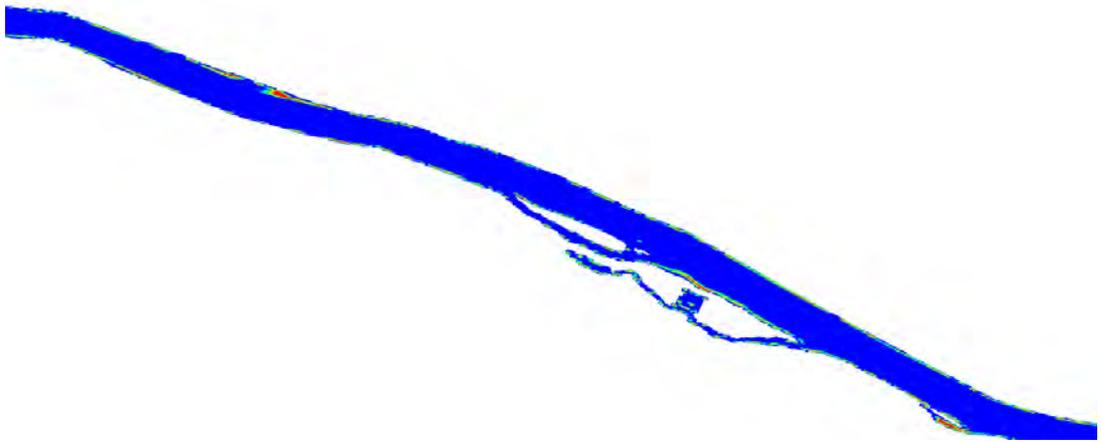
(c) Frühling – Differenz der WUA



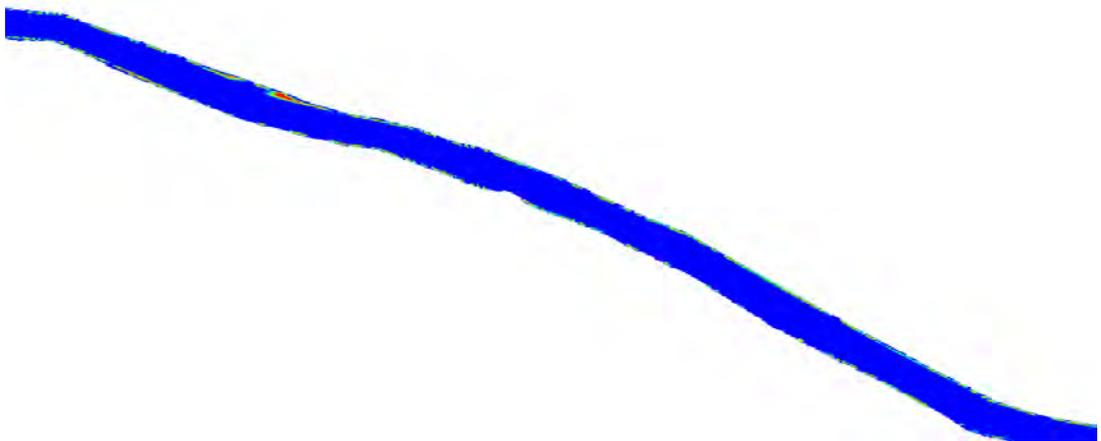
(d) Herbst – Differenz der WUA

Abbildung 8.13: WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Bachforelle)

## Europäische Äsche



(a) Istzustand: Schwall

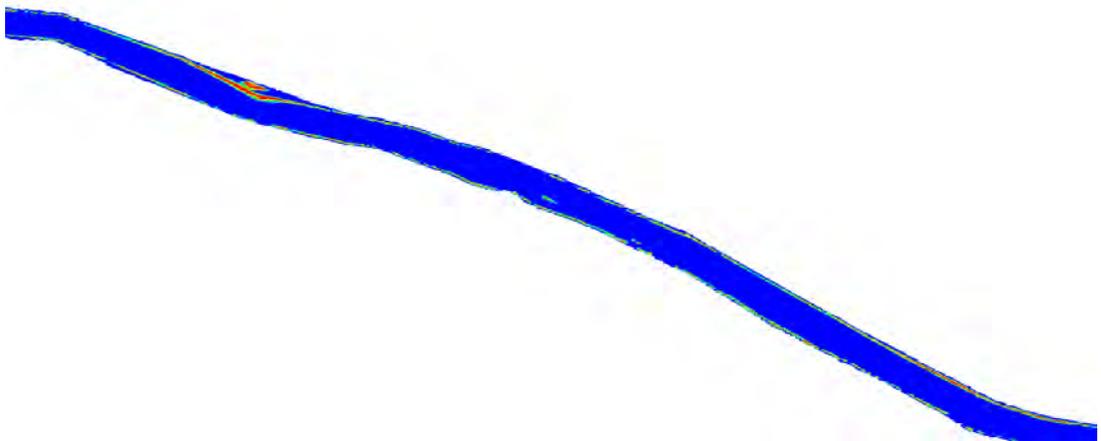


(b) Variante 1: Schwall

Abbildung 8.14: Vergleich der Habitate bei Schwall im Sommer (Äsche)



(a) Istzustand: Sunk

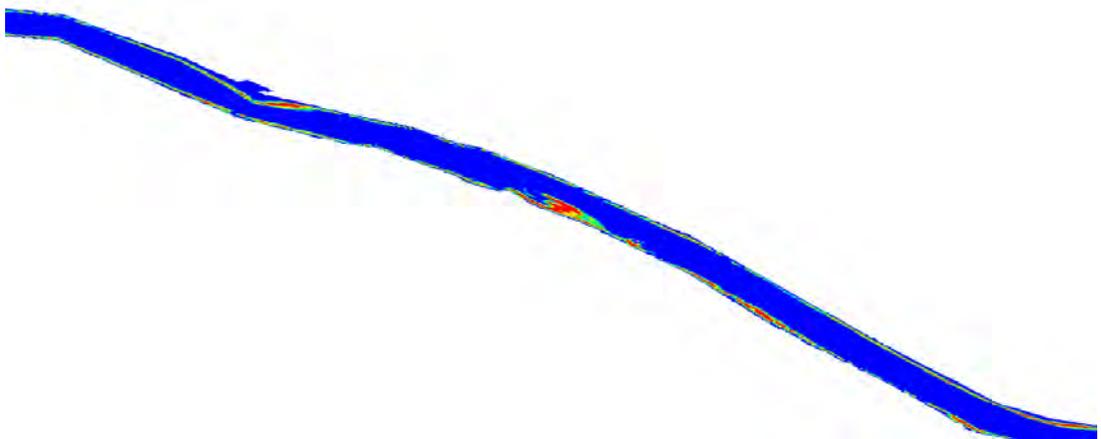


(b) Variante 1: Sunk

Abbildung 8.15: Vergleich der Habitate bei Sunk im Sommer (Äsche)

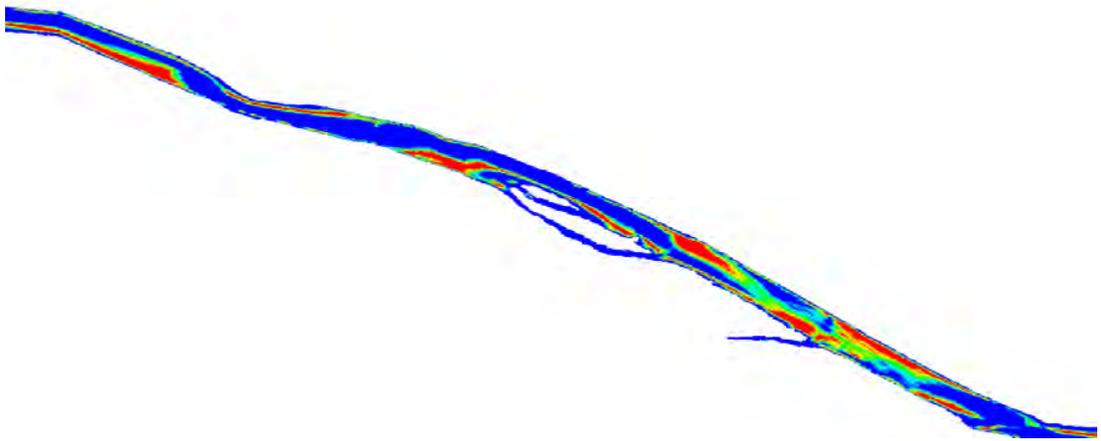


(a) Istzustand: Schwall

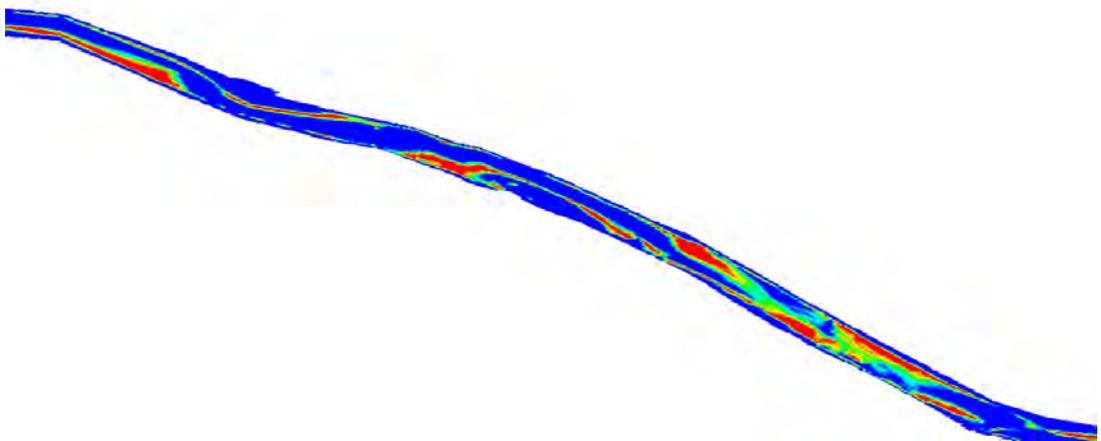


(b) Variante 1: Schwall

Abbildung 8.16: Vergleich der Habitate bei Schwall im Winter (Äsche)

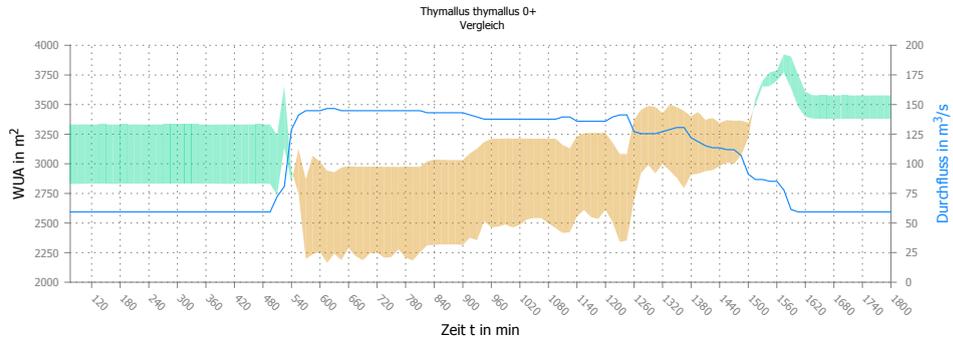


(a) Istzustand: Sunk

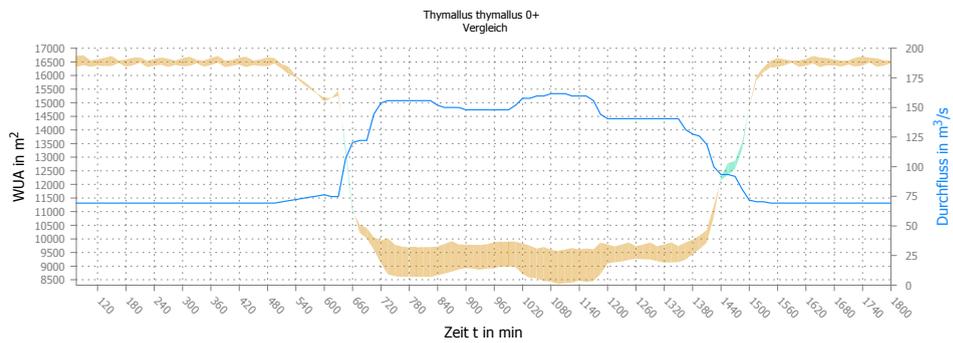


(b) Variante 1: Sunk

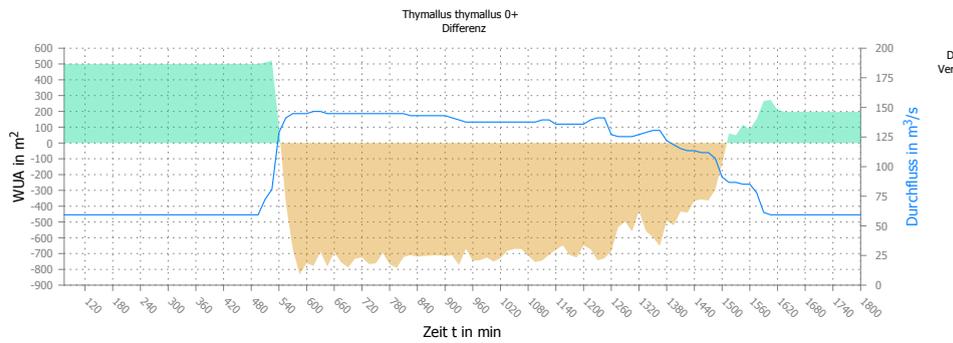
Abbildung 8.17: Vergleich der Habitate bei Sunk im Winter (Äsche)



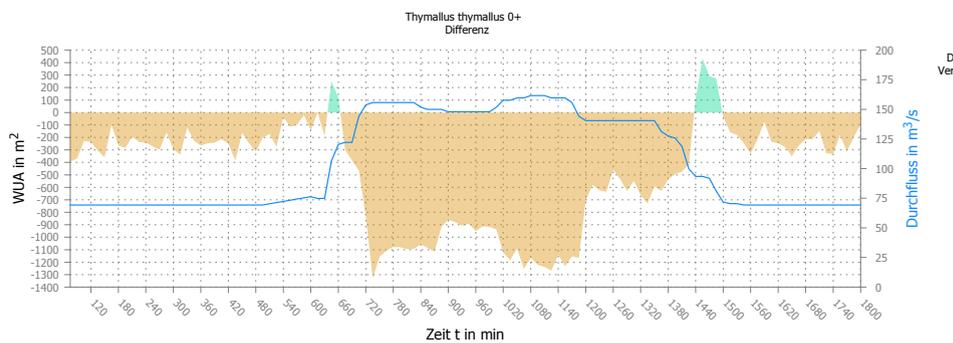
(a) Frühling – WUA parallel



(b) Herbst – WUA parallel



(c) Frühling – Differenz der WUA

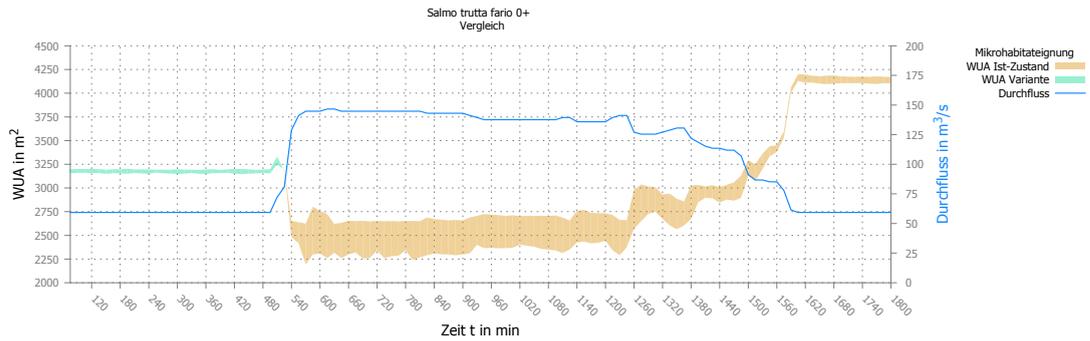


(d) Herbst – Differenz der WUA

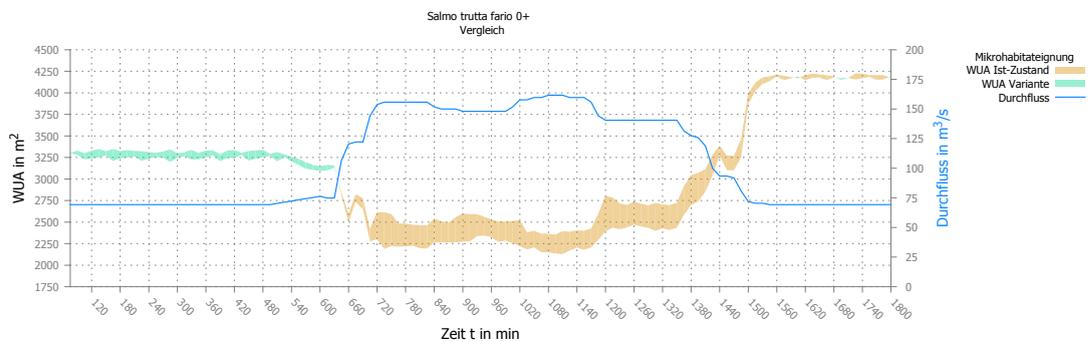
Abbildung 8.18: WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Äsche)

8.2.3 Variante 2

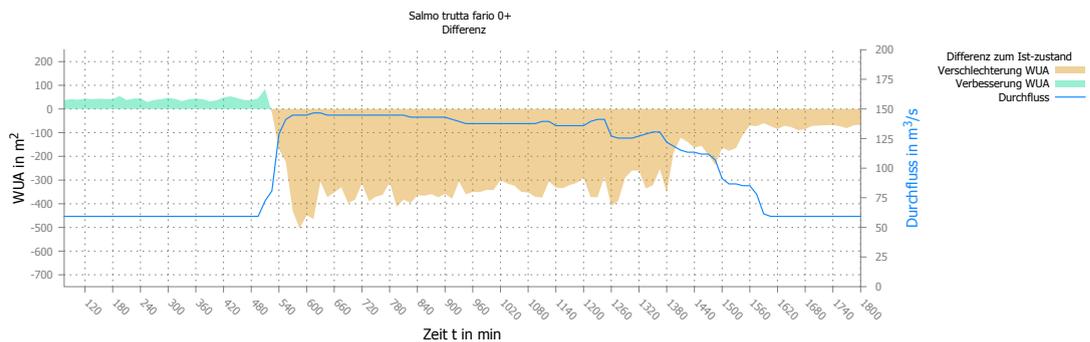
Bachforelle



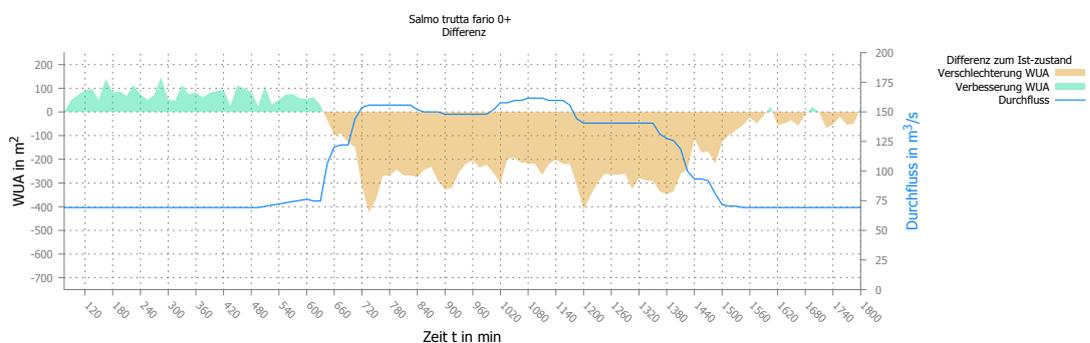
(a) Frühling – WUA parallel



(b) Herbst – WUA parallel



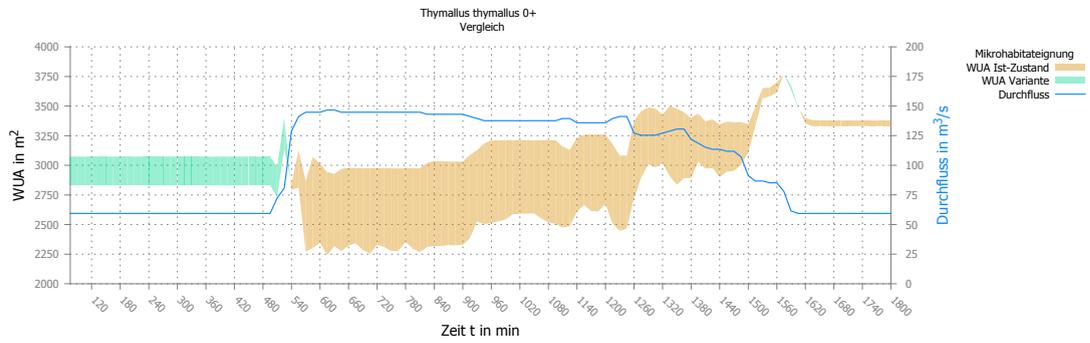
(c) Frühling – Differenz der WUA



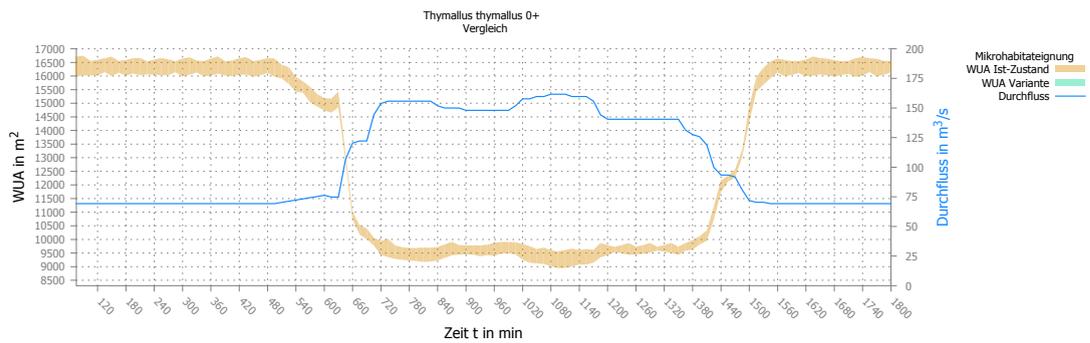
(d) Herbst – Differenz der WUA

Abbildung 8.19: WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Bachforelle)

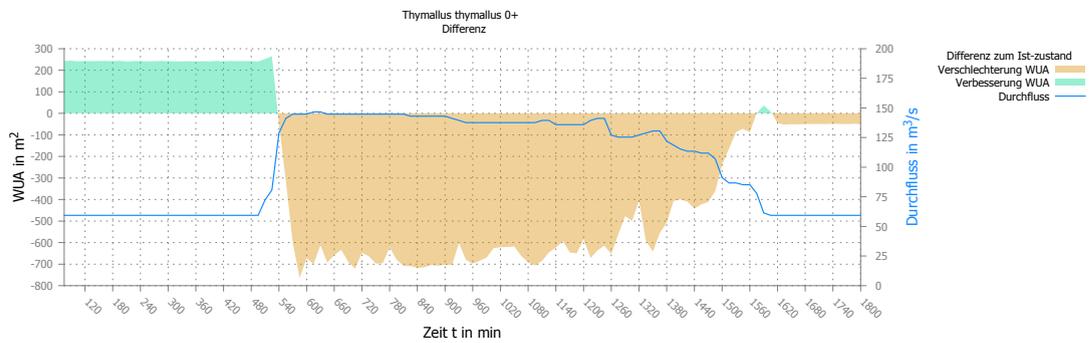
## Europäische Äsche



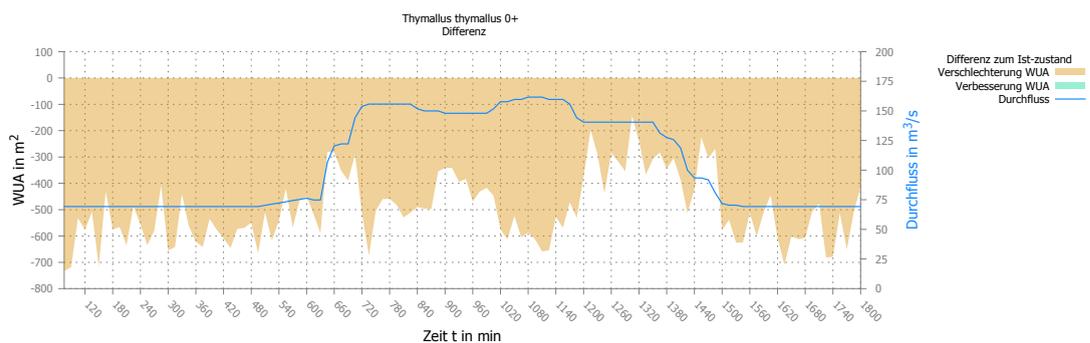
(a) Frühling – WUA parallel



(b) Herbst – WUA parallel



(c) Frühling – Differenz der WUA

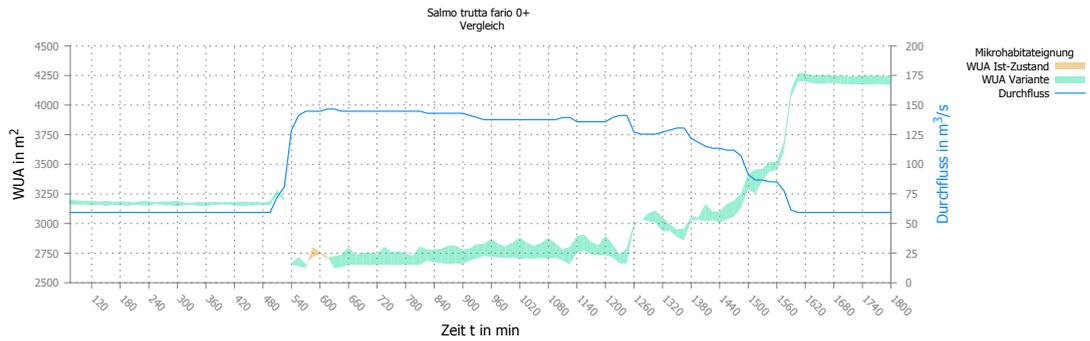


(d) Herbst – Differenz der WUA

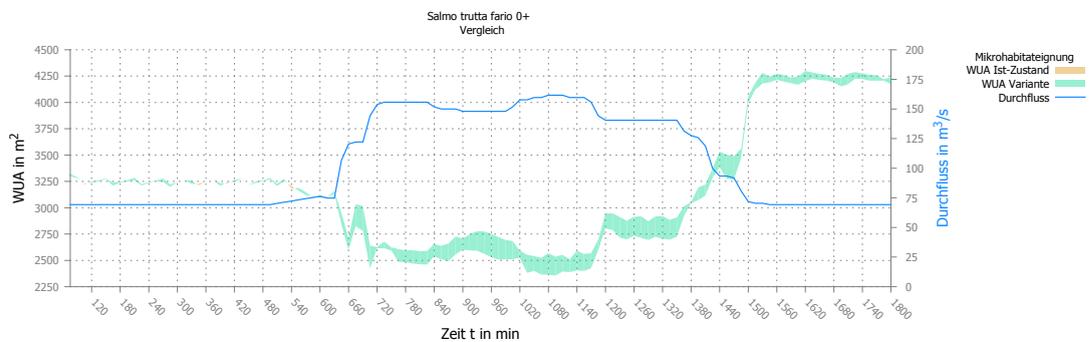
Abbildung 8.20: WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Äsche)

8.2.4 Variante 3

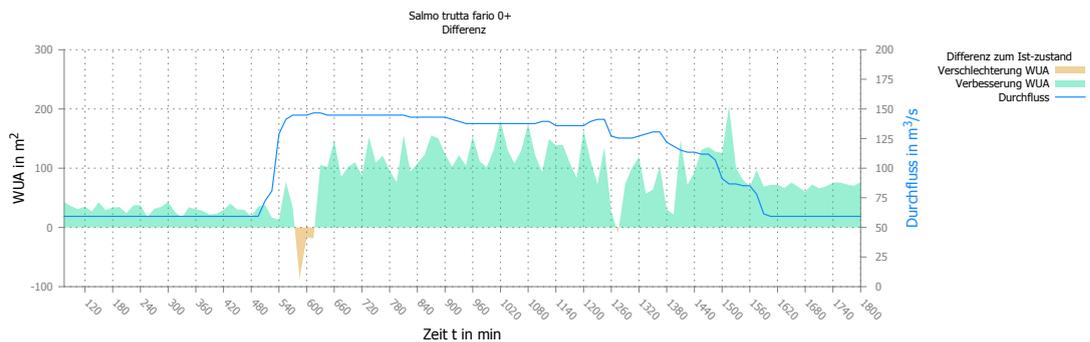
Bachforelle



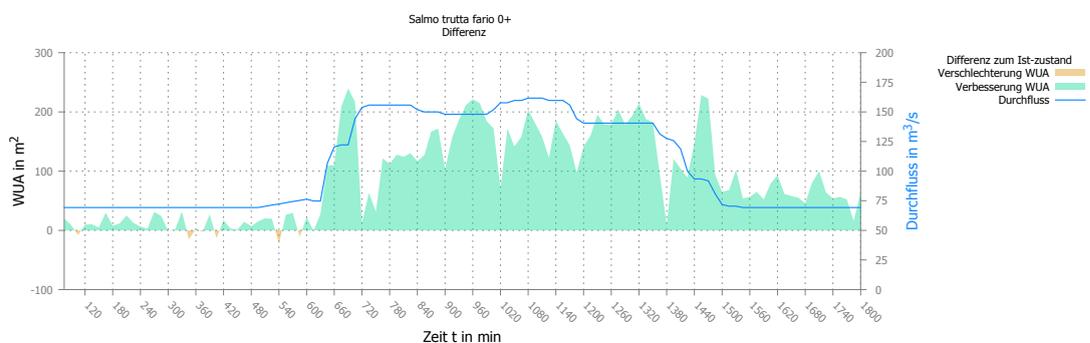
(a) Frühling – WUA parallel



(b) Herbst – WUA parallel



(c) Frühling – Differenz der WUA



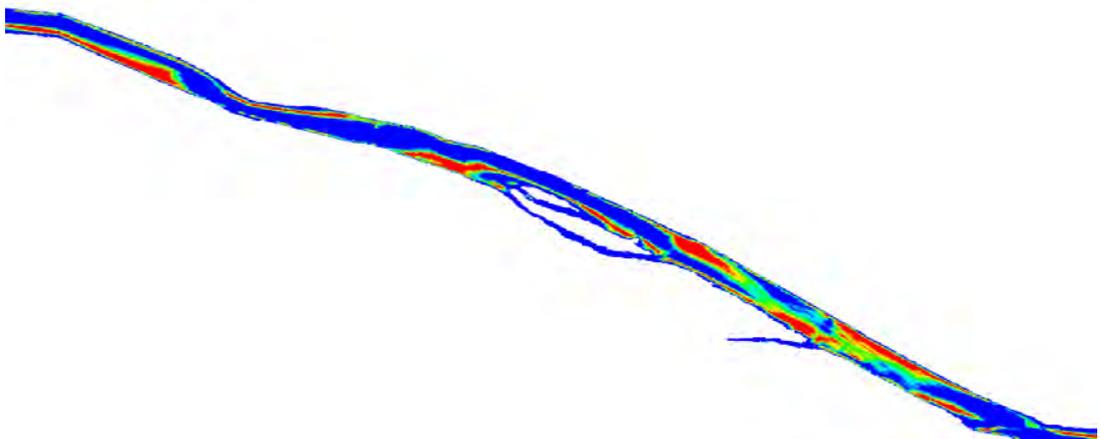
(d) Herbst – Differenz der WUA

Abbildung 8.21: WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Bachforelle)

## Europäische Äsche

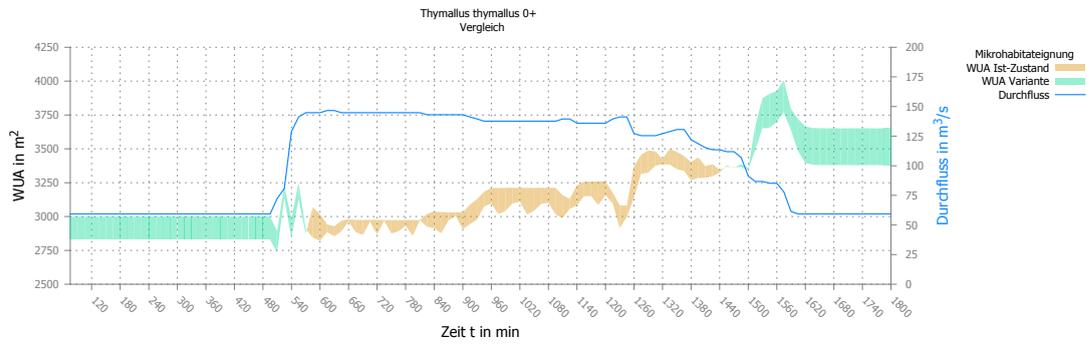


(a) Sommer während Schwall – Überblick

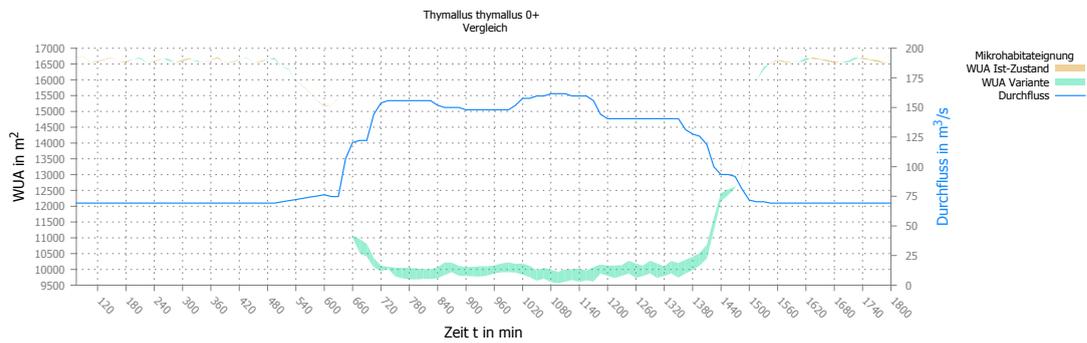


(b) Sommer während Sunk – Überblick

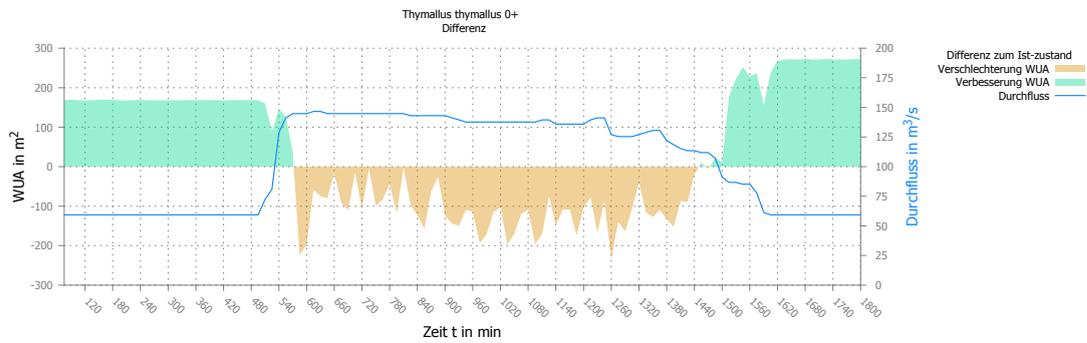
Abbildung 8.22: Habitatverteilung für die Variante 3 im Sommer (Äsche)



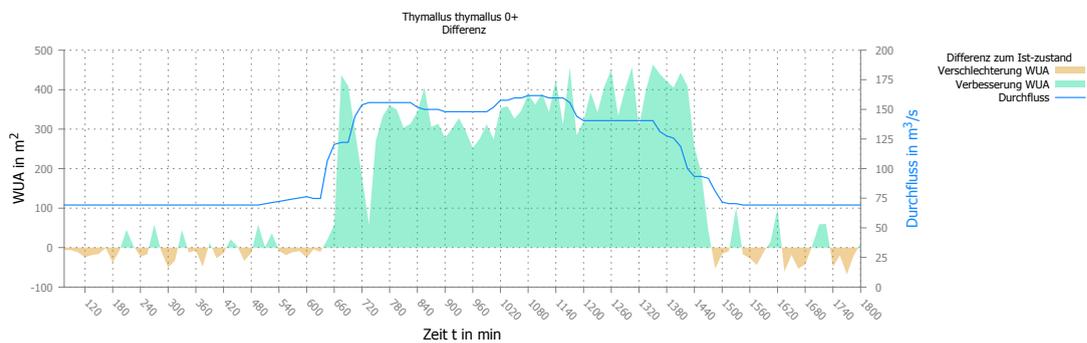
(a) Frühling – WUA parallel



(b) Herbst – WUA parallel



(c) Frühling – Differenz der WUA



(d) Herbst – Differenz der WUA

Abbildung 8.23: WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Äsche)

### 8.3 III – Strecke 2

#### 8.3.1 Variante 1

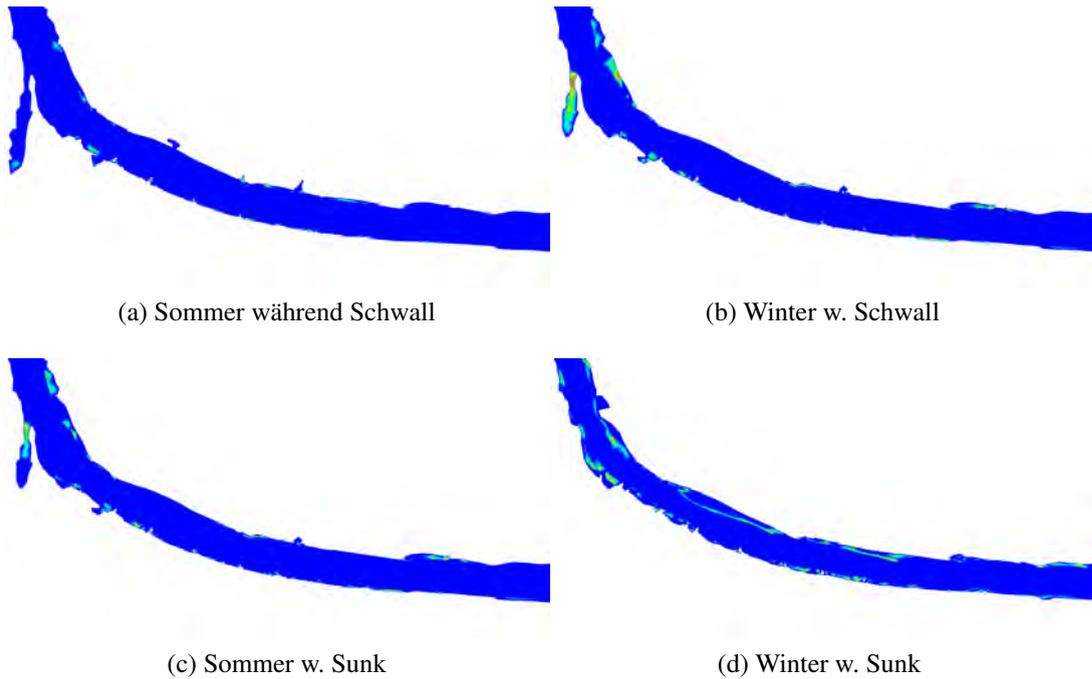


Abbildung 8.24: Habitatverteilung für die Variante im Sommer und Winter (Bachforelle)

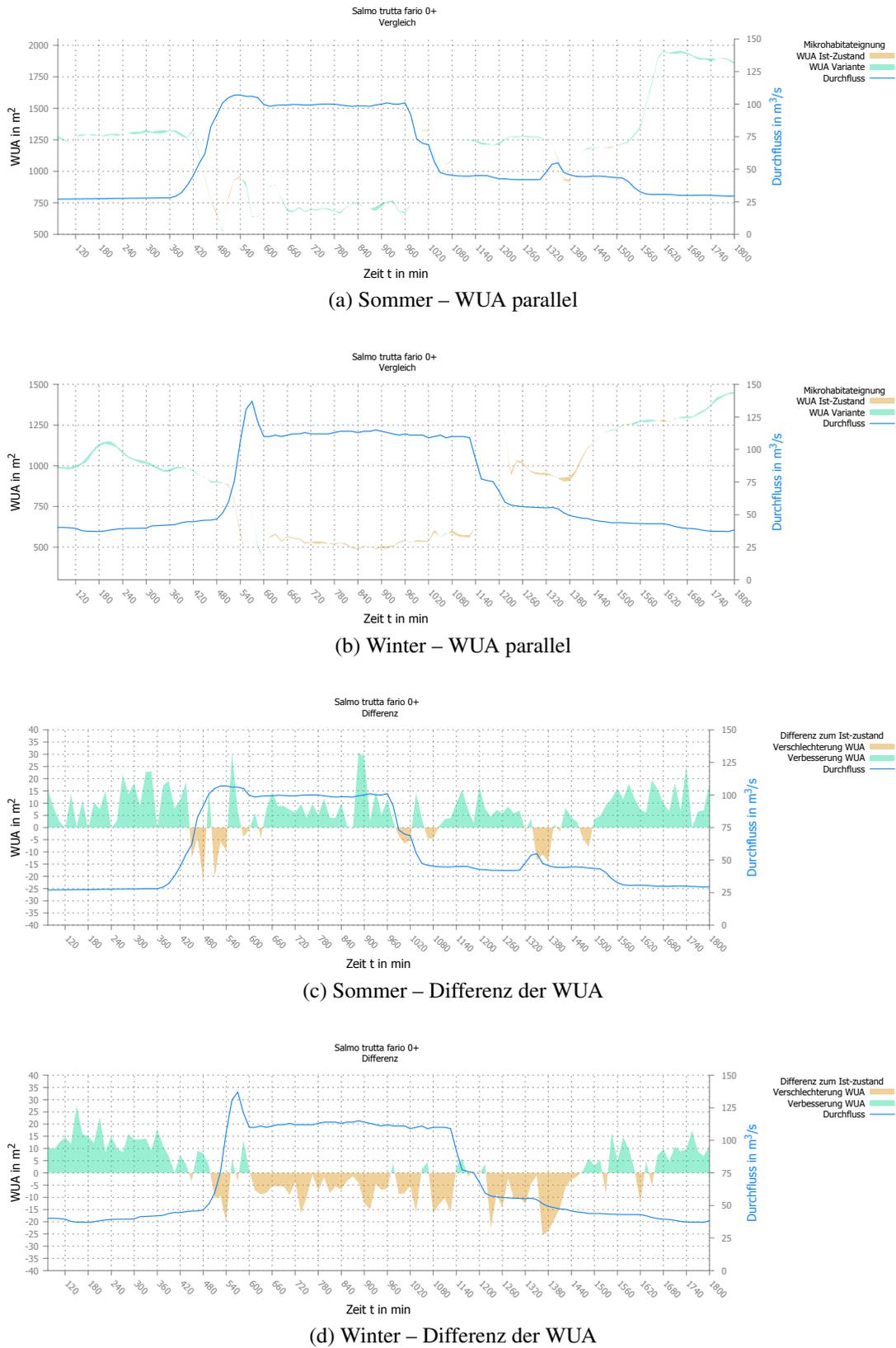
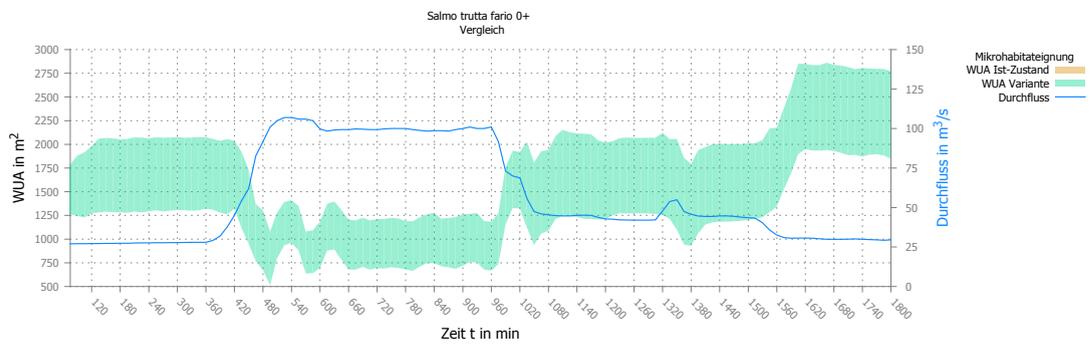
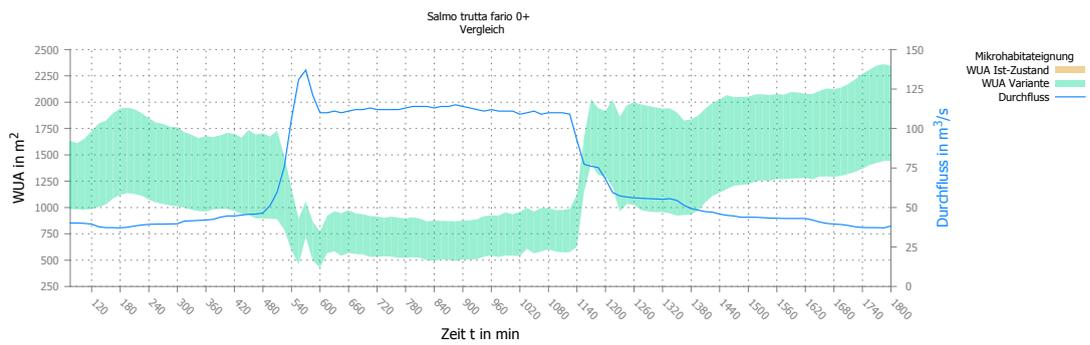


Abbildung 8.25: WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Bachforelle)

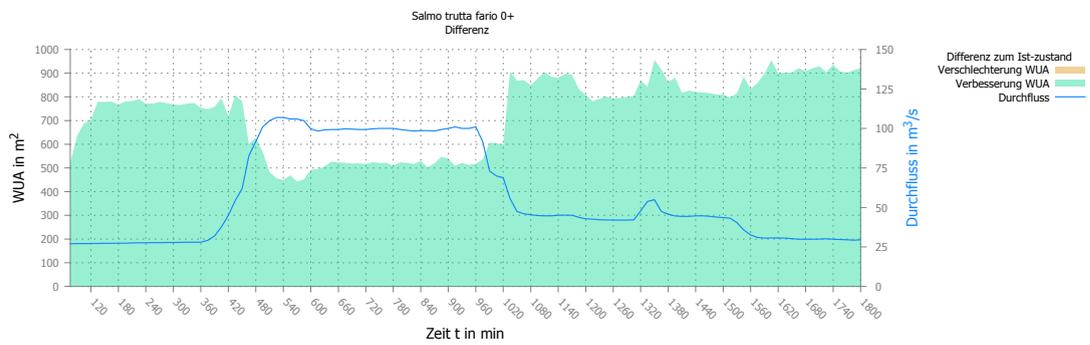
8.3.2 Variante 2



(a) Sommer – WUA parallel



(b) Winter – WUA parallel



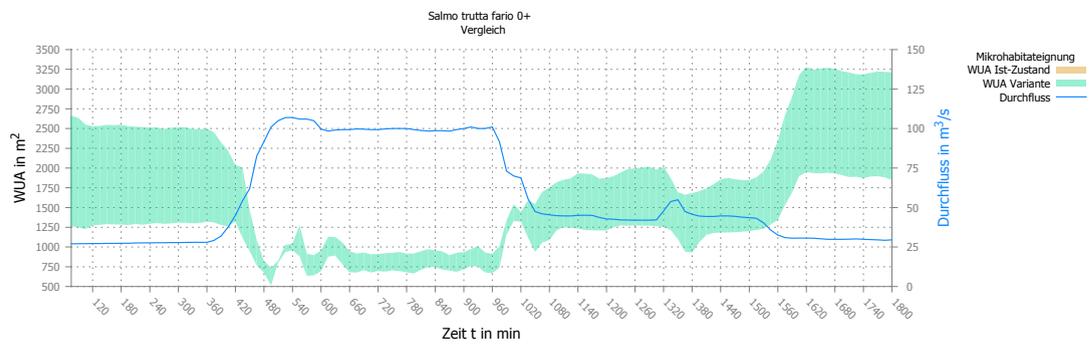
(c) Sommer – Differenz der WUA



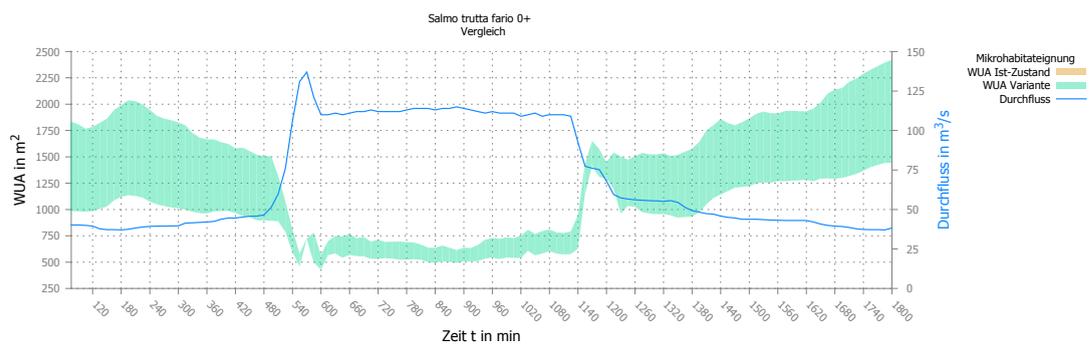
(d) Winter – Differenz der WUA

Abbildung 8.26: WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Bachforelle)

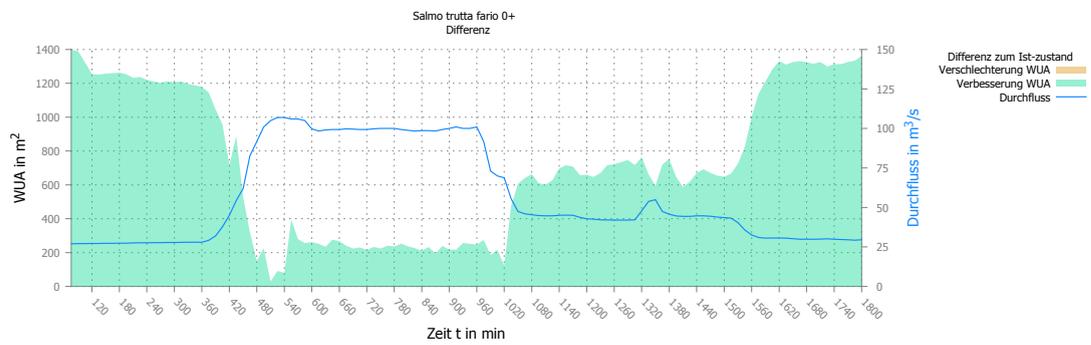
8.3.3 Variante 3



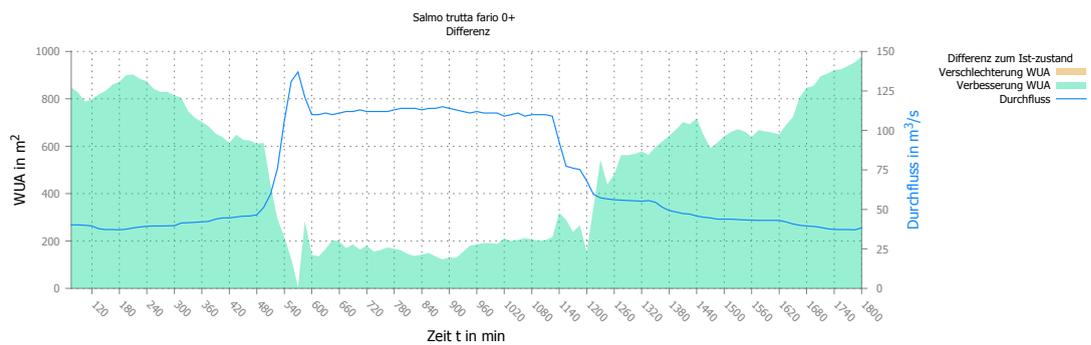
(a) Sommer – WUA parallel



(b) Winter – WUA parallel



(c) Sommer – Differenz der WUA



(d) Winter – Differenz der WUA

Abbildung 8.27: WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Bachforelle)

## 8.4 Inn – Strecke 1

### 8.4.1 Variante 1

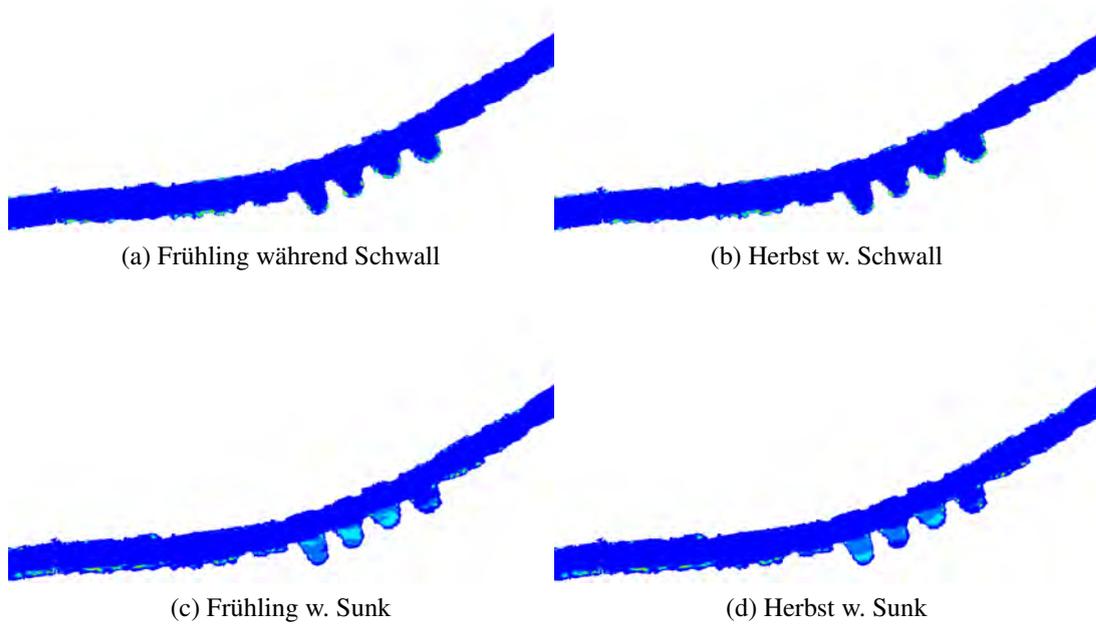
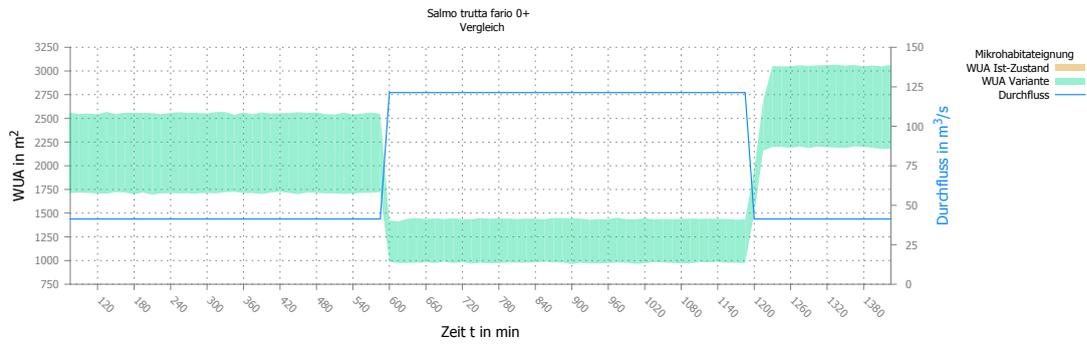
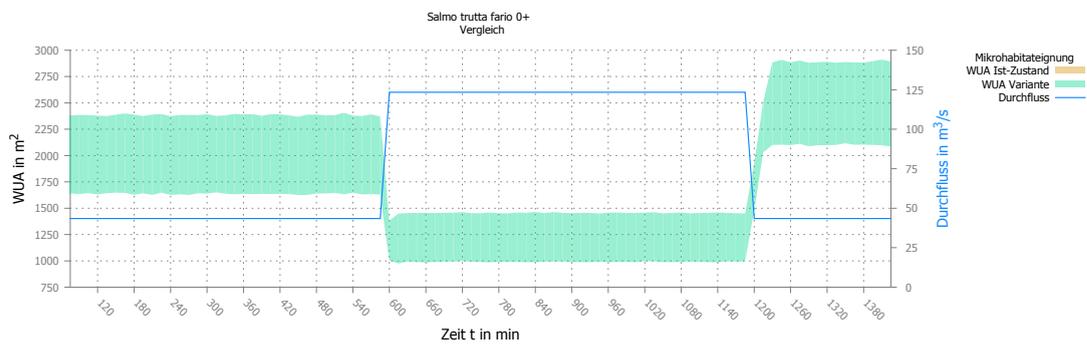


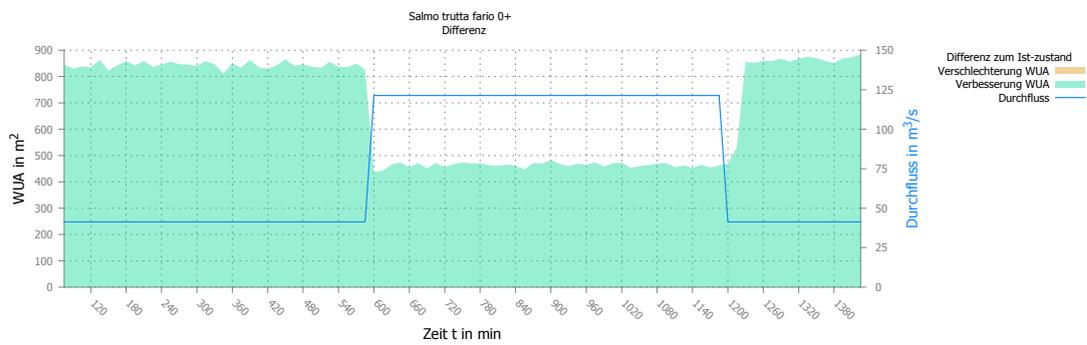
Abbildung 8.28: Habitatverteilung für die Variante im Frühling und Herbst (Bachforelle)



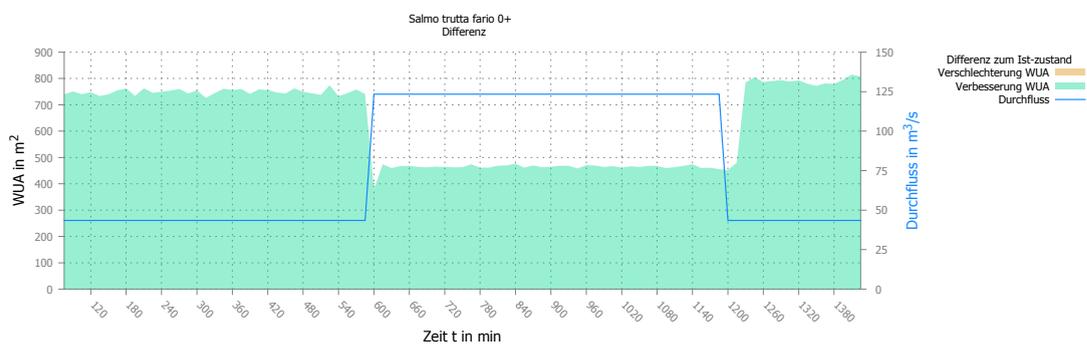
(a) Sommer – WUA parallel



(b) Winter – WUA parallel



(c) Sommer – Differenz der WUA

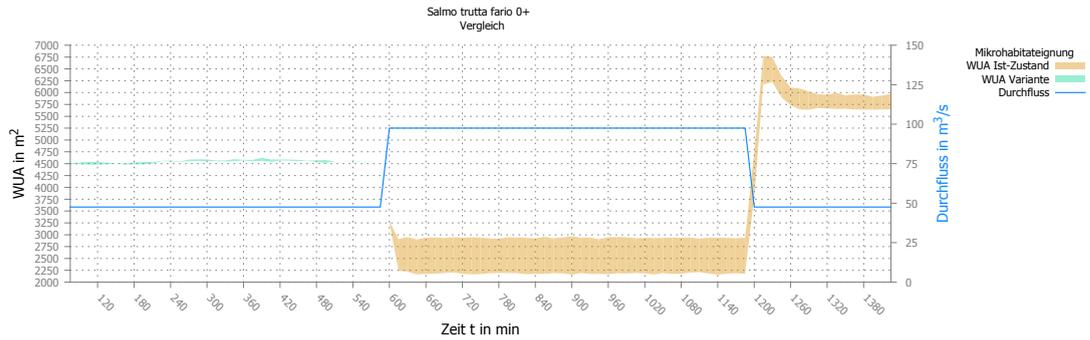


(d) Winter – Differenz der WUA

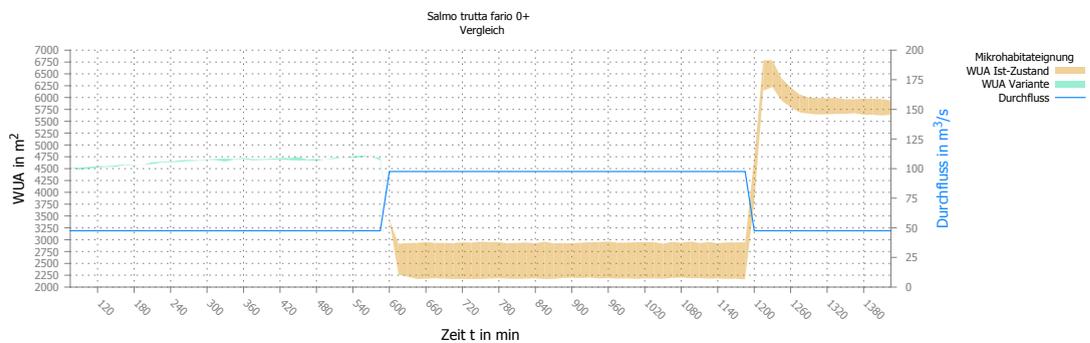
Abbildung 8.29: WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Bachforelle)

## 8.5 Inn – Strecke 2

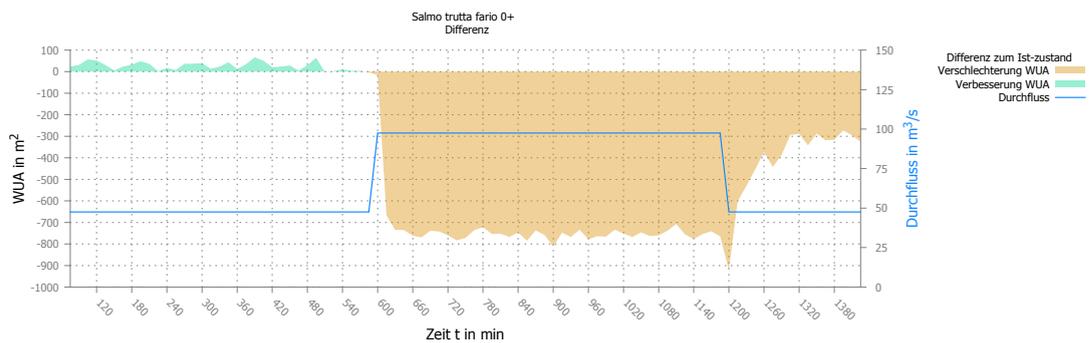
### 8.5.1 Variante 1



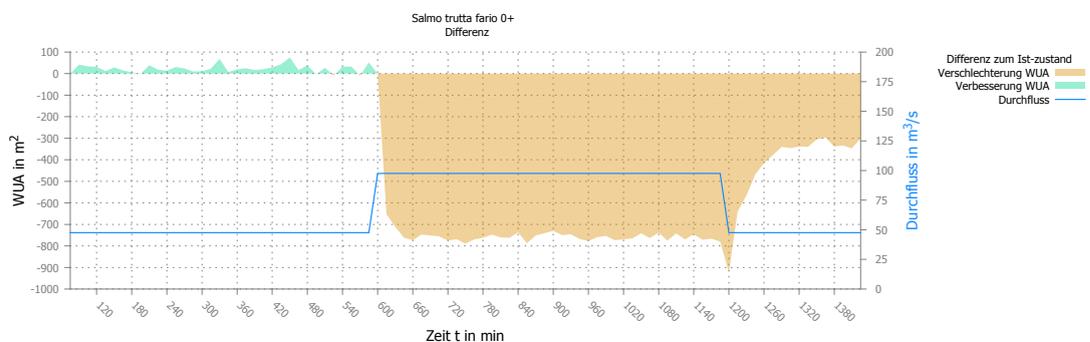
(a) Sommer – WUA parallel



(b) Winter – WUA parallel



(c) Sommer – Differenz der WUA



(d) Winter – Differenz der WUA

Abbildung 8.30: WUA während Schwall im Frühling und Herbst (Bachforelle)

## 8.6 Inn – Strecke 4

### 8.6.1 Wellendämpfung

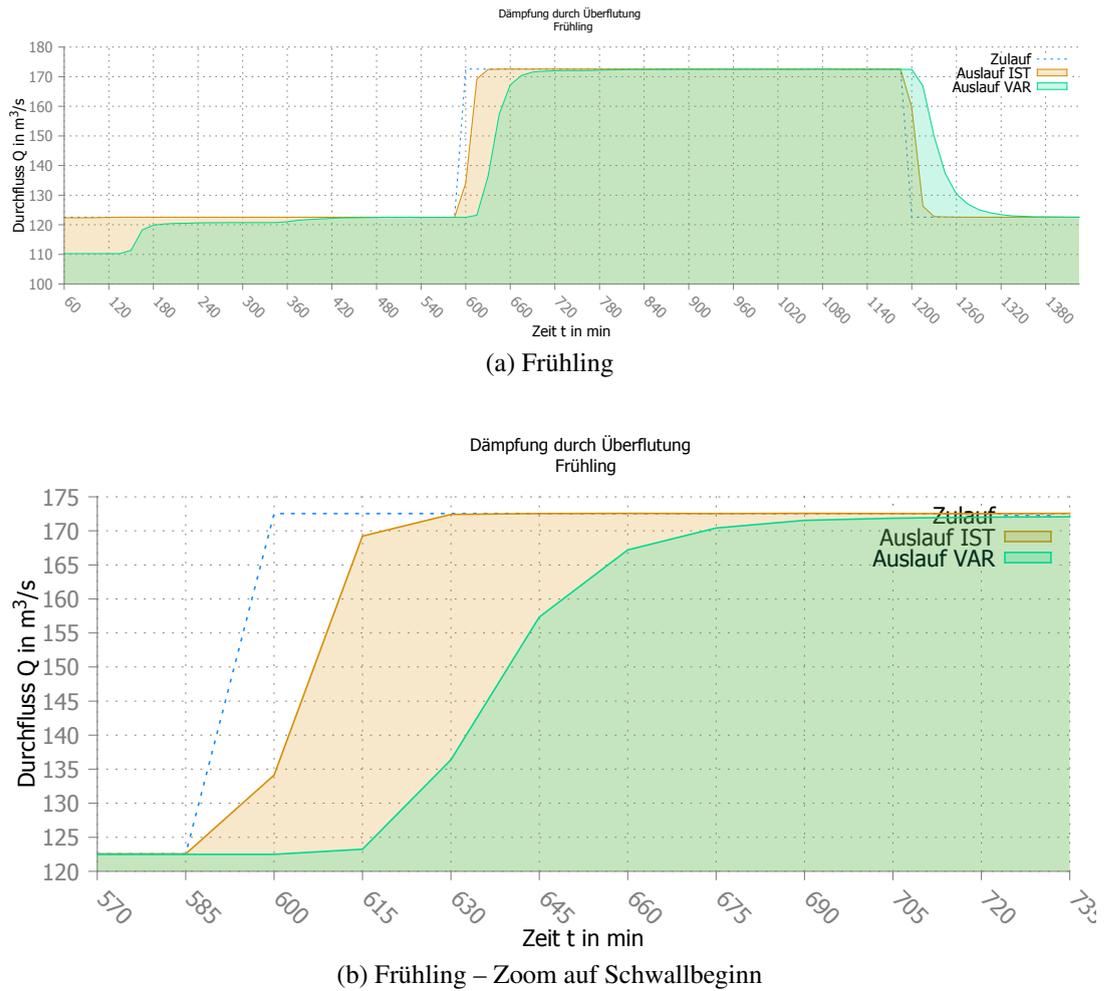


Abbildung 8.31: Vergleich der Q-t-Diagramme mit und ohne Überflutung der Au – Frühling

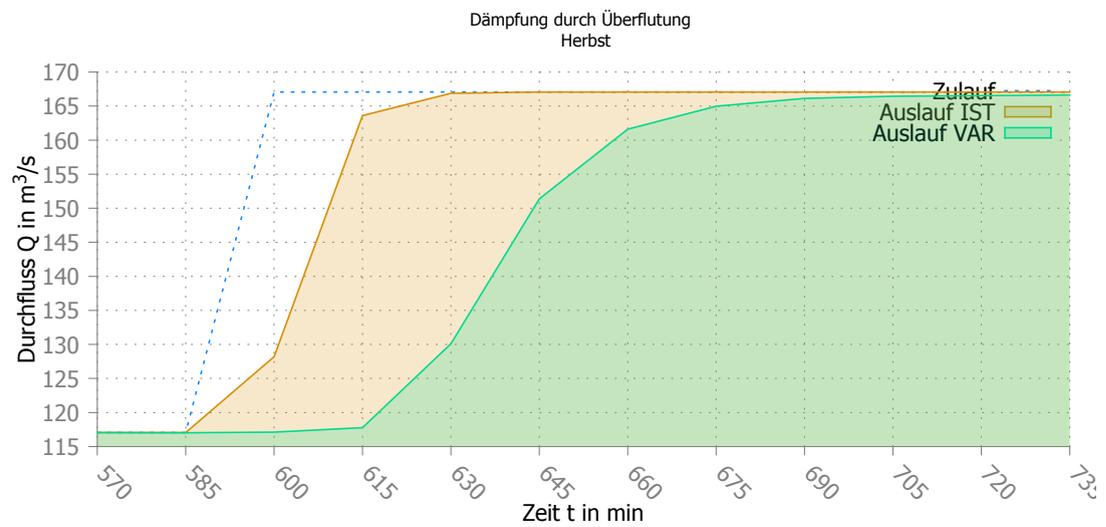
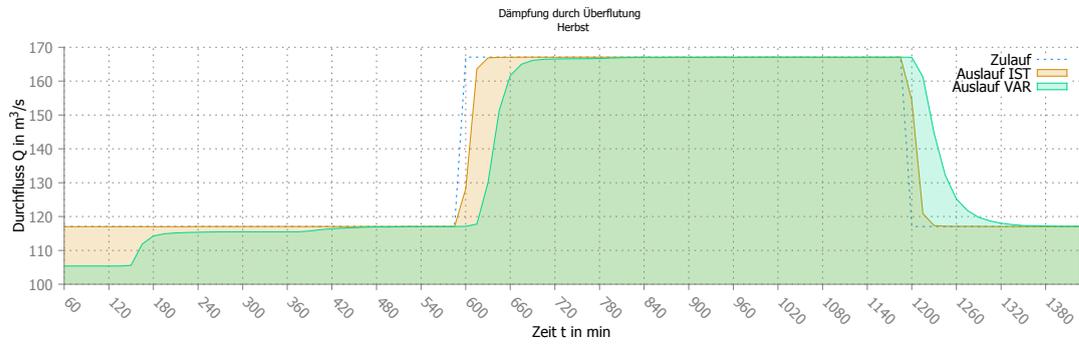


Abbildung 8.32: Vergleich der Q-t-Diagramme mit und ohne Überflutung der Au – Frühling