



# Orientierende Unterlagen zur Wasserbaubewilligung

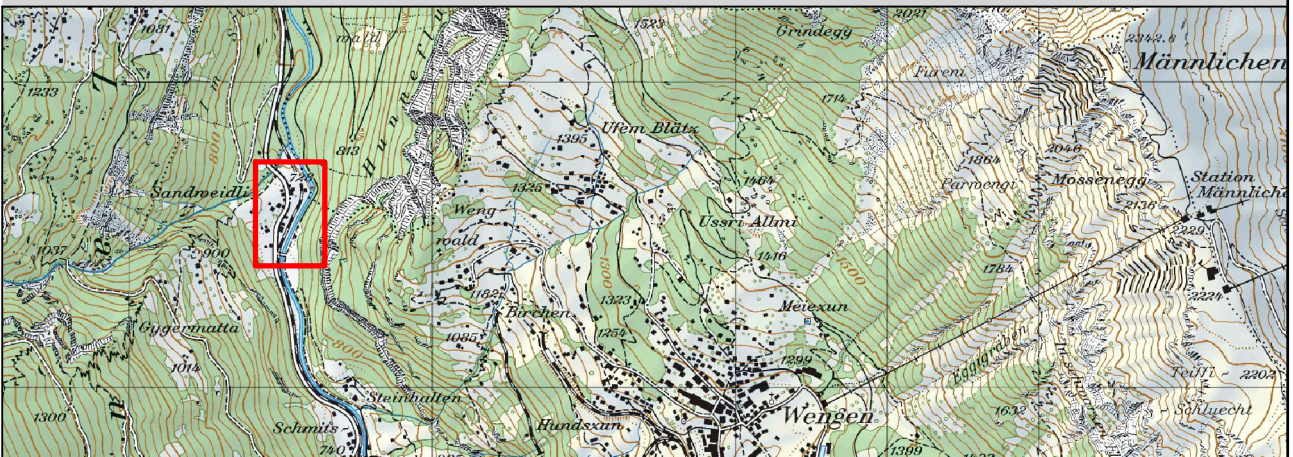
## Beilage 2.5

Gewässer	Weisse Lütshine	Gewässer-Nr.	502
Gemeinden	Lauterbrunnen	Projekt-Nr.	3184
Erfüllungspflichtiger	Schwellenkorporation Lauterbrunnen	Plan-Nr.	
Projekt vom	August 2018	Format	A4
Revidiert			

Unterlage

## Technischer Bericht Modellversuche

# Hochwasserschutz und Längsvernetzung Sperrre Sandweidli



Projektverfasser



Mätzener & Wyss  
Bauingenieure AG

Florastrasse 5 | 3800 Interlaken | 033 826 10 10 | mw-ing.ch



Flussbau AG SAH  
dipl. Ing. ETH/SIA flussbau.ch





# Technischer Bericht

## Modellversuche Serie A

### Stufen-Becken-Gerinne Sandweidli

Im Auftrag von  
Schwellenkorporation Lauterbrunnen  
3822 Lauterbrunnen

Projektverfasser  
ARGE Sandweidli  
Flussbau AG SAH, Bern  
Mätzener & Wyss AG, Interlaken

**KONTROLLBLATT**

Bauherrin	Schwellenkorporation Lauterbrunnen 3822 Lauterbrunnen	
Titel	Technischer Bericht Modellversuche Stufen-Becken-Gerinne Sandweidli	
Projekt	Stufen-Becken-Gerinne Sandweidli	
Projekt Nr.	3600304	
Dateiname	TechBericht_Sandweidli.docx	
Ablageort	\\hsr.ch\root\afe\ibu\projekte\Wasserbau\3600304 Sandweidli\06 Bericht\01_Technischer_Bericht\TechBericht_Modellversu- che_Sandweidli.docx	
System	Microsoft Word	
Verteiler extern	5	1 Schwellenkorporation Lauterbrunnen z.H. Ralf Schai Auf dem Rain 180 3822 Lauterbrunnen  1 Schwellenkorporation Gündlichwand z.H. Peter von Allmen Lüüwi 3815 Gündlichwand  1 Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern Renaturierungsfonds z.H. Willy Mueller Schwand 17 3110 Münsingen  1 Tiefbauamt des Kantons Bern OIK I z.H. Oliver Hitz Schlossberg 20 3601 Thun  1 Flussbau AG, Bern z.H. Thomas Berchtold Schwarztorstrasse 7 3007 Bern
Verteiler intern	4	1 Jürg Speerli 1 Sami Gysin 1 Projekt / Archiv 1 Reserve
Original	Datum	20.02.2017
	Verfasser	Sami Gysin, Projektingenieur
	Datum	07.07.2017
	Überprüft	Jürg Speerli, Projektleiter

## KONTAKT

Jürg Speerli

Prof. Dr. sc. techn. / dipl. Bauing. ETH / SIA

HSR Hochschule für Technik Rapperswil

IBU Institut für Bau und Umwelt

Oberseestrasse 10

8640 Rapperswil

Tel. +41 55 222 49 72

Mobile +41 79 328 39 30

E-Mail [jspeerli@hsr.ch](mailto:jspeerli@hsr.ch)

Sami Gysin

Bauingenieur BSc FHO

HSR Hochschule für Technik Rapperswil

IBU Institut für Bau und Umwelt

Oberseestrasse 10

8640 Rapperswil

Tel. +41 55 222 41 57

Mobile +41 79 701 06 16

E-Mail [sgysin@hsr.ch](mailto:sgysin@hsr.ch)

Jürg Speerli

Projektleiter

Sami Gysin

Projektingenieur

---

**INHALT**

<b>1</b>	<b>AUFTRAGSANALYSE UND SYSTEMGRENZEN.....</b>	<b>8</b>
1.1	AUFTRAGSANALYSE .....	8
1.2	PROJEKTPERIMETER MODELLVERSUCHE.....	9
1.3	SYSTEMGRENZEN .....	10
1.4	VORGEHEN .....	10
1.5	DOKUMENTATION .....	10
<b>2</b>	<b>GRUNDLAGEN.....</b>	<b>11</b>
2.1	SITUATION .....	11
2.2	NIEDERWASSER- UND HOCHWASSERABFLÜSSE.....	13
2.3	HOCHWASSER UND GESCHIEBEGANGLINIEN .....	13
2.3.1	Abflüsse bis HQ <sub>30</sub> .....	13
2.3.2	Abflüsse ab HQ <sub>100</sub> .....	15
2.4	KORNVERTEILUNG SOHLE.....	17
<b>3</b>	<b>HYDRAULISCHES MODELL.....</b>	<b>19</b>
3.1	MODELLMASSTAB .....	19
3.2	MODELLÄHNLICHKEITEN .....	19
3.3	MODELLPLAN.....	20
3.4	MESSEINRICHTUNGEN.....	21
3.5	MODELLBETRIEB .....	22
<b>4</b>	<b>VERSUCHSSERIE A – STUFEN-BECKEN-GERINNE .....</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>VERSUCHSAUFLISTUNG.....</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>VERSUCH A1_01.1.....</b>	<b>27</b>
6.1	TEILVERSUCH A1_01.1_HQ5S .....	27
6.2	TEILVERSUCH A1_01.1_HQ30S .....	29
6.3	TEILVERSUCH A1_01.1_HQ100S .....	30
6.4	FAZIT AUS DEM VERSUCH A1_01.1.....	31
<b>7</b>	<b>VERSUCH A1_02.1.....</b>	<b>32</b>
7.1	TEILVERSUCH A1_02.1_HQ5S .....	33
7.2	TEILVERSUCH A1_02.1_HQ30S .....	35
7.3	TEILVERSUCH A1_02.1_91M3SS .....	36
7.4	TEILVERSUCH A1_02.1_HQ100S .....	40

---

7.5	TEILVERSUCH A1_02.1_HQ100G .....	42
7.6	TEILVERSUCH A1_02.1_HQ300G .....	44
7.7	FAZIT AUS DEM VERSUCH A1_02.1 .....	46
<b>8</b>	<b>VERSUCH A1_03.1 .....</b>	<b>47</b>
8.1	TEILVERSUCH A1_03.1_HQ5S .....	48
8.2	TEILVERSUCH A1_03.1_HQ5G .....	50
8.3	TEILVERSUCH A1_03.1_HQ30S .....	51
8.4	FAZIT AUS DEM VERSUCH A1_03.1 .....	52
<b>9</b>	<b>VERSUCHSSERIE A2 .....</b>	<b>53</b>
9.1	STUFENAUFBAU .....	53
9.1.1	Variante 1 .....	54
9.1.2	Variante 2 .....	55
9.1.3	Variante 3 .....	56
9.1.4	Variante 4 .....	57
9.1.5	Variante 5 .....	58
9.1.6	Variante 6 .....	59
9.1.7	Variante 7 .....	60
<b>10</b>	<b>VERSUCH A2_01.1 .....</b>	<b>61</b>
10.1	FAZIT AUS DEM VERSUCH A2_01.1 .....	64
<b>11</b>	<b>VERSUCH A2_02.1 .....</b>	<b>65</b>
11.1	TEILVERSUCH A2_02.1_HQ5 .....	66
11.2	TEILVERSUCH A2_02.1_HQ30 .....	67
11.3	TEILVERSUCH A2_02.1_HQ100G .....	68
11.4	TEILVERSUCH A2_02.1_HQ300G .....	69
11.5	FAZIT AUS DEM VERSUCH A2_02.1 .....	70
<b>12</b>	<b>VERSUCH A2_03.1 .....</b>	<b>71</b>
12.1	TEILVERSUCH A2_03.1_HQ5 .....	73
12.2	TEILVERSUCH A2_03.1_HQ30 .....	75
12.3	TEILVERSUCH A2_03.1_HQ100G_1.VERSUCH .....	76
12.4	TEILVERSUCH A2_03.1_HQ100G_2.VERSUCH .....	77
12.5	TEILVERSUCH A2_03.1_HQ300G .....	78
12.6	FAZIT AUS DEM VERSUCH A2_03.1 .....	80
<b>13</b>	<b>VERSUCH A2_04.1 .....</b>	<b>81</b>
13.1	TEILVERSUCH A2_04.1_HQ5 .....	82
13.2	TEILVERSUCH A2_04.1_HQ30 .....	83

---

---

13.3	TEILVERSUCH A2_04.1_HQ100G .....	84
13.4	TEILVERSUCH A2_04.1_HQ300G .....	85
13.5	FAZIT AUS DEM VERSUCH A2_04.1 .....	87
<b>14</b>	<b>VERMESSUNG DES GERINNES WÄHREND HOCHWASSEREREIGNISSEN .....</b>	<b>88</b>
14.1	VERMESSUNG SOHLE UND WASSERSPIEGEL (ABFLUSSTIEFE).....	89
14.2	MESSUNG FLIESSGESCHWINDIGKEIT .....	91
14.3	FAZIT DER VERMESSUNG DES GERINNES BEI HOCHWASSEREREIGNISSEN.....	92
<b>15</b>	<b>VERSUCH A2_05.1.....</b>	<b>93</b>
15.1	TEILVERSUCH A2_04.1_HQ100G .....	95
15.2	TEILVERSUCH A2_04.1_HQ300G .....	98
15.3	FAZIT AUS DEM VERSUCH A2_05.1 .....	100
<b>16</b>	<b>MESSUNGEN ETHOHYDRAULIK.....</b>	<b>101</b>
16.1	WASSERSPIEGELDIFFERENZ BEIM DER STUFE.....	102
16.2	KOLKTIEFE UNTERHALB DER AUFSTIEGSLÜCKE .....	102
16.3	GESCHWINDIGKEIT IN ENGSTELLE.....	103
16.4	WASSERTIEFE IM TALWEG AN DER SEICHTESTEN STELLE.....	103
16.5	LÄNGE DER ENGSTELLE (STRECKE MIT ERHÖHTER GESCHWINDIGKEIT).....	104
16.6	WASSERTIEFE IN ENGSTELLE.....	104
16.7	FAZIT MESSUNGEN ETHOHYDRAULIK .....	105
<b>17</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN .....</b>	<b>106</b>
17.1	SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	106
17.2	EMPFEHLUNGEN.....	107

---



## ZUSAMMENFASSUNG

Die 7 m hohe, durch Hochwasser beschädigte, Betonsperre im Abschnitt Sandweidli ist das letzte Hindernis, welches die Fischwanderung in der Weissen Lütchine behindert. Um künftig die umliegenden Infrastrukturbauten zu schützen und die Fischdurchgängigkeit zu gewährleisten, wird ein Stufen-Becken-Gerinne angestrebt. Die natürlichen Stufen-Becken-Abfolgen im Bereich unterhalb des Projektperimeters haben sich als stabil erwiesen und sollen als Vorbild für das geplante Stufen-Becken-Gerinne dienen.

Die komplexen, durch die Stufen und die Linkskurve bedingte, Strömungsverhältnisse und die dadurch verursachte Belastung auf die Sohle sind nur schwer numerisch zu modellieren geschweige denn zu berechnen. Die Fachstelle Wasserbau des Instituts für Bau und Umwelt der HSR Hochschule für Technik Rapperswil erhielt den Auftrag, mittels hydraulischen Modellversuchen, die Machbarkeit eines künstlichen Stufen-Becken-Gerinnens zu ermitteln. Die Untersuchung der Sohlenstabilität und der ökologischen Längsvernetzung standen während den Versuchen im Vordergrund. Die Flussbau AG SAH begleitete die Modellversuche und lieferte wichtige Grundlagendaten. Die Modellversuche im Massstab 1:30 wurden in die Versuchsserie A1 und A2 unterteilt. Während der Versuchsserie A1 wurde eine natürliche Bildung der Stufen-Becken-Sequenzen untersucht. Die daraus gewonnenen Resultate dienen zu Dimensionierung der Abmessungen der künstlich gebauten Stufen in der Versuchsserie A2. Nach der ersten Dimensionierung erfolgte die Optimierung der Stufen. Der Materialaufwand und die damit verbundenen Baukosten wurden minimiert, wobei die Stabilität und die ökologische Längsvernetzung maximal hoch gehalten wurden.

Nach dem Rückbau der Betonsperre soll die Sohle mit 14 zweireihigen Blockstufen gesichert werden. Der Abstand der Stufen soll 14 m und die Höhendifferenz zwischen den einzelnen Stufen 0.84 m betragen. Somit kann das angestrebte mittlere Sohlengefälle von 6 % eingehalten werden. Während den Versuchen wurden sieben verschiedene Varianten für den Stufenaufbau untersucht. Variante 6 (siehe Kapitel „Versuchsserie A2“) wurde als optimal betrachtet, da der Verbau und somit der Aufwand minimiert werden konnte und die Sohlenstabilität trotzdem gewährleistet ist. Die Stufen sollen zusätzlich mit einer Aufstieglücke für die Fischwanderung versehen werden. Die Fischdurchgängigkeit kann damit gesteigert werden, ohne dabei die Stabilität massgebend zu reduzieren. In der Linkskurve (km 2.450) im Projektperimeter soll im Kurvenaussebereich ein zusätzlicher Erosionsschutz auf der Kurvenausseite eingebaut werden, um eine Rinnenbildung zu verhindern. Die Versuche haben aufgezeigt, dass trotz massivem Erosionsschutz einzelne Stufen beschädigt oder zerstört werden. Folglich kann sich in diesem Bereich die Sohle absenken und die Erosion kann sich kollapsartig in Richtung Oberwasser ausbreiten. Um dies zu verhindern, wird empfohlen jede zweite Stufe mit Beton zu sichern. Während der Versuchsserie A2 wurde die oberste Stufe in Mörtel versetzt. Aufgrund der geringeren Sohlenbreite bei der ersten Stufe wurde diese stärker belastet und mehrmals beschädigt. Es konnte gezeigt werden, dass der Beton nicht sichtbar ist und die Stabilität erhöht werden kann.

Die Fischdurchgängigkeit kann mit der Umsetzung des geplanten Stufen-Becken-Gerinnens deutlich verbessert werden. Zum Schluss wurden die Stufen und die Aufstieglücken bei den für die Fischwanderung relevanten Abflüssen vermessen (Ethohydraulik). Damit wurde eine möglichst gute Grundlage für die Beurteilung der Fischdurchgängigkeit durch externe Fischbiologen geschaffen.

# 1 AUFTRAGSANALYSE UND SYSTEMGRENZEN

## 1.1 Auftragsanalyse

Die 1933 errichtete 7 m hohe Betonsperre in der Weissen Lütschine zwischen Lauterbrunnen und Zweilütschine ist durch verschiedene Hochwasserereignisse beschädigt und baufällig geworden. Diese Sperre ist das letzte Hindernis, welches die Fischwanderung vom Brienersee bis nach Stechelberg beeinträchtigt oder gänzlich verhindert. Ein Kollaps der heutigen Sperre würde die Stabilität der Ufer gefährden, wodurch das Bahntrasse der Berner Oberland Bahn wie auch die Hauptstrasse stark gefährdet wären.

Diese Sperre muss daher dringend ersetzt werden, um einerseits die Stabilität der Flusssohle zu gewährleisten und um andererseits die Fischdurchgängigkeit zu ermöglichen.

Unterhalb der Sperre weist die Weisse Lütschine eine natürliche Stufen-Becken-Sohle auf. Das mittlere Sohlenlängsgefälle beträgt zwischen 4 bis 6 % und hat sich als stabil erwiesen. Die Sohlenbreite der Weissen Lütschine liegt im Abschnitt Sandweidli bei rund 12 m.

Aufgrund einer Variantenstudie für sohlenstabilisierende Massnahmen haben sich zwei Varianten herauskristallisiert: Ein Stufen-Becken-Gerinne sowie ein Stufen-Becken-Gerinne in Kombination mit einem Traversensystem. Beide Systeme werden als fischdurchgängig betrachtet.

Bei der Variante *Stufen-Becken-Gerinne* wird die natürliche Gerinnesohle im Unterwasser nach oben verlängert. Das vorhandene Sohlenmaterial wird bei der Serie A1 mit groben Blöcken angereichert und mit einer Überhöhung eingebaut, damit sich die natürliche Stufen-Becken-Struktur einstellen kann.

Bei der Variante *Stufen-Becken-Gerinne in Kombination mit einem Traversensystem* werden punktuell starre Traversenelemente in die Sohle eingebracht, um die Gesamtstabilität dieses Systems zu erhöhen. Diese Traversenelemente sind im Normalzustand mit Sohlenmaterial überdeckt und nicht sichtbar. Erst im Hochwasserfall kommen sie zum Tragen. Daher ist auch dieses System im Normalfall für Fische passierbar.

Da die heutige Sperre sich gerade oberhalb einer Flusskurve befindet, sind die hydraulischen Verhältnisse, bzw. Einwirkungen auf die Sohle und Böschung kaum rechnerisch genügend genau zu bestimmen. Daher soll zuerst die Variante *Stufen-Becken-Gerinne* in einer hydraulischen Modelluntersuchung auf ihre Machbarkeit untersucht werden. Falls nach dieser Untersuchung Zweifel an diesem System bestehen, soll auch die andere Variante *Stufen-Becken-Gerinne in Kombination mit einem Traversensystem* (Versuchsserie B) im hydraulischen Modellversuch untersucht werden.

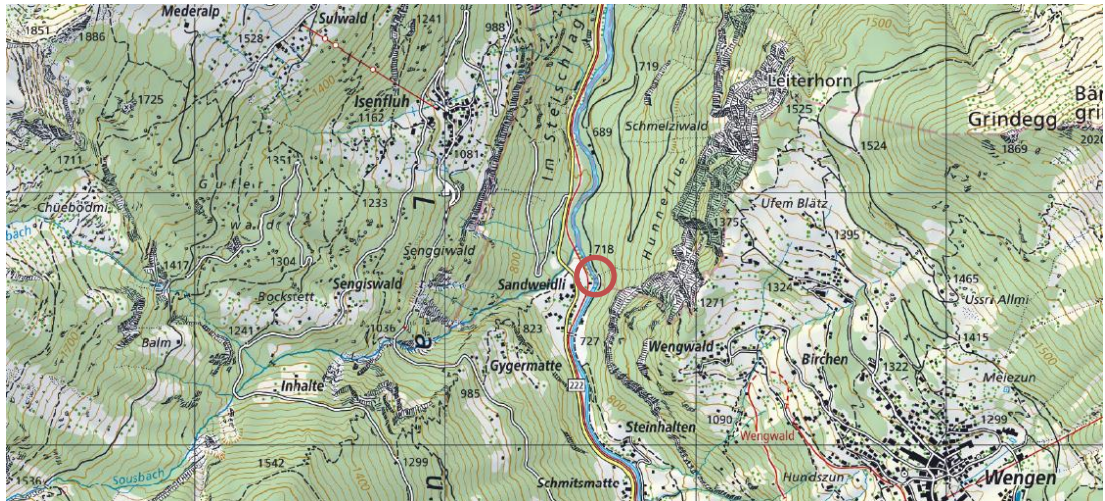


Abbildung 1: Übersicht über die Weisse Lüttschine im Abschnitt Sandweidli. Der Standort der heutigen Sperre ist rot markiert. (Quelle: map.geo.admin.ch)

## 1.2 Projektperimeter Modellversuche

Gemäss Pflichtenheft für die Modellversuche ist der Modellabschnitt für die Nachbildung der Stufen-Becken Sequenz im Sandweidli rund 460 m lang. Die Gerinnebreite beträgt in diesem Abschnitt rund 12 m. In der nachstehenden Abbildung 2 ist die Modellumrandung rot eingezeichnet und der geplante Bereich der Stufen-Becken Sequenz orange markiert. Die nachzubildende Zulaufstrecke zum Stufen-Becken-Gerinne ist gerade und genügend lang vorgesehen. Die Ablaufstrecke folgt nach der ausgeprägten Linkskurve. Sie ist lang genug auszubilden, damit die Effekte der aufgrund der Kurvensituation einstellenden Stosswellen noch im Modell untersucht werden können. Die vorgeschlagenen Längen werden als ausreichend betrachtet.

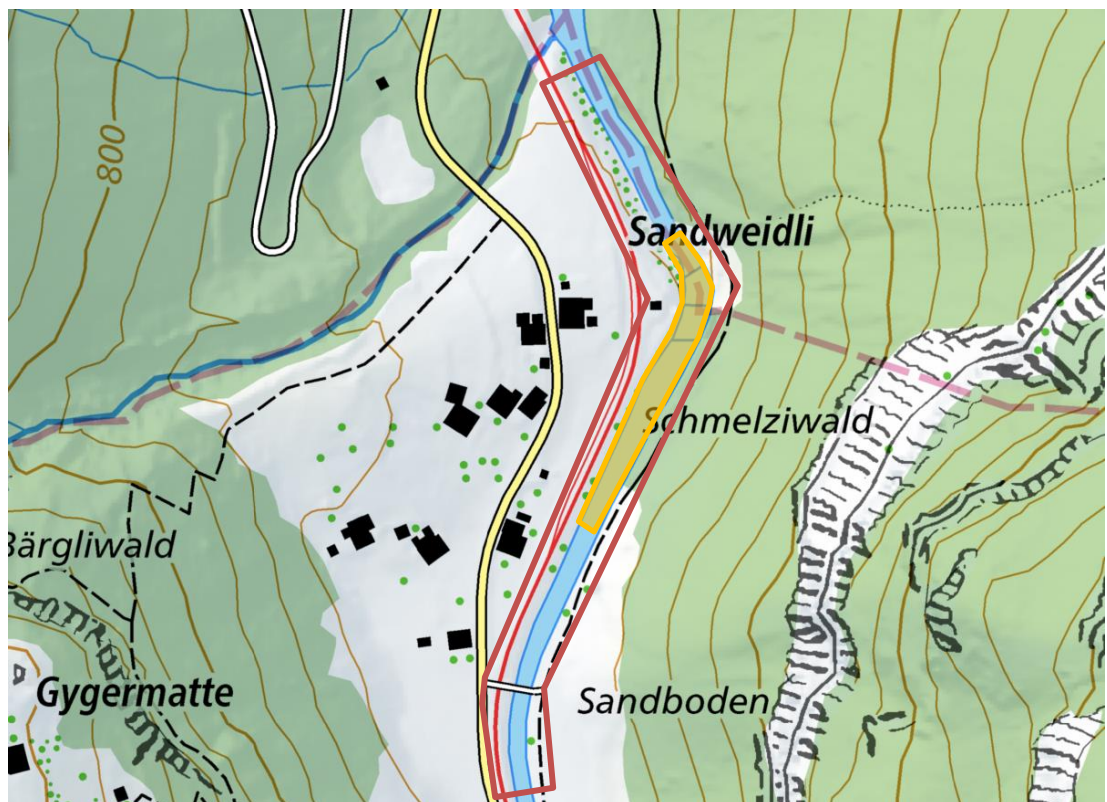


Abbildung 2: Übersicht Modellperimeter. Die Modellumrandung ist rot eingezeichnet, der Bereich der Stufen-Becken Sequenz gelb markiert. (Quelle: maps.geo.admin.ch)

### 1.3 Systemgrenzen

Der Modellmassstab wird bei dieser hydraulischen Modelluntersuchung durch den nachzubildenden Gerinneabschnitt sowie die Zielsetzung bestimmt. Es wurde ein Modellmassstab von 1:30 gewählt, um die vorgegebenen Ziele, respektive Fragen zu untersuchen, bzw. zu beantworten. Das Modell wird in Froud'scher Ähnlichkeit zur Natur aufgebaut.

In einem hydraulischen Modell können nur Körner grösser als 0.2 mm hydraulisch korrekt nachgebildet werden. Bei kleineren Körnern treten im Modell andere Sohlenstrukturen (Riffel und Dünen) auf als in Natur, wodurch die Reibungsverhältnisse im Modell und Natur nicht mehr übereinstimmen. Das heisst, dass bei einem Massstab von 1:30 nur Körner grösser als 6 mm Durchmesser korrekt nachgebildet werden können. Aufgrund der zu erwartenden Kornverteilung in der Weissen Lutschine und der Fragestellung hat dies keine negativen Effekte auf die Versuche.

Die Weisse Lutschine wird auf dem gesamten Modellabschnitt mit Ausnahme einer kleinen Übergangsstrecke beim Modellanfang mit einer beweglichen Sohle ausgeführt. Die Böschungen werden jedoch fest nachgebildet, d.h. der Blocksatz wird im Modell mit einzelnen Blöcken massstäblich korrekt nachgebildet, jedoch werden die Blöcke in einem Mörtelbett fest eingebracht.

### 1.4 Vorgehen

Die Abflüsse bis zum  $HQ_{30}$  sollen hauptsächlich für die Bildung der Stufen-Becken-Sequenzen verwendet werden. Während den stationären Abflüssen ohne Geschiebezufuhr sollen sich so bei der Serie A1 die Stufe-Becken-Strukturen bilden. Bei der Versuchsserie A2 sollen in dieser Phase die Feianteile aus den Beckenbereichen gespült werden und sich so die gewünschten Becken bilden.

Um anschliessend die Stabilität der gebildeten Stufen-Becken-Strukturen zu überprüfen, sollen diese mit  $HQ_{100}$ -,  $HQ_{300}$ - und  $HQ_{300}$ -Überlastfall-Ganglinien belastet werden. Die geschiebeführenden Ganglinien sollen die Grenzen der Belastbarkeit aufzeigen.

### 1.5 Dokumentation

Die Grundlagen, das hydraulische Modell, die Versuchsserien A1 und A2, die Vermessung des Gerinnes während Hochwasserereignissen und für die Ethohydraulik, Schlussfolgerungen sowie Empfehlungen werden in diesem Bericht beschrieben. Detaillierte Informationen über den Modellbau, Messprotokolle und Auswertungen von Laserscan-Daten oder der Orthophotos sind den Anhängen A und B zu entnehmen. Die erwähnten Dokumente, Messprotokolle sowie Foto- und Videodokumentationen sind alle digital auf dem USB-Stick zu finden, der diesem Bericht beiliegt.

## 2 GRUNDLAGEN

### 2.1 Situation

Die Weisse Lüttschine beginnt auf 1'200 m ü.M. in der Trachsellauenen. Anschliessend fliesst sie ins Lauterbrunnental bis sie sich nach rund 13.1 km in Zweilütschinen mit der Schwarzen Lüttschine vereinigt. Als Vereinigte Lüttschine fliesst das Wasser weiter in den Brienersee.

Im landwirtschaftlich genutzten Talboden des Lauterbrunnentals wurde die Weisse Lüttschine teilweise stark kanalisiert und mit Dämmen verbaut, in den Steilstrecken hat sie weitgehend ihren natürlichen Lauf. Mehrere Seitenbäche und Wasserfälle speisen sie mit Wasser.

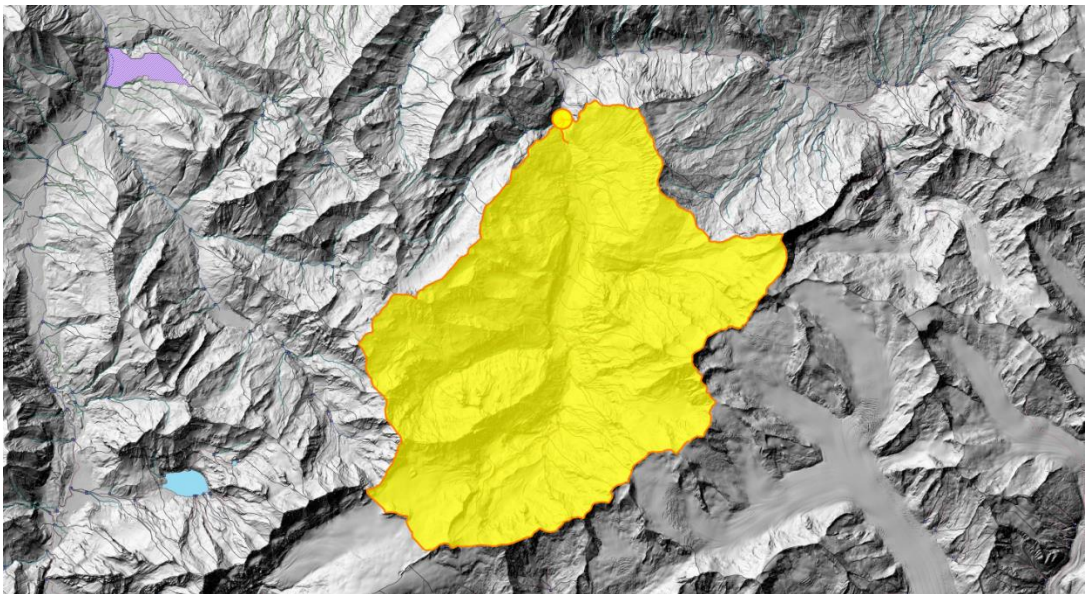


Abbildung 3: Einzugsgebiet der Weissen Lüttschine bis zum Projektperimeter. (Quelle: [maps.geo.admin.ch](http://maps.geo.admin.ch))



Abbildung 4: Blick in Fließrichtung auf bestehendes Gerinne oberhalb der Sperr.



*Abbildung 5: Blick gegen Fließrichtung auf die zu ersetzende Sperre mit Gegensperre und Fischtreppe im Vordergrund.*



*Abbildung 6: Blick über die Sperre in Fließrichtung mit Blick auf das bestehende Stufen-Becken-Gerinne.*

## 2.2 Niederwasser- und Hochwasserabflüsse

Die Spitzenabflüsse sowie auch die Ganglinien für die Weisse Lutschine im Bereich Sandweidli wurden durch die Flussbau AG SAH definiert.

Die massgebenden Abflüsse sind wie folgt gegeben:

Abfluss Q [m <sup>3</sup> /s]	Beschrieb
6.7	Niederwasser (Q <sub>m</sub> )
64.0	HQ <sub>5</sub>
85.0	HQ <sub>30</sub>
98.0	HQ <sub>100</sub>
115.0	HQ <sub>300</sub>
128.0	EHQ

Tabelle 1: Niederwasser- Hochwasserabflüsse.

## 2.3 Hochwasser und Geschiebeganglinien

### 2.3.1 Abflüsse bis HQ<sub>30</sub>

Bei der Versuchsserie A1 werden bis rund 45 h lange stationäre Versuche durchgeführt, damit sich die Stufen-Becken-Strukturen und die Deckschicht auf natürliche Weise bilden. Der Abfluss soll bis zum zu überprüfenden Hochwasserabfluss hochgefahren, rund 6.0 h gehalten und anschliessend wieder runter gefahren werden. Nach dem die entstandenen Strukturen aufgenommen wurden, soll der Abfluss wieder bis zum selben Wert hochgefahren und rund 30 h gehalten werden. So soll überprüft werden, wie sich die Sohle nach einer kurzen Belastung mit einem gewissen Abfluss verändert und was sich anschliessend bei länger andauernden Belastungen verändert.

Bei der Versuchsserie A2 ist diese lang andauernde Belastung nicht nötig, da die Stufen künstlich eingebaut wurden und sich nur noch die Beckenbereiche nach den Stufen selber bilden sollen.

Im Vergleich zu der Versuchsserie A1 wird der Abfluss bei der Versuchsserie A2 langsamer hochgefahren, dafür weniger lange gehalten. Diagramm 1 zeigt wie der Abfluss in Intervallen von rund 0.9 h um je 5.0 m<sup>3</sup>/s bis zum HQ<sub>5</sub> (64.0 m<sup>3</sup>/s) gesteigert wird. Bevor der Abfluss wieder runtergefahren wird, wird er beim HQ<sub>5</sub> für 2.8 h gehalten.

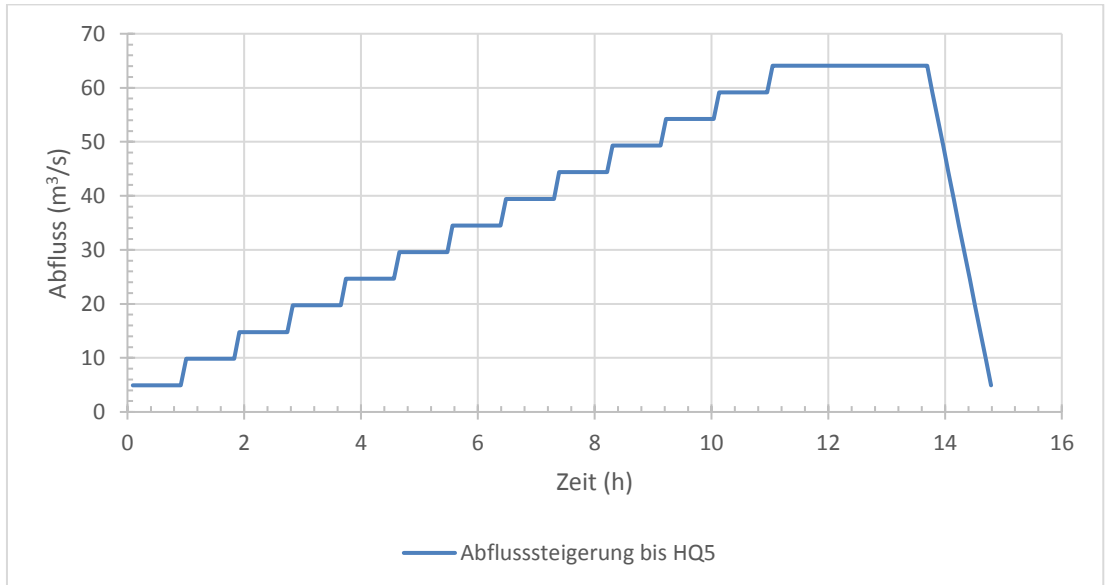


Diagramm 1: Ganglinie Abflusssteigerung bis HQ<sub>5</sub> (Versuchsserie A2).

Auf Diagramm 2 ist zu sehen wie der Abfluss nach dem HQ<sub>5</sub> in einem Intervall von 2.8 h um (5.0 m<sup>3</sup>/s) weiter bis zum HQ<sub>30</sub> (85.0 m<sup>3</sup>/s) hochgefahren und anschliessend für 2.8 h gehalten wird.

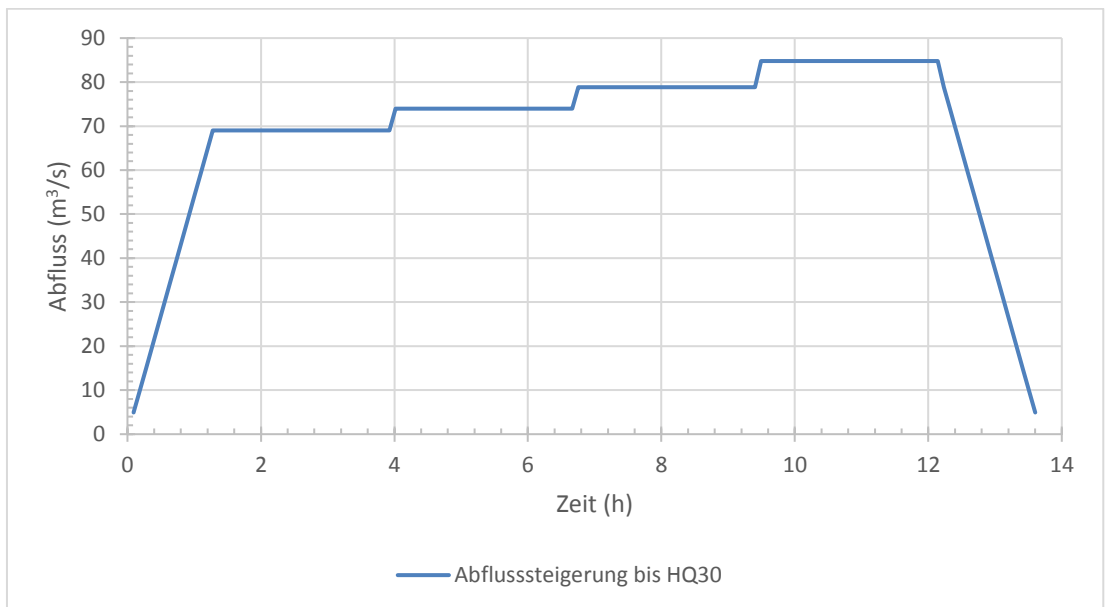


Diagramm 2: Ganglinie Abflusssteigerung bis HQ<sub>30</sub> (Versuchsserie A2).



### 2.3.2 Abflüsse ab HQ<sub>100</sub>

#### Grundlagen

Wie bereits erwähnt, soll die Sohle im Anschluss an die stationären Abflüsse ohne Geschiebezufuhr mit geschiebeführenden Ganglinien belastet werden.

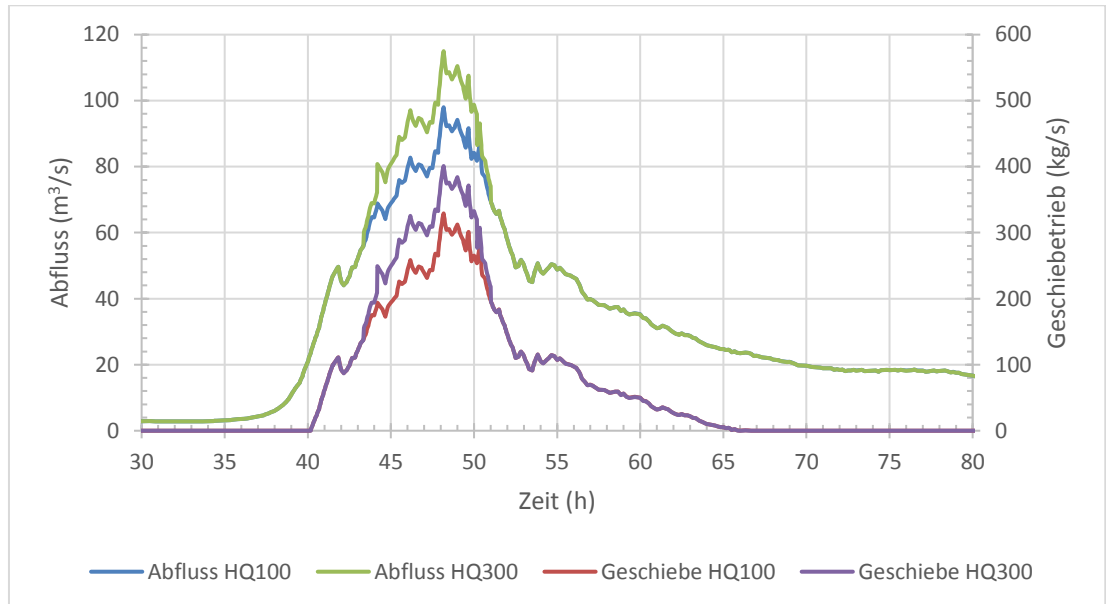


Diagramm 3: SAH Ganglinien HQ<sub>100</sub> und HQ<sub>300</sub> (Quelle: Grundlagen von der Flussbau AG).

Die im Diagramm 3 ersichtlichen Ganglinien des HQ<sub>100</sub> und HQ<sub>300</sub> mit den dazu gehörigen Geschiebeganglinien wurden durch die Flussbau AG SAH zur Verfügung gestellt. Die ursprünglichen Ganglinien wurden für die Versuche im Labor in Form von Dreiecksganglinien vereinfacht.

#### Modellganglinien

Diagramm 4 zeigt die vereinfachte HQ<sub>100</sub>-Ganglinie. Für das Geschiebe gibt es zwei Ganglinien. Die rote beschreibt den maximalen und die grüne einen minimierten Geschiebeeintrag aus dem Oberwasser.

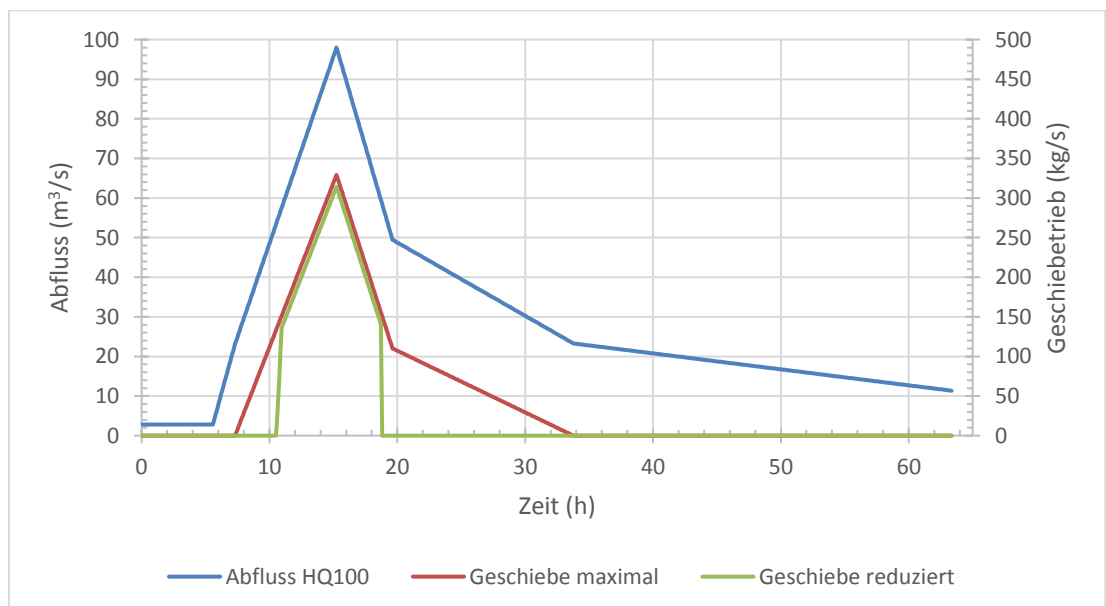


Diagramm 4: HQ<sub>100</sub> Ganglinie Abfluss und Geschiebe (maximal und reduziert).

Die HQ<sub>300</sub>-Ganglinie wie sie im Diagramm 5 dargestellt ist, wird hauptsächlich bei der Versuchsserie A1 für die Belastung der natürlich gebildeten Stufen verwendet.

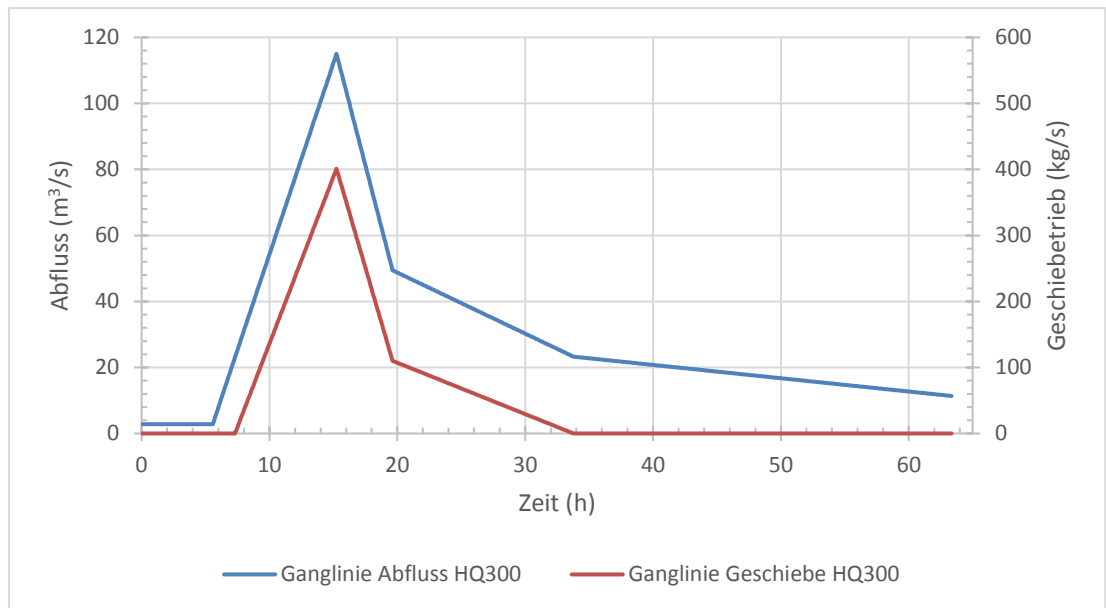


Diagramm 5: HQ<sub>300</sub> Ganglinie Abfluss und Geschiebe.

Der Überlastfall ist wie folgt definiert: Der Aufsteigende Ast entspricht der HQ<sub>300</sub> Ganglinie. Die Ganglinie fährt mit dem reduzierten Geschiebetrieb hoch bis zum HQ<sub>300</sub>. Beim absteigenden Ast wird der Abfluss, sobald das HQ<sub>100</sub> erreicht wird, gehalten. Das Geschiebe wird anschliessend in einem Intervall von rund 1.0 h um je 20 % zurück gefahren. Dies soll ein Szenario simulieren, bei dem kein Geschiebe vom Oberwasser in den Projektperimeter eingetragen wird. Folglich wird das Geschiebe im Bereich nach den Stufen immer weiter ausgeschwemmt und die Stufen dadurch destabilisiert.

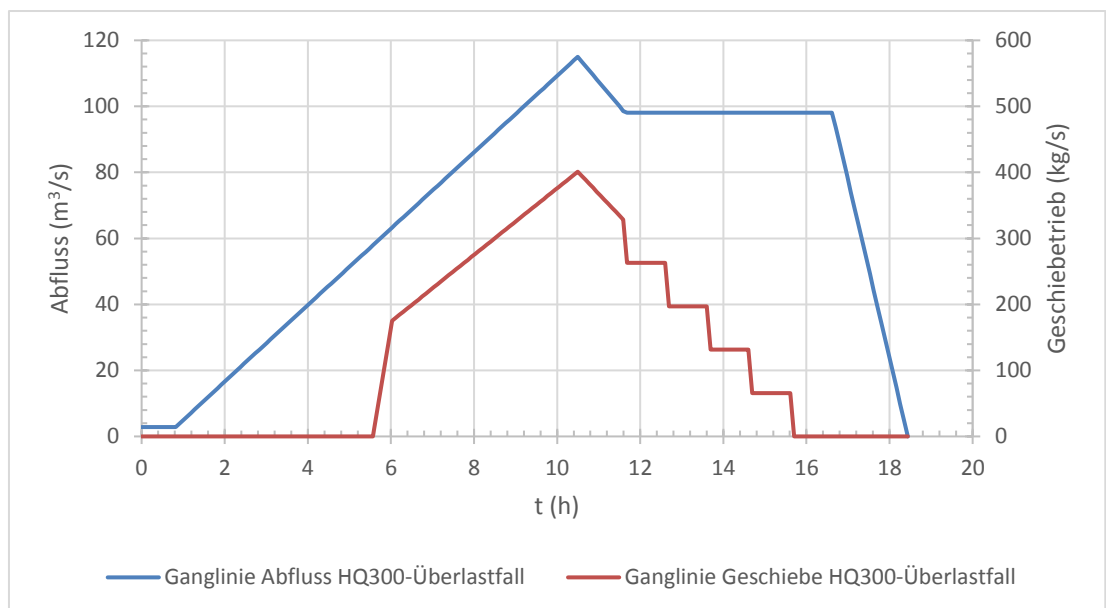


Diagramm 6: HQ<sub>300</sub>-Überlastfall Ganglinie Abfluss und Geschiebe.

Der Überlastfall wird für die Überprüfung der Stufen in der Versuchsserie A2 verwendet.

## 2.4 Kornverteilung Sohle

Die Kornverteilung der Sohle wurde durch die Flussbau AG SAH vorgegeben. Die Kornverteilung im Projektperimeter setzt sich aus zwei verschiedenen Mischungen zusammen. Das anstehende Geschiebe im Zulauf aus dem Oberwasser wird mit der Grundmischung simuliert. Die Ergänzungsmischung stellt die Blöcke dar, die im Projektperimeter die Stufen-Becken-Abfolge bilden sollen. Im Projektperimeter wird die Grundmischung mit der Ergänzungsmischung angereichert. Das angereicherte Geschiebe besteht aus 60 % Grundmischung und 40 % Ergänzungsmischung. Die Grundmischung wird aus mehreren Quarzsandfraktionen und die Ergänzungsmischung wird mit Blöcken ergänzt. Zur Visualisierung wurden die Blöcke eingefärbt.

In einem hydraulischen Modell können nur Körner grösser als 0.2 mm hydraulisch korrekt nachgebildet werden. Bei kleineren Körnern treten im Modell andere Sohlenstrukturen (Riffel und Dünen) auf als in Natur, wodurch die Reibungsverhältnisse im Modell und Natur nicht mehr übereinstimmen. Im Weiteren gehen noch kleinere Körner in Schwebelagerung über. Das heisst, dass bei einem Massstab von 1:30 nur Körner grösser als 6 mm Durchmesser korrekt nachgebildet werden können.

### Grundmischung

Die Kornverteilung der Grundmischung wurde so vereinfacht, dass sie mit der im Labor vorhandenen Quarzsandfraktionen nachgebildet werden kann. In Diagramm 7 ist ersichtlich wie die Grundmischung im Labor (rot) der Kornverteilung in der Natur (blau) angepasst wurde.

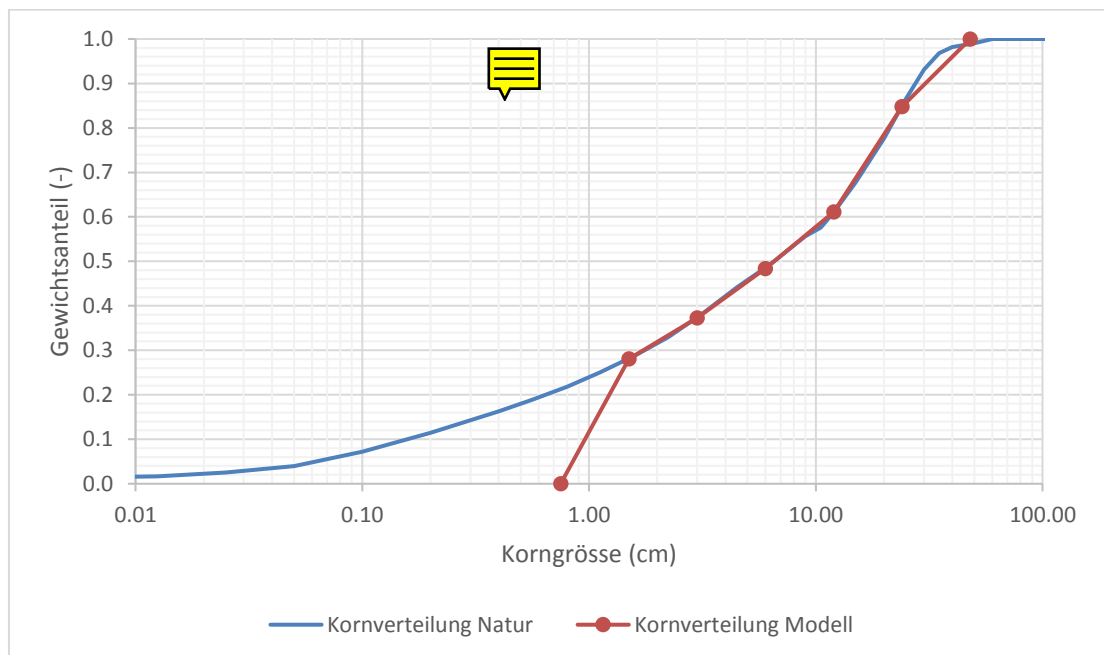


Diagramm 7: Kornverteilung Grundmischung.

## Ergänzungsmischung

Die Ergänzungsmischung konnte nicht mit den Quarzsandfraktionen nachgebildet werden, da die Blöcke schlicht zu gross waren. Eine Aussiebung mit der vorhandenen Infrastruktur war nicht möglich, deshalb wurde entschieden die Blöcke nicht nach Durchmesser zu sortieren, sondern nach ihrem Gewicht.

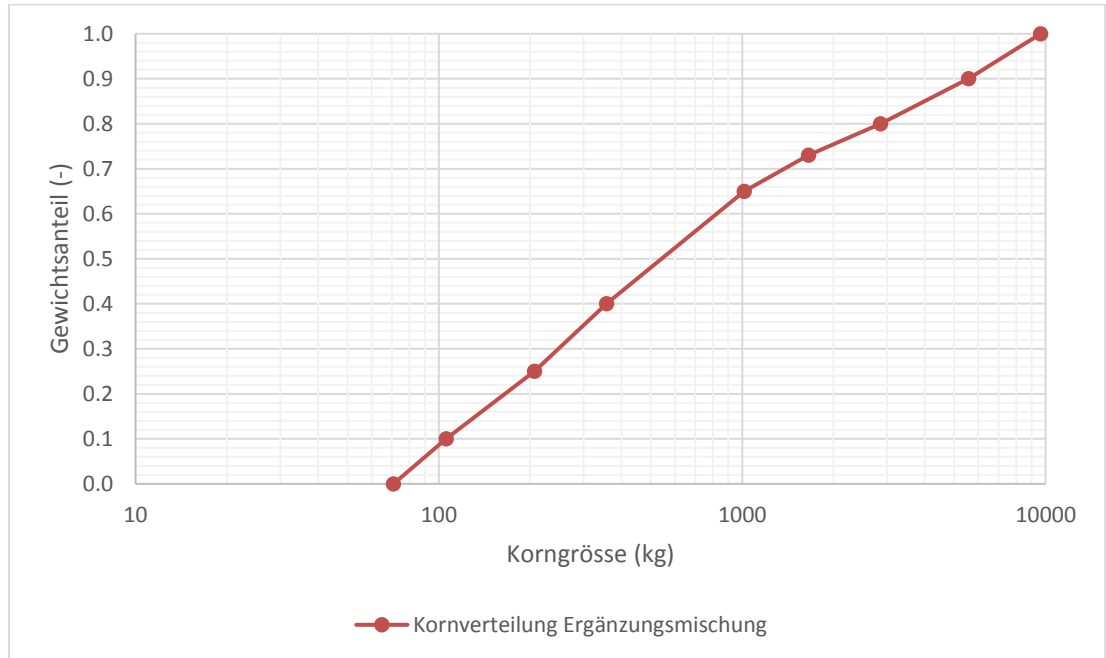


Diagramm 8: Kornverteilung Ergänzungsmischung.

Die Blockmischung wurde mit eingefärbten Steinen nachgebildet. Da die Blöcke zu gross sind um sie auszusieben, können sie so nach den Versuchen wieder einfach in die verschiedenen Fraktionen unterteilt werden. Zusätzlich kann während den Versuchen ohne grossen Messaufwand bestimmt werden, welche Fraktion sich wie verhält. Die Steine wurden folgendermassen eingefärbt:

Kornfraktion $D_{65}$ [m]	Gewicht [kg]	Farbe
0.35 – 0.50	71 – 207	hellblau
0.50 – 0.60	207 – 357	pink
0.60 – 0.85	357 – 1015	grün
0.85 – 1.00	1015 – 1653	weiss
1.00 – 1.20	1653 – 2856	rot
1.20 – 1.50	2856 – 5577	gelb
1.50 – 1.80	5577 - 9638	blau

Tabelle 2: Farbliche Unterteilung der Blockmischung.

### 3 HYDRAULISCHES MODELL

#### 3.1 Modellmassstab

Aufgrund des Pflichtenhefts von 4. Januar 2016 und den vorhandenen Platzverhältnissen im Labor wurde der Modellmassstab auf 1:30 festgelegt. Der nachzubildende Modellausschnitt erstreckt sich in Natur über eine Länge von 460 m und über eine maximale Breite von 60 m. Das Gerinne überwindet im Projektperimeter eine Höhe von rund 19 m.

#### 3.2 Modellähnlichkeiten

Das Froude'sche Ähnlichkeitsgesetz beruht darauf, dass das Verhältnis zwischen Trägheits- und Schwerkraft im Modell gleich gross ist wie in der Natur. Die Froude-Zahl stellt das Verhältnis zwischen Trägheits- und Schwerkraft dar.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}}$$

$Fr$  = Froude-Zahl

$g$  = Erdbeschleunigungskonstante (9.81 m/s<sup>2</sup>)

$v$  = charakteristische Geschwindigkeit, hier die Fliessgeschwindigkeit

$h$  = charakteristische Länge, hier die Abflusstiefe

Für die Umrechnung der verschiedenen physikalischen Grössen wird vom Längenverhältnis des Modells ausgegangen. Beim hydraulischen Modell des Stufen-Becken-Gerinnes Sandweidli betrug der Modellmassstab 1:30 ( $\lambda = 30$ ). Mit dem Ähnlichkeitsgesetz nach Froude können die übrigen physikalischen Grössen in Modell- und Naturwerte umgerechnet werden.

Physikalische Grösse	Umrechnungsformel	Faktor
Länge [m]	$L_N / L_M = \lambda$	30
Zeit [s]	$t_N / t_M = \lambda^{1/2}$	5.5
Geschwindigkeit [m/s]	$v_N / v_M = \lambda^{1/2}$	5.5
Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	$Q_N / Q_M = \lambda^{5/2}$	4'929
Transportrate [kg/s]	$G_N / G_M = \lambda^{5/2}$	4'929
Masse [kg]	$M_N / M_M = \lambda^3$	27'000

Tabelle 3: Umrechnungsfaktoren nach Froude für verschiedene physikalische Grössen.

### 3.3 Modellplan

Eine detaillierte Fotodokumentation des Modellbaus sowie vom fertigen Modell sind im Anhang zu finden.

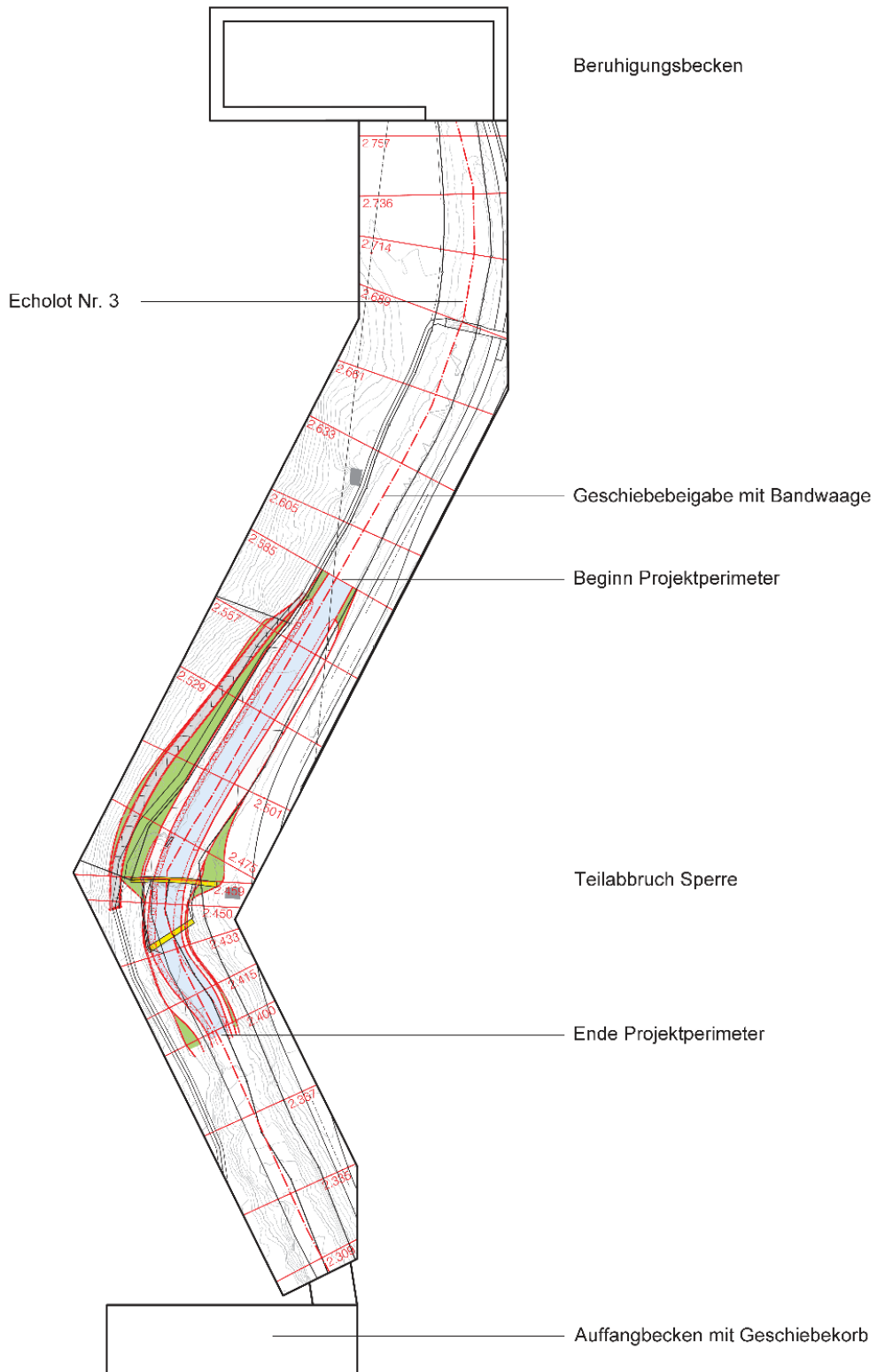


Abbildung 7: Modellplan.

## 3.4 Messeinrichtungen

### Abfluss

Mit einem in der Zufuhrleitung installierten magnetisch-induktiven Durchflussmesser (IDM) wird die ins Modell fließende Wassermenge gemessen.

### Wasserspiegellage

In der Zulaufstrecke oberhalb des Projektperimeters ist ein Echolot als Distanzsensor montiert. Es erfasst die zeitabhängige Wasserspiegellage im Gerinne in kurzen Zeitabständen (1 s).

### Geschiebeaustrag

Beim Auslauf wird das ausgetragene Geschiebe mit Hilfe eines Geschiebekorbes aufgefangen. Das Gewicht des Geschiebekorbes wird mit einer IND560x Wägezelle der Firma Mettler Toledo gemessen. Zusätzlich wird der Geschiebeaustrag nach den Versuchen im Ofen getrocknet und ein weiteres Mal gewogen.

### Datenerfassung

Eine Datenerfassungsbox registriert die Signale des IDM, der Echolote und der Wägezelle. Mittels der Software LabView werden die Signale aufgezeichnet sowie in physikalische Größen umgerechnet. Alle Werte werden im Sekundentakt aufgezeichnet.

### Fliessgeschwindigkeit

Für die Ermittlung der Fliessgeschwindigkeit im Gerinne wurde ein Micro-Messflügel der Firma Schiltknecht verwendet. Dieser ermöglicht eine punktuelle Messung der Fliessgeschwindigkeit.

### Optische Betrachtung

Die optische Betrachtung der Modellversuche spielt eine grosse Rolle für die Auswertung und die Rückverfolgung der Versuche. Hierzu werden die Versuche mit Film- und Fotoaufnahmen dokumentiert (Filmauswahl befindet sich auf beiliegendem USB-Stick). Zusätzlich wird mit Hilfe einer Software nach den einzelnen Teilversuchen jeweils ein Orthophoto der Sohle erstellt. Somit können Veränderungen in der Sohle optisch erkannt werden. Orthophotos der jeweiligen Versuche sind im Anhang B zu finden.

### 3D-Scan

Mit dem Laser-Scanner Faro Focus 3D wird die Sohle vor und nach den einzelnen Teilversuchen gescannt. Mittels eingemessenen Fixpunkten werden die Scans anschliessend ins lokale Koordinatennetz eingepasst und eine Punktwolke wird erstellt. Zum einen können mit der Software CloudCompare verschiedene Punktwolken mit einander verglichen werden. Zum anderen kann aus der Punktwolke ein digitales Geländemodell erstellt werden. Mit dem CAD-Programm werden daraus anschliessend Quer- und Längsprofile generiert. Beide Methoden visualisieren die Veränderungen in der Sohlenlage. So können gebildete Strukturen einfach erkannt werden. Die Vergleiche der Sohlenlagen, Quer- sowie Längsprofile der Versuche sind im Anhang B zu finden.

### 3.5 Modellbetrieb

#### Wasserzufuhr

Die Wasserzufuhr zum Modell erfolgt über eine Pumpe, welche das Wasser in ein Beruhigungsbecken beim Modellanfang fördert. Aus diesem strömt das Wasser ins Modell. Am Ende des Modells gelangt das Wasser in ein Auffangbecken und von dort zurück in den Kreislauf.

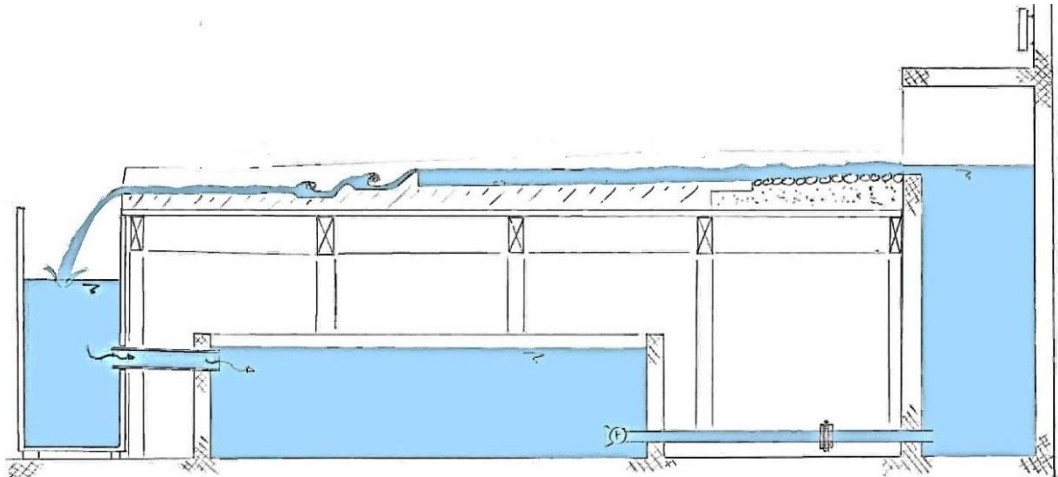


Abbildung 8: Schematischer Wasserkreislauf.

#### Geschiebezufuhr

Die Beigabe des Geschiebes erfolgt über eine Bandwaage, die die vorgegebene Menge Geschiebe in das Gerinne fördert. Über einen Trichter kann die Bandwaage mit Geschiebe beliefert werden.



Abbildung 9: Bandwaage von K-Tron mit einer Leistung bis zu 45 kg/min.

#### Steuerung

Die Wasser- sowie die Geschiebezufuhr können mittels Computer gesteuert werden. Es können stationäre Abflüsse sowie auch Ganglinien können programmiert und autonom gefahren werden.



## 4 VERSUCHSSERIE A – STUFEN-BECKEN-GERINNE

### Ziele der Serie A

Während der Versuchsserie A soll sich auf natürliche Weise für das angestrebte Gefälle, ausgehend von der eingebauten Geschiebemischung, ein stabiles Stufen-Becken-Gerinne bilden. Das Grenzgefälle für verschiedene spezifische Belastungen künstlich eingebauter Stufen-Becken-Abfolgen ist zu ermitteln und die prinzipielle Machbarkeit einer stabilen Sohle bei Neigungen bis 6 % ist nachzuweisen.

### Versuchsablauf

In einem ersten Schritt soll sich ein natürliches Stufen-Becken-Gerinne bilden. Dafür wird die Ausgangssohle mit gut durchmischem Material überhöht eingebaut. Konstante Abflüsse ohne Geschiebebeschickung, in Schritten von  $HQ_5$  bis  $HQ_{30}$  erhöht, sollen im Gerinne durch Rückwärtserosion (Parallelabsenkung) und nicht Rotationserosion eine Stufen-Becken-Abfolge bilden. Das ausgebildete Stufen-Becken-Gerinne soll mit Abflüssen von  $HQ_{100}$ ,  $HQ_{300}$  und dem Überlastfall (inkl. Geschiebebeschickung) einem Belastungstest unterzogen werden.

In einem zweiten Schritt sollen die Stufen-Becken künstlich nachgebildet werden. Bis zur Ausgangssohle wird das Gerinne mit der Grundmischung verfüllt. Anschliessend werden die Stufen künstlich nachgebildet, an der Sohlenoberfläche mit Mischung angereichert, die sich als optimal erwiesen hat, und überhöht eingebaut. Anschliessend wird das Gerinne wieder mit den gleichen Abflüssen belastet.

### Entscheid nach der Versuchsserie A

Nach der Versuchsserie A soll entschieden werden, ob sich ein Stufen-Becken-Gerinne durch selbststabilisierende Prozesse gebildet werden kann oder ob die Stufen-Becken-Strukturen vorgängig künstlich eingebaut werden müssen. Die Form, Bauart und die nötige Blockgrösse der künstlich nachgebildeten Stufen sollen bestimmt werden. Falls die Resultate von Versuchsserie A nicht ausreichen, um eine umsetzbare Massnahme zu projektieren, soll mit der Versuchsserie B weitergefahren werden.

## 5 VERSUCHSAUFLISTUNG

Die durchgeführten Versuche wurden nach folgendem Schema nummeriert:

X\_YY.Y\_ZZZ

- X: Versuchsreihe
- YY.Y: Versuchsnummer
- ZZZ: Teilversuche (Abfluss, Ganglinie, stationär)

Versuchsnr.	Beschreibung
A1_01.1	<p><b>Sohleneinbau:</b></p> <p>Sohle im Projektperimeter bis 2.4 m unterhalb projektiertes Sohle mit Grundmischung aufgefüllt. Anschliessend Einbau Blockmischung (Überhöhung = 2.1 m, Stärke = 4.5 m). Überhöhung ober- und unterhalb auf ca. 0.5 m auf bestehende Sohle auslaufend.</p> <p><b>Untersuchte Abflüsse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• HQ<sub>5</sub> stationär (64.0 m<sup>3</sup>/s ohne Geschiebe, 4.8 h)</li> <li>• HQ<sub>30</sub> stationär (85.0 m<sup>3</sup>/s ohne Geschiebe, 5.0 h)</li> <li>• HQ<sub>100</sub> stationär (98.0 m<sup>3</sup>/s ohne Geschiebe, 5.0 h)</li> </ul>
A1_02.1	<p><b>Sohleneinbau:</b></p> <p>Sohle im Projektperimeter bis 2.4 m unterhalb projektiertes Sohle mit Grundmischung aufgefüllt. Anschliessend Einbau Blockmischung (Überhöhung = 0.9 m, Stärke = 3.3 m). Überhöhung unterhalb auf ca. 0.5 m auf bestehende Sohle und oberhalb horizontal auslaufend.</p> <p><b>Untersuchte Abflüsse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• HQ<sub>5</sub> stationär (64.0 m<sup>3</sup>/s ohne Geschiebe, 32.0 h)</li> <li>• HQ<sub>30</sub> stationär (85.0 m<sup>3</sup>/s ohne Geschiebe, 35.7 h)</li> <li>• 91 m<sup>3</sup>/s stationär (ohne Geschiebe, 41.5 h)</li> <li>• HQ<sub>100</sub> stationär (98.0 m<sup>3</sup>/s ohne Geschiebe, 33.8 h)</li> <li>• HQ<sub>100</sub> Ganglinie (98.0 m<sup>3</sup>/s mit Geschiebe, 44.0 h)</li> <li>• HQ<sub>300</sub> Ganglinie (115.0 m<sup>3</sup>/s mit Geschiebe, 10.5 h)</li> </ul>
A1_03.1	<p><b>Sohleneinbau:</b></p> <p>Sohle im Projektperimeter bis 2.4 m unterhalb projektiertes Sohle mit Grundmischung aufgefüllt. Anschliessend Einbau Blockmischung (Überhöhung = 0.9 m, Stärke = 3.3 m). Überhöhung unterhalb auf ca. 0.5 m auf bestehende Sohle und oberhalb horizontal auslaufend. Oberfläche der eingebauten Sohle verdichtet und planiert, grössere Blöcke in der Sohle versenkt.</p> <p><b>Untersuchte Abflüsse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• HQ<sub>5</sub> stationär (64.0 m<sup>3</sup>/s ohne Geschiebe, 37.8 h)</li> <li>• HQ<sub>5</sub> Ganglinie (64.0 m<sup>3</sup>/s mit Geschiebe, 44.0 h)</li> <li>• HQ<sub>30</sub> stationär (85.0 m<sup>3</sup>/s ohne Geschiebe, 1.2 h)</li> </ul>

<b>A2_01.1</b>	<p><b>Sohleneinbau:</b></p> <p>Untersuchungsbereich auf sechs Stufen eingegrenzt. Stufen Nr. 1 bis 6 gemäss Variante 1 eingebaut. Reduzierter Bereich mit auf Projekthöhe versetzten PVC-Sperre bei Stufe Nr. 7 von restlichem Projektperimeter abgegrenzt.</p> <p><b>Untersuchte Abflüsse:</b></p> <p>Abfluss allmählich bis HQ<sub>5</sub> (64.0 m<sup>3</sup>/s) hochgefahren. Anschliessend Abfluss in Intervallen von 2.8 h um 5.0 m<sup>3</sup>/s bis HQ<sub>100</sub> (98.0 m<sup>3</sup>/s) gesteigert. Ab HQ<sub>100</sub> Abfluss in Intervallen von 1.4 h mit Unterbruch kurz vor HQ<sub>300</sub> (115.0 m<sup>3</sup>/s) bis Kollaps bei 123.3 m<sup>3</sup>/s hochgefahren.</p>
<b>A2_02.1</b>	<p><b>Sohleneinbau:</b></p> <p>Untersuchungsbereich auf sechs Stufen eingegrenzt. Stufen Nr. 1 bis 6 gemäss Variante 2 eingebaut. Der reduzierte Bereich mit auf Projekthöhe versetzten PVC-Sperre bei Stufe Nr. 7 von restlichem Projektperimeter abgegrenzt.</p> <p><b>Untersuchte Abflüsse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Abflussteigerung in Intervallen von 0.9 h um je 5.0 m<sup>3</sup>/s bis HQ<sub>5</sub> (64.0 m<sup>3</sup>/s ohne Geschiebe, 13.9 h)</li><li>• Abflussteigerung ab HQ<sub>5</sub> in Intervallen von 2.8 h um je 5.0 m<sup>3</sup>/s bis HQ<sub>30</sub> (85.0 m<sup>3</sup>/s ohne Geschiebe, 13.6 h)</li><li>• HQ<sub>100</sub> Ganglinie (98.0 m<sup>3</sup>/s mit Geschiebe reduziert, 15.7 h)</li><li>• HQ<sub>300</sub> - Überlastfall Ganglinie (115.0 m<sup>3</sup>/s mit Geschiebe reduziert, 16.6 h)</li></ul>
<b>A2_03.1</b>	<p><b>Sohleneinbau:</b></p> <p>Provisorische Sperre wurde entfernt und alle 14 geplanten Stufen eingebaut. Stufe Nr. 1 zu Beginn fest mit Mörtel versetzt. Variante 1 (Stufe Nr. 1 - 3), Variante 2 (Stufe Nr. 4 - 6 und 10 - 14) und Variante (Stufe Nr. 7 - 9) im selben Versuch belastet. Stufen 10 - 14 mit zusätzlichem Kolkschutz in Kurvenausserbereich verstärkt.</p> <p><b>Untersuchte Abflüsse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Abflussteigerung in Intervallen von 0.9 h um je 5.0 m<sup>3</sup>/s bis HQ<sub>5</sub> (64.0 m<sup>3</sup>/s ohne Geschiebe, 15.0 h)</li><li>• Abflussteigerung ab HQ<sub>5</sub> in Intervallen von 2.8 h um je 5.0 m<sup>3</sup>/s bis HQ<sub>30</sub> (85.0 m<sup>3</sup>/s ohne Geschiebe, 13.7 h)</li><li>• HQ<sub>100</sub> Ganglinie (98.0 m<sup>3</sup>/s mit Geschiebe reduziert, 10.9 h), 1. Versuch</li><li>• HQ<sub>100</sub> Ganglinie (98.0 m<sup>3</sup>/s mit Geschiebe reduziert, 18.2 h), 2. Versuch</li><li>• HQ<sub>300</sub> - Überlastfall Ganglinie (115.0 m<sup>3</sup>/s mit Geschiebe reduziert, 18.6 h)</li></ul>

<b>A2_04.1</b>	<p><b>Sohleneinbau:</b></p> <p>Stufen Nr. 7 - 14 nach Versuch A2_03.1 nicht umgebaut. Stufe Nr. 1 – 3 gemäss Variante 7 und Stufen Nr. 4 – 6 gemäss Variante 6 eingebaut.</p> <p><b>Untersuchte Abflüsse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Abflussteigerung in Intervallen von 0.9 h um je 5.0 m<sup>3</sup>/s bis HQ<sub>5</sub> (64.0 m<sup>3</sup>/s ohne Geschiebe, 15.0 h)</li><li>• Abflussteigerung ab HQ<sub>5</sub> in Intervallen von 2.8 h um je 5.0 m<sup>3</sup>/s bis HQ<sub>30</sub> (85.0 m<sup>3</sup>/s ohne Geschiebe, 13.9 h)</li><li>• HQ<sub>100</sub> Ganglinie (98.0 m<sup>3</sup>/s mit Geschiebe reduziert, 18.2 h)</li><li>• HQ<sub>300</sub> - Überlastfall Ganglinie (115.0 m<sup>3</sup>/s mit Geschiebe reduziert, 18.7 h)</li></ul>
<b>A2_05.1</b>	<p><b>Sohleneinbau:</b></p> <p>Stufen Nr. 1 – 6 und 10 – 14 nach Versuch A2_04.1 nicht umgebaut. Stufe Nr. 7 – 9 gemäss Variante 6 eingebaut. Nach Belastung mit HQ<sub>100</sub>-Ganglinie Stufen Nr. 1 – 6 gemäss Variante 6 umgebaut.</p> <p><b>Untersuchte Abflüsse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• HQ<sub>100</sub> Ganglinie (98.0 m<sup>3</sup>/s mit Geschiebe reduziert, 16.1 h)</li><li>• HQ<sub>300</sub> - Überlastfall Ganglinie (115.0 m<sup>3</sup>/s mit Geschiebe reduziert, 18.9 h)</li></ul>

Tabelle 4: Versuchsauflistung.

## 6 VERSUCH A1\_01.1

### Einbau Sohle

Die bewegliche Sohle im Bereich des Zulaufs wurde mit der Grundmischung verfüllt. Im Projektperimeter beträgt die bewegliche Sohle im Bereich vor der Sperre 4.5 m und im Bereich danach 7.5 m. Bis auf 2.4 m unterhalb der Sohlenlage des projektier-ten Gerinnes wurde die bewegliche Sohle mit der Grundmischung verfüllt. Anschlies-send wurden 4.5 m der mit den Blöcken angereicherten Mischung eingebaut. Dies ergibt eine Überhöhung der Sohle von 2.1 m. Ober- und unterhalb des Projektperi-meters wurde die Überhöhung auf einer Länge von ca. 15 m auf die bestehende Sohle auslaufen gelassen.

### Teilversuche und Abflüsse

Teilversuch	Beschreibung
A1_01.1_HQ5S	HQ <sub>5</sub> (64.0 m <sup>3</sup> /s) stationär ohne Geschiebe
A1_01.1_HQ30S	HQ <sub>30</sub> (85.0 m <sup>3</sup> /s) stationär ohne Geschiebe
A1_01.1_HQ100S	HQ <sub>100</sub> (98.0 m <sup>3</sup> /s) stationär ohne Geschiebe

Tabelle 5: A1\_01.1, Beschrieb Teilversuche.

Die einzelnen Teilversuche sind aufbauend und schliessen an die vorhergehenden Versuche an. Dazwischen wurden keine Eingriffe in der Sohle vorgenommen, ausser es wird in diesem Bericht explizit erwähnt.

### 6.1 Teilversuch A1\_01.1\_HQ5S

#### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle während rund 4.8 h mit einem fünfjährlichen Hochwasser belastet. Dies entspricht einem Abfluss von 64.0 m<sup>3</sup>/s. Geschiebe wurde während dem Versuch keines zugeführt.

#### Beobachtungen

Beim ersten Hochfahren des Abflusses wurde der Abfluss schnell erhöht. Dies hatte zur Folge, dass sehr früh viel und grosse Blöcke aus dem Projektperimeter transpor-tiert wurden.

Schon früh bildete sich im oberen Teil des Projektperimeters in Fliessrichtung auf der linken Seite eine Rinne, in der sich der Abfluss und die Strömung konzentrierten. Auf der Abbildung 10 ist gut ersichtlich, dass der Böschungsverbau auf der in Fliessrich-tung linken Seite viel weiter freigelegt ist als auf der rechten. Die Rinnenbildung hat zur Folge, dass die Fliessgeschwindigkeit in diesem Bereich steigt und somit mehr Geschiebe ausgespült werden kann. Die Erosion der Sohle wird somit begünstigt.



Abbildung 10: Rinne auf der in Fließrichtung linken Seite nach dem  $HQ_5$  (Foto in Richtung Oberwasser).

Nachdem sich die Strömung im oberen Teil auf der in Fließrichtung linken Seite konzentriert, wechselt diese beim Beginn des Kurvenbereichs im Projektperimeter die Seite und wird dort durch die Böschung umgelenkt. Die Strömung konzentriert sich danach auf der Kurvenaussenseite. Beim Umlenken der Strömung entstehen grössere Turbulenzen und Querströmungen, welche die Bildung einer Strömungsrinne begünstigen und Stosswellen verursachen. Auf Abbildung 11 ist die Strömungskonzentration entlang der rot eingezeichneten Linie ersichtlich.



Abbildung 11: Kurvensituation beim  $HQ_5$  mit rot eingezeichneter Strömungskonzentration.

## 6.2 Teilversuch A1\_01.1\_HQ30S

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle während rund 5.0 h mit einem dreissigjährigen Hochwasser belastet. Dies entspricht einem Abfluss von  $85.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Geschiebe wurde während dem Versuch keines zugeführt.

### Beobachtung

Wie auf der Abbildung 12 ersichtlich, vermochte das  $HQ_{30}$  die Sohle nicht um die erforderlichen  $2.10 \text{ m}$  abzusenken. In Fließrichtung auf der linken Seite erreichte die Sohle der Strömungsrinne fast die projektierte Sohlenlage, auf der rechten Seite liegt die Sohle jedoch immer noch auf dem eingebauten Niveau.



Abbildung 12: Oberer Bereich des Projektperimeters nach einem  $HQ_{30}$ . Die rote Linie zeigt die Ausgangssohlenlage.

Auf Abbildung 13 ist der Abfluss während dem  $HQ_{30}$  ersichtlich. Auf der in Fließrichtung linken Seite in der Strömungsrinne ist eine Wellenbildung ersichtlich.



Abbildung 13: Wellenbildung bei  $HQ_{30}$ . Einzelne Stufen-Becke-Sequenzen sind erkennbar.

### 6.3 Teilversuch A1\_01.1\_HQ100S

#### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle während rund 5.0 h mit einem hundertjährigen Hochwasser belastet. Dies entspricht einem Abfluss von  $85.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Geschiebe wurde während dem Versuch keines zugeführt.

#### Beobachtungen

Nachdem die Sohle ca. 2 h mit dem HQ<sub>100</sub> belastet wurde und die Sohle nahezu stabil war, begann die Sohle am Ende des Projektperimeters zu erodieren, was schliesslich zu einem Kollaps der Sohle führte. Der Beginn des erhöhten Geschiebeausstrags aufgrund der Sohlenerosion ist im Diagramm 9 deutlich zu erkennen.

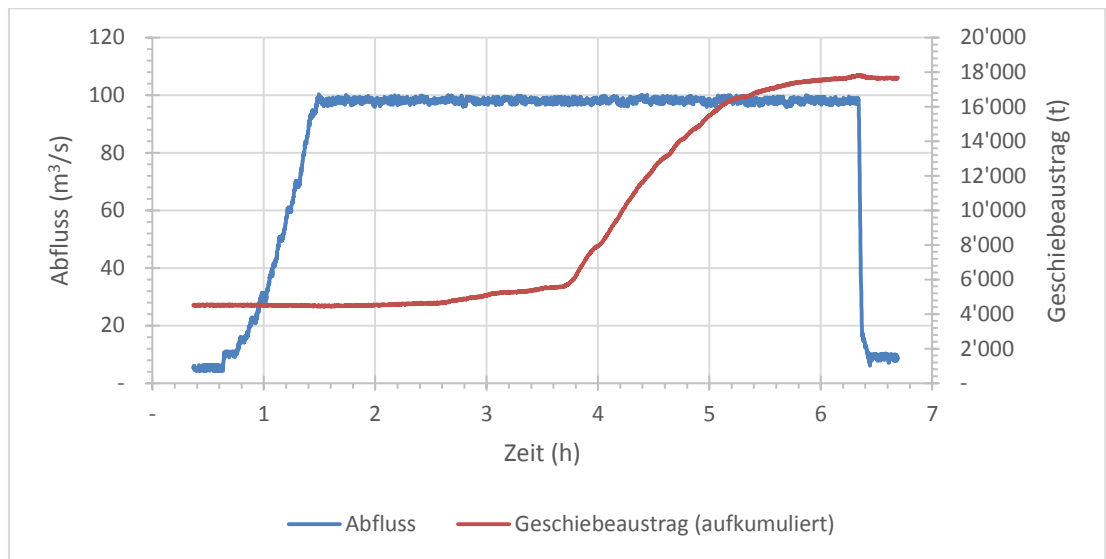


Diagramm 9: Messdiagramm A1\_01.1\_H100S, Beginn Kollaps der Sohle ist gut ersichtlich.

Die im Projektperimeter auf der Kurvenaussenseite konzentrierte Strömung vermochte beim Kurvenausgang eine Rinne bilden, die die Erosion der Sohle in diesem Bereich begünstigte. In Folge dessen erhöhte sich das Gefälle der Sohle. Dadurch erodierte die Sohle in Richtung Oberwasser bis zum Einlauf. Zwischenzeitlich lagerte sich das Geschiebe vom Zulauf im Projektperimeter ab, wurde aber anschliessend wieder ausgetragen.



Abbildung 14: Blick Richtung Zulauf nach Kollaps der Sohle.



#### 6.4 Fazit aus dem Versuch A1\_01.1

Bei den künftigen Versuchen darf der Abfluss zu Beginn nicht so schnell hochgefahren werden, wie es bei diesem Versuch der Fall war. Ansonsten können die grösseren Blöcke beim Auffahren destabilisiert und abtransportiert werden.

Die Sohlenüberhöhung von 2.1 m konnte auch durch die grossen Abflüsse nicht bis auf die projektierte Sohlenlage abgetragen werden. Deshalb soll die Überhöhung in den folgenden Versuchen nur noch 0.9 m betragen.

Schon beim  $HQ_5$  hat sich im oberen Teil des Projektperimeters auf der in Fliessrichtung linken Seite eine Rinne mit einer Strömungskonzentration gebildet. Um dies bei zukünftigen Versuchen zu unterbinden, soll nach dem Einbau der Geschiebemischung bei einem minimalen Abfluss darauf geachtet werden, dass die eingebaute Sohle nicht schon von Beginn an eine leichte Querneigung aufweist, wie dies bei diesem Versuch der Fall war.

Der Kollaps beim  $HQ_{100}$  begann am Kurvenausgang der Linkskurve im Projektperimeter, da sich dort die Strömung konzentrierte und sich eine Rinne bildete. Bei den folgenden Versuchen, sollten in der Sohle der Kurvenaussenseite vermehrt grobe Blöcke verbaut werden, so wird einer Rinnenbildung entgegengewirkt und der Abfluss kann sich besser auf das ganze Gerinne verteilen. Bei diesem Versuch wurden die grösseren Blöcke willkürlich eingebaut. Es wurde nicht darauf geachtet, wo die grösseren Blöcke zu liegen kommen.

Durch die anfängliche Bildung einer Strömungsrinne und dem anschliessenden Kollaps konnten aus diesem Versuch keine verlässlichen Angaben über Abmessung und Anordnung der Stufen und Becken gewonnen werden.

## 7 VERSUCH A1\_02.1

### Einbau Sohle

Nachdem die Sohle während des Versuchs A1\_01.1 beim  $HQ_{100}$  kollabiert ist, wurde sie im Zulaufbereich komplett neu eingebaut. Im Projektperimeter wurde die mit den Blöcken angereicherte Mischung komplett entfernt und neu eingebaut. Unterhalb des Projektperimeters wurden die farbigen Steine entnommen und die Sohle anschliessend wieder bis zur natürlichen Sohlenlage ergänzt. Im Gegensatz zu Versuch A1\_01.1 wurde die Sohle nur noch 0.9 m überhöht eingebaut. Somit betrug die Stärke der mit den Blöcken angereicherten Mischung nur noch 3.3 m. Im Bereich oberhalb wurde die überhöhte Sohle mit 0 % Gefälle in Richtung Zulauf verlängert, bis sie die bestehende Sohle schneidet. Im Bereich unterhalb des Projektperimeters wurde die Sohle wiederum auf einer Länge von ca. 15 m auf die bestehende Sohle auslaufen gelassen.

Im Bereich der Kurve im Projektperimeter wurde beim Einbau der mit den Blöcken angereicherten Mischung darauf geachtet, dass die Mehrheit der Blöcke auf der Kurvenaussenseite eingebaut wurde. Damit soll einem wiederholten Ausspülen der Sohle in diesem Bereich entgegengewirkt werden.

Nach dem Einbau wurde die Sohle bei einem minimalen Abfluss benetzt und die Geschiebemischung so im Querschnitt verteilt, dass keine Querneigungen vorhanden waren. Hiermit sollte verhindert werden, dass sich schon von Beginn an eine Rinne und somit eine Strömungskonzentration ausbildet.

### Teilversuche und Abflüsse

Teilversuch	Beschreibung
A1_02.1_HQ5S	$HQ_5$ (64.0 m <sup>3</sup> /s) stationär ohne Geschiebe
A1_02.1_HQ30S	$HQ_{30}$ (85.0 m <sup>3</sup> /s) stationär ohne Geschiebe
A1_02.1_91m3sS	91 m <sup>3</sup> /s stationär ohne Geschiebe
A1_02.1_HQ100S	$HQ_{100}$ (98.0 m <sup>3</sup> /s) stationär ohne Geschiebe
A1_02.1_HQ100G	$HQ_{100}$ (98.0 m <sup>3</sup> /s) Ganglinie mit Geschiebe
A1_02.1_HQ300G	$HQ_{300}$ (115.0 m <sup>3</sup> /s) Ganglinie mit Geschiebe

Tabelle 6: A1\_02.1, Beschrieb Teilversuche.

Die einzelnen Teilversuche sind aufbauend und schliessen an die vorhergehenden Versuche an. Dazwischen wurden keine Eingriffe in der Sohle vorgenommen, ausser es wird in diesem Bericht explizit erwähnt.

## 7.1 Teilversuch A1\_02.1\_HQ5S

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit einem fünfjährlichen Hochwasser belastet. Dies entspricht einem Abfluss von  $64.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Bis zum ersten Herunterfahren des Modells und den ersten Messungen wurde das Modell 6.0 h laufen gelassen. Anschliessend wurde der Abfluss wieder hochgefahren und rund 26.0 h gehalten. Geschiebe wurde dem Gerinne nicht beigegeben.

### Beobachtung

Beim ersten Befeuchten des Modells wurde darauf geachtet, dass sich der Abfluss besser auf den ganzen Querschnitt verteilt als das letzte Mal, und dass die Pumpen langsamer hochgefahren werden. Dadurch wurden viel weniger grobe Steine transportiert als beim letzten Versuch und die Strömungsrinnen bilden sich nicht schon von Beginn an. Beim Vergleichen der Abbildung 16 und Abbildung 17 fällt auf, dass beim Versuch A1\_01.1 nach dem HQ<sub>5</sub> deutlich mehr und gröberes Geschiebe ausgetragen wurde als beim Versuch A1\_02.1.



Abbildung 15: Ausgangszustand bei Versuch A1\_02.1.



Abbildung 16: Geschiebeausstrag am Ende des Projektperimeters nach HQ<sub>5</sub> bei Versuch A1\_02.1.



Abbildung 17: Geschiebeausstrag am Ende des Projektperimeters nach HQ<sub>5</sub> bei Versuch A1\_01.1.

Abbildung 18 zeigt auf, dass die Strömung nach der ersten Belastung mit dem  $HQ_5$  über den ganzen Querschnitt verteilt ist. Es hat sich keine Rinne gebildet in der die Strömung konzentriert wird.



Abbildung 18: Sohle bei Niederwasser nach  $HQ_5$ .

Beim Vergleich der Orthophotos ist ersichtlich, dass bis zur ersten Messung (Abbildung 19) die gröberen Steine teilweise in Richtung Unterwasser transportiert werden. Im zweiten Teil des Versuchs, bis zur zweiten Messung (Abbildung 20), wurden die grossen, blauen und gelben Blöcke nicht mehr verschoben. Die Orthophotos mit den markierten Blöcken sind im Anhang B noch in einem grösseren Format abgebildet. Die Blöcke, die verschoben oder freigespült wurden, sind rot markiert.

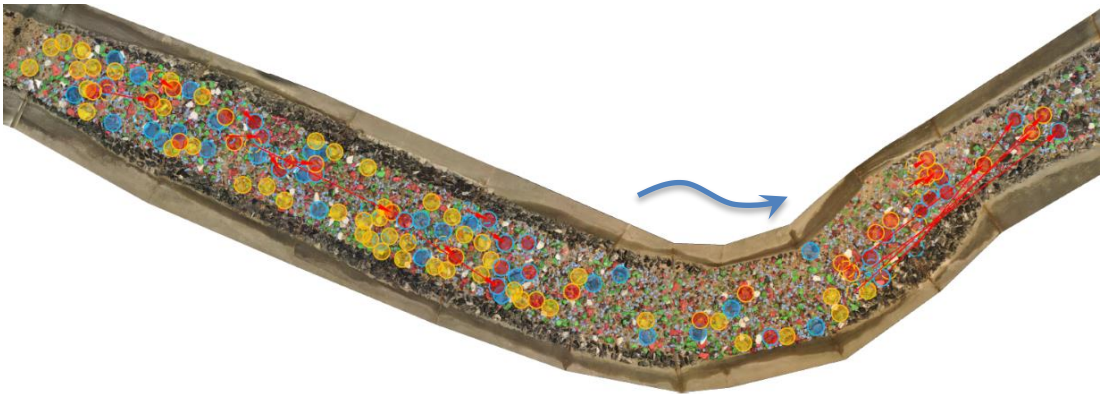


Abbildung 19: Bewegung Blöcke von Ausgangszustand zu  $HQ_5$  1. Messung.

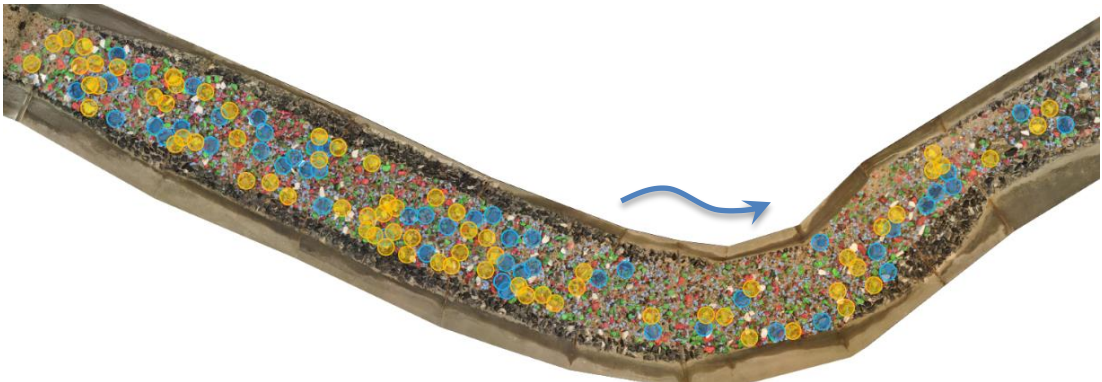


Abbildung 20: Die grossen Blöcke wurden von  $HQ_5$  1. Messung zur  $HQ_5$  2. Messung nicht mehr verschoben.

## 7.2 Teilversuch A1\_02.1\_HQ30S

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit einem dreissigjährigen Hochwasser belastet. Dies entspricht einem Abfluss von  $85.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Bis zum ersten Herunterfahren des Modells und den ersten Messungen wurde das Modell 6.2 h laufen gelassen. Anschliessend wurde der Abfluss wieder hochgefahren und rund 29.5 h gehalten. Geschiebe wurde dem Gerinne nicht beigegeben.

### Beobachtung

Auch beim  $HQ_{30}$  wurden die grösseren Blöcke (gelb und blau) gemäss dem Vergleich der Orthophots im Anhang nicht weit transportiert. Die grösseren Blöcke vermochte der Abfluss von  $85.0 \text{ m}^3/\text{s}$  nicht transportieren. Es wurde hauptsächlich feines Material aus dem Modell gespült. Allmählich bilden sich im oberen Teil des Projektperimeters einige Stufen und Becken.



Abbildung 21: Oberer Teil Projektperimeter bei Niederwasser nach  $HQ_{30}$  am Ende des Versuchs.

### 7.3 Teilversuch A1\_02.1\_91m3sS

#### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit einem Abfluss von  $91 \text{ m}^3/\text{s}$  belastet. Nachdem dieser Abfluss während rund 2.1 h gehalten wurde, wurden die Pumpen heruntergefahren und im Bereich nach der Linkskurve im Projektperimeter ein Teil der Sohle korrigiert. Danach wurden die Pumpen wieder für 3.4 h hochgefahren, um anschliessend alle Messungen durchzuführen. Die dritte und letzte Messperiode dauerte rund 36.0 h. Geschiebe wurde dem Gerinne nicht beigegeben

#### Beobachtung

In Abbildung 22 ist die Sohlenlage beim Ausgangszustand mit der Sohlenlage nach dem  $HQ_{30}$  abgebildet. Der Bereich am Kurvenausgang ist rot markiert. Die Sohle wurde durch die Strömungskonzentration an der Kurvenaussenseite um mehr als 5 cm (Modellmassstab) erodiert. Um ein weiteres Abgetragen und ein mögliches Kollabieren der Sohle zu verhindern, wurde das Geschiebe im Kurvenaussebereich entnommen und durch gröberes ersetzt. Die dafür verwendete Mischung enthielt deutlich mehr Blöcke als die zu Beginn eingebaute.

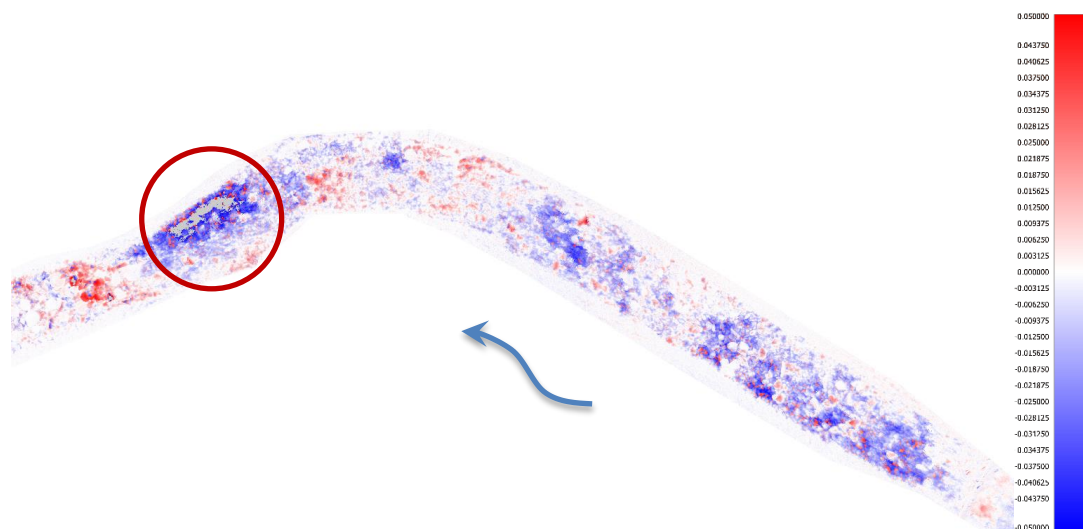


Abbildung 22: Vergleich der Sohlenlagen vom Ausgangszustand und  $HQ_{30}$ .

## Bildung Stufen-Becken-Gerinne

Während den Versuchen bildet sich im oberen Teil des Projektperimeters eine Stufen-Becken-Abfolge. Bei genauerem Betrachten sind auf den Abbildung 23 bis Abbildung 26 sieben Stufen zu erkennen.

Die meisten der grossen Blöcke, die die Stufen fixieren und ihre Erosion verhindern, sind immer noch am gleichen Ort wie zu Beginn der Versuche (siehe Vergleich der Blöcke auf Orthophotos im Anhang). Anfänglich waren die gröberen Blöcke noch mit Geschiebe bedeckt oder ragten nur wenig aus der Sohle heraus. Die simulierten Hochwasserabflüsse vermochten die feinen Fraktionen aus dem Modell zu schwemmen. Es bildeten sich allmählich die Stufen und Becken, die nun vorhanden waren. Die Versuche haben gezeigt, dass die vorhandenen Stufen bis zu einem Abfluss von  $91 \text{ m}^3/\text{s}$  stabil blieben. Beim Betrachten der folgenden vier Abbildungen Abbildung 23 bis Abbildung 26 ist zu erkennen, wie sich die Stufen und Becken angeordnet haben.

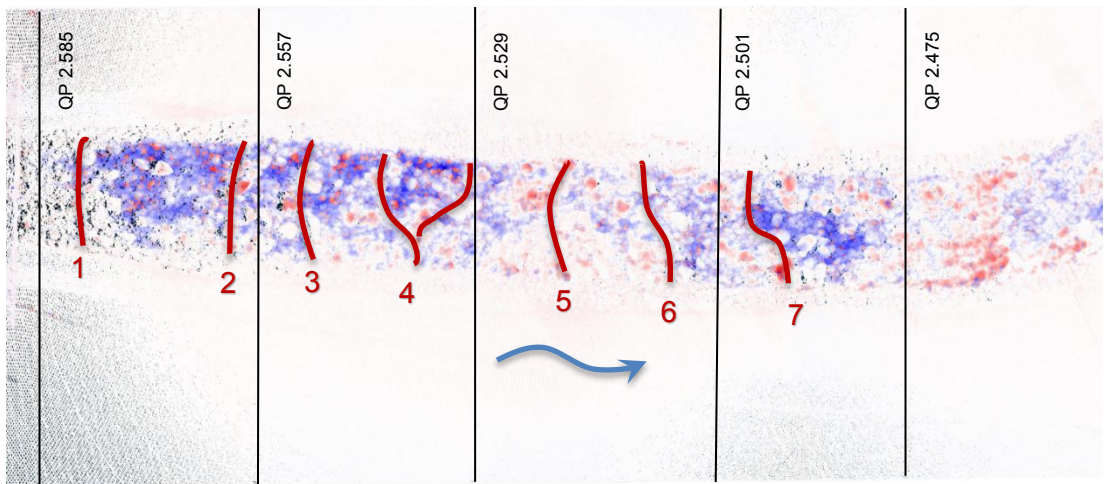


Abbildung 23: Vergleich 3D-Scans Ausgangszustand -  $91 \text{ m}^3/\text{s}$ , mit eingezeichneten Stufen.



Abbildung 24: Foto mit eingezeichneten Stufen bei Niederwasser nach einem Abfluss von  $91 \text{ m}^3/\text{s}$ .

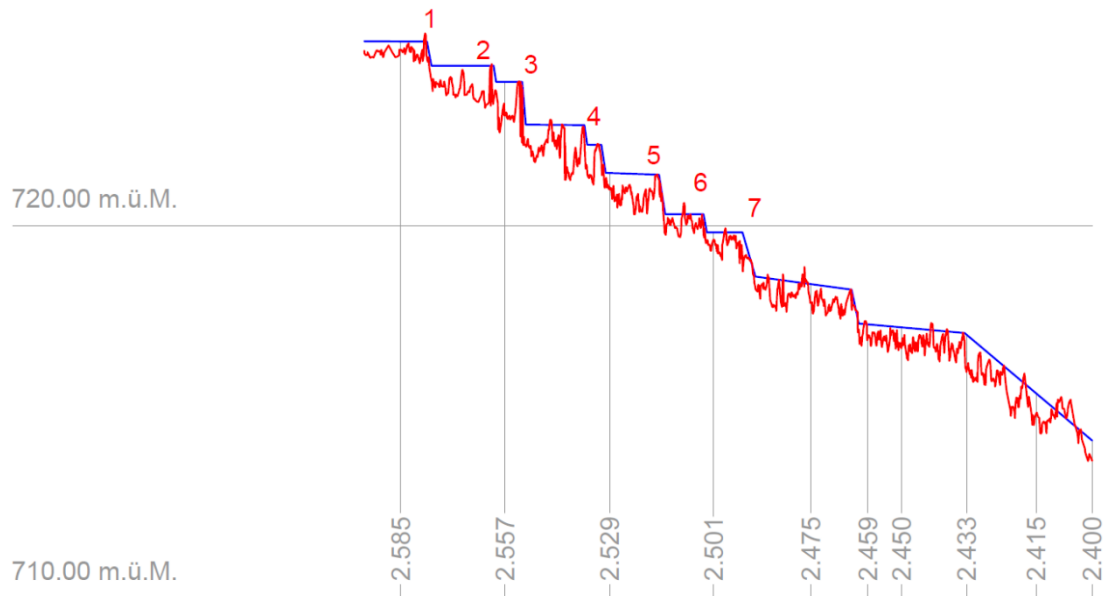


Abbildung 25: Längenprofil durch die Projektachse mit eingezeichneten Stufen (blaue Linie) nach einem Abfluss von 91 m<sup>3</sup>/s.



Abbildung 26: Eingezeichnete Stufen zwischen Profil 2.557 und 2.529 bei Niederwasser nach einem Abfluss von 91 m<sup>3</sup>/s.

Die rund sieben Stufen verteilen sich auf eine Länge von rund 102 m und überwinden eine Höhe von 6.3 m. Dies ergibt ein durchschnittliches Gefälle von 6.2 %. In der Tabelle 7 sind die Abmessungen der gebildeten Stufen und Becken aufgelistet.

	Länge Becken	Höhe Stufen
Durchschnitt	14.56 m	0.90 m
Minimum	3.81 m	0.44 m
Maximum	16.68 m	1.14 m

Tabelle 7: Abmessungen Stufen und Becken nach einem Abfluss von 91 m<sup>3</sup>/s.



Die Stufenbildung mit den grösseren Blöcken fand hauptsächlich im oberen Teil des Projektperimeters statt. Im Bereich der Kurve im Projektperimeter waren schon zu Beginn der Versuche im Vergleich wenige grosse Blöcke vorhanden. Der Vergleich der Orthophotos zeigte auf, dass auch weniger grosse Steine abgelagert wurden. Das hat zur Folge, dass sich die Stufen und Becken in diesem Bereich nicht so deutlich ausbilden konnten. Die sich gebildete Struktur ähnelt eher einer mit groben Blöcken besetzten Rampe.



Abbildung 27: Kurvenbereich im Projektperimeter bei Niederwasser nach einem Abfluss von  $91 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 7.4 Teilversuch A1\_02.1\_HQ100S

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit einem hundertjährigen Hochwasser belastet. Dies entspricht einem Abfluss von  $98.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Bis zum ersten Herunterfahren des Modells und den ersten Messungen wurde das Modell 6.3 h laufen gelassen. Anschliessend wurde der Abfluss wieder hochgefahren und rund 27.5 h gehalten. Geschiebe wurde dem Gerinne nicht beigegeben.

### Beobachtung

Die Erhöhung des Abflusses von  $91.0 \text{ m}^3/\text{s}$  auf  $98.0 \text{ m}^3/\text{s}$  hat keine grossen Veränderungen in der Sohle ausgelöst. Erst während dem die Sohle zum zweiten Mal mit dem  $HQ_{100}$  belastet wurde, wurden einige der grossen Blöcke transportiert.



Abbildung 28: Projektperimeter bei Niederwasser nach A1\_02.1\_HQ100S 1.Messung.



Abbildung 29: Projektperimeter bei Niederwasser nach A1\_02.1\_HQ100S 2.Messung.

Auf Abbildung 28 und Abbildung 29 ist zwei Mal die Sohle im oberen Teil des Projektperimeters direkt nach dem Zulaufbereich abgebildet. Abbildung 28 zeigt den Beginn des Projektperimeters nach 6.3 Stunden Belastung und Abbildung 29 nach weiteren 27.5 Stunden Belastung mit dem  $HQ_{100}$ . Die rote Markierung zeigt den Bereich in dem die Stufen-Becken-Sequenzen während dem Teilversuch mit dem  $HQ_{100}$  zerstört wurden. Der Transport der grossen Blöcke ist in der Abbildung 30 ersichtlich.

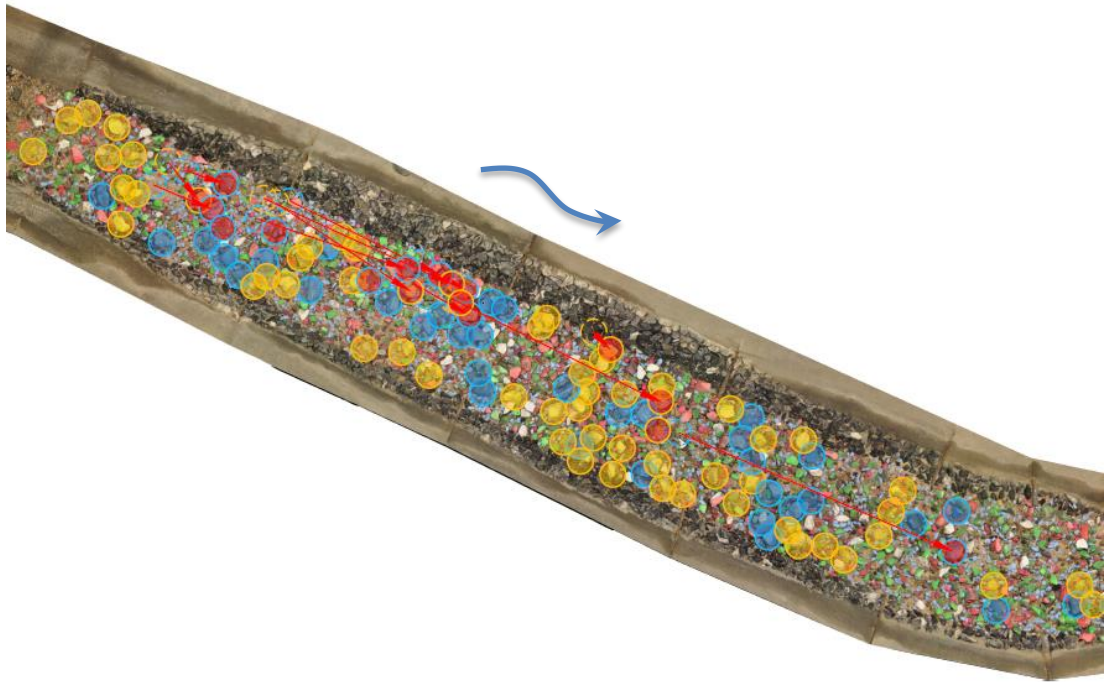


Abbildung 30: Bewegung Blöcke von A1\_02.1\_100S 1. Messung zu A1\_02.1\_HQ100S 2. Messung.  
(Das gesamte Orthophoto mit Auswertung befindet sich im Anhang B).

## 7.5 Teilversuch A1\_02.1\_HQ100G

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit einer Ganglinie des hundertjährigen Hochwassers belastet. Der Spitzenabfluss der Ganglinie betrug  $98.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Der Versuch dauerte rund 44 h. Parallel zur Abflussganglinie wurde das Gerinne mit einer Geschiebeganglinie belastet. Der maximale Geschiebeeintrag lag bei rund  $329 \text{ kg/s}$ .

### Beobachtungen

Bei diesem Versuch wurde das erste Mal eine Ganglinie mit Geschiebetrieb nachgebildet. Das Material das beim Modelleinlauf dem Gerinne zugeführt wurde, konnte nur beschränkt abtransportiert werden.

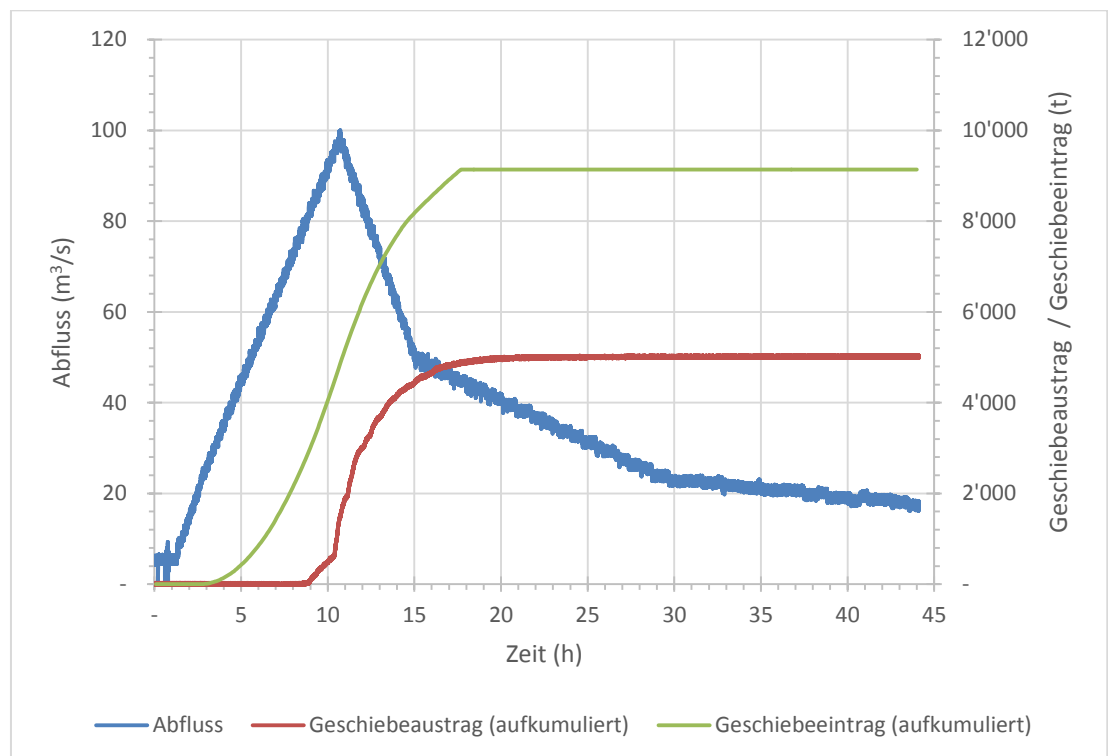


Diagramm 10: Messdiagramm A1\_02.1\_HQ100G.

Wird im Messdiagramm (Diagramm 10) der Geschiebebeitrag (rot) mit dem Geschiebeeintrag (grün) verglichen, ist zu erkennen, dass das Material mit einer grossen Verzögerung bei dem Geschiebekorb angekommen ist. Ein Grossteil des beigegebenen Materials konnte nicht durch die flache Strecke zu Beginn des Modells transportiert werden und wurde dort abgelagert. Nach dem der Geschiebetrieb eingesetzt hatte, wurden die durch die vorhergehenden Versuche entstandenen Rinnen im Zulaufbereich aufgefüllt. Auch als die Sohle im Zulaufbereich bis auf das Ausgangsniveau aufgefüllt war, lagerte sich weiter Geschiebe in diesem Bereich ab. Unter der Bandwaage, wo das Geschiebe dem Gerinne beigegeben wurde, bildete sich ein Geschiebehaufen. Folglich staute sich das Wasser auf und trat links und rechts über die Ufer. Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen auf, wie viel Material in diesem Bereich abgelagert wurde. Nach rund 17.7 h wurde die Geschiebebeigabe frühzeitig gestoppt, da der Abfluss nicht mehr ausreichte, um das Geschiebe unter der Bandwaage aufzunehmen und weg zu transportieren.



Abbildung 31: Sohle im Zulaufbereich nach Teilversuch A1\_02.1\_HQ100S, Blöcke zur Befestigung des Einlaufbereichs und abgesenkte Sohle klar sichtbar.



Abbildung 32: Sohle im Zulaufbereich nach Teilversuch A1\_02.1\_HQ100G, Blöcke und Sohle mit Geschiebe verfüllt.

Bis anhin wurden nur stationäre Versuche ohne Geschiebebeigabe durchgeführt. Während diesen Versuchen wurden hauptsächlich die Feianteile aus der Sohle ausgespült. Nachdem das beigegebene Geschiebe den Zulaufbereich verfüllt hat, wurden zuerst die feinen und später auch die gröberen Fraktionen der Geschiebemischung durch den Projektperimeter transportiert. Das eingetragene Geschiebe lagerte sich teilweise im Projektperimeter ab und veränderte dadurch die Strömungssituation. Aufgrund der veränderten Strömungssituation wurde ein grosser Teil der Blöcke mobilisiert und die in den vorhergehenden Versuchen entstandenen Strukturen zerstört.

## 7.6 Teilversuch A1\_02.1\_HQ300G

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit einer Ganglinie des dreihundertjährigen Hochwassers belastet. Der Spitzenabfluss der Ganglinie betrug  $115.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Der Versuch dauerte bis zum Kollaps rund 10.5 h. Parallel zur Abflussganglinie wurde das Gerinne mit einer Geschiebeganglinie belastet.

Da im Teilversuch A1\_02.1\_HQ100G ein Grossteil des Geschiebes im Zulaufbereich und unter der Bandwaage liegen geblieben ist, musste die Sohle anschliessend wieder auf das natürliche Niveau abgesenkt werden. Nach dem das Wasser vom Beruhigungsbecken ins Modell geflossen ist, wird es beschleunigt und die Geschiebetransportfähigkeit erhöht sich somit. Deshalb wurde die Bandwaage für die folgenden Versuche weiter unten platziert. Das Geschiebe wurde dem Gerinne beim Gefällsknick zwischen Zulaufbereich und Projektperimeter beigegeben. Da in diesem Bereich die Fliessgeschwindigkeit und somit die Geschiebetransportkapazität höher ist als beim Einlauf, kann das Geschiebe besser abtransportiert werden und lagert sich nicht ab.



Abbildung 33: Bandwaage an neuer Position.

### Beobachtungen

Die Strukturen wurden teilweise schon im vorhergehenden Versuch (HQ<sub>100</sub>-Ganglinie) zerstört. Die Sohle vermochte die Belastungen der HQ<sub>300</sub>-Ganglinie nicht mehr standhalten. Der Versuch wurde deshalb nach rund 10.5 h abgebrochen.

Im Messdiagramm (Diagramm 11) zeigt die grüne Linie den Geschiebeeintrag mit der Bandwaage und die rote Linie der mit dem Geschiebekorb und Messzelle gemessene Geschiebeaustrag dar. Nach zehn Stunden kreuzt die rote Linie die grüne und steigt steiler an. Daran ist zu erkennen, dass mehr Material ausgetragen wird, als dem Gerinne mit der Bandwaage zugeführt wird. Im Modell war klar zu erkennen, wie die Sohle kollabiert ist und auch die grösseren Blöcke aus dem Modell ausgetragen wurden.

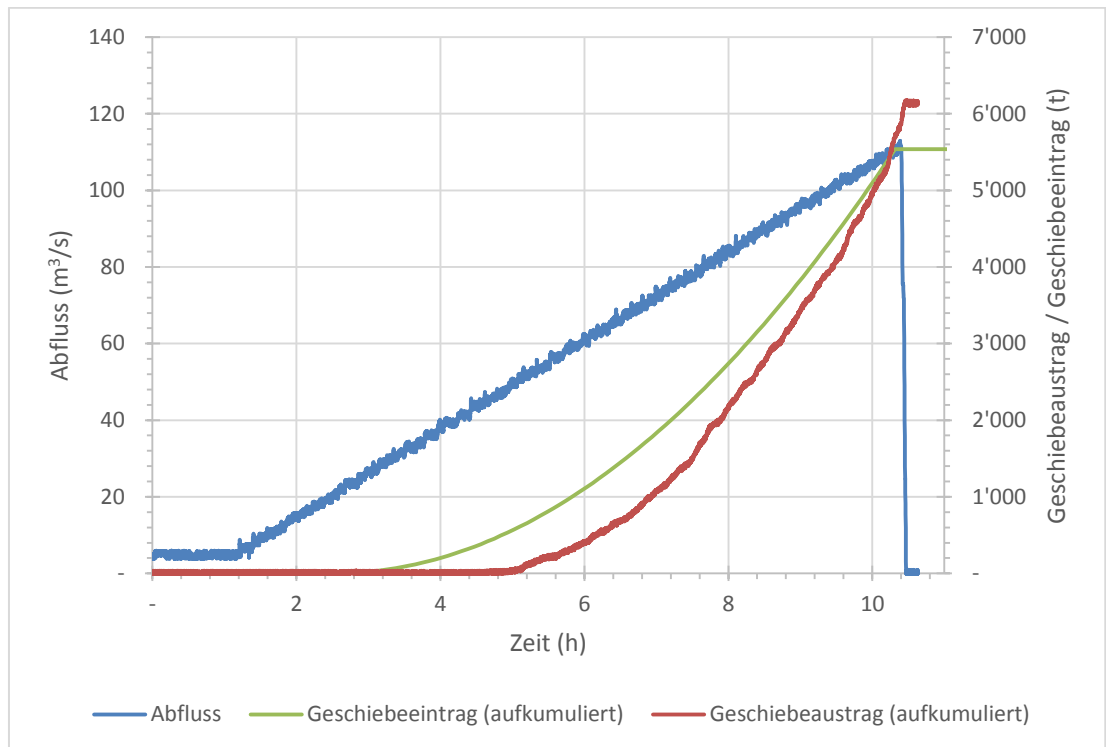


Diagramm 11: Messdiagramm A1\_02.1\_HQ300G.

Im Gegensatz zum Versuch A1\_01.1 begann der Kollaps nicht auf der Kurvenausseite am Ende des Projektperimeters, sondern im geraden Stück vor der Linkskurve im Projektperimeter. Im Bereich der Linkskurve wurde während dem Kollaps sogar Material abgelagert. Die ersten grösseren Blöcke lösten sich in der Mitte des Gerinnes. Anschliessend erodierte die Sohle immer weiter in Richtung Oberwasser. Im Bereich, an dem die Sohle zu kollabieren begann, hat sich nach dem vorhergehenden Teilversuch A1\_02.1\_HQ100G bereits eine Strömungskonzentration in der Mitte des Gerinnes ausgebildet (rote Markierung auf Abbildung 34).



Abbildung 34: Gerinne bei Niedrigwasser im oberen Bereich des Projektperimeters nach Belastung mit der HQ<sub>100</sub>-Ganglinie. Die Strömungskonzentration ist rot markiert.

## 7.7 Fazit aus dem Versuch A1\_02.1

Es wurde davon ausgegangen, dass der zusätzliche Geschiebeeintrag bei Ganglinienversuchen die gebildeten Stufen-Becken-Strukturen stabilisiert. Die Versuche zeigten jedoch, dass das feine, zugeführte Material einen negativen Einfluss auf die Stabilität der grösseren Blöcke hat. In den nächsten Versuchen wird die Abfolge der Teilversuche an die Erkenntnisse aus diesem Versuch angepasst. Auf jeden stationären Versuch soll neu ein Ganglinienversuch mit Geschiebeeintrag folgen, so soll der Einfluss des aus dem Oberwasser eingetragenen Geschiebes besser untersucht werden. Die einzelnen Teilversuche sollen, insofern die Sohle den Belastungen standhält, in den folgenden Versuchen folgendermassen aufgebaut werden:

- HQ<sub>5</sub> stationär ohne Geschiebe
- HQ<sub>5</sub> Ganglinie mit Geschiebe
- HQ<sub>30</sub> stationär ohne Geschiebe
- HQ<sub>30</sub> Ganglinie mit Geschiebe
- HQ<sub>100</sub> stationär ohne Geschiebe
- HQ<sub>100</sub> Ganglinie mit Geschiebe
- HQ<sub>300</sub> stationär ohne Geschiebe
- HQ<sub>300</sub> Ganglinie mit Geschiebe
- Überlastversuch

Beim Versuch mit der HQ<sub>100</sub>-Ganglinie konnte ein Grossteil des mit der Bandwaage beim Modellanfang beschickten Geschiebes nicht bis zum Projektperimeter transportiert werden. Aus diesem Grund wird in den kommenden Versuchen beim Beginn des Projektperimeters beschickt. Nach dem das Wasser vom Becken ins Gerinne fliesst, wird es beschleunigt. Beim neuen Bandwaagenstandort hat sich der eingestellt und das Wasser fliesst schneller. Somit ist die Geschiebetriebkapazität höher als direkt nach dem Einlauf und das beschickte Geschiebe kann abtransportiert werden.



## 8 VERSUCH A1\_03.1

### Einbau Sohle

Nachdem die Sohle während des Versuch A1\_02.1 beim  $HQ_{300}$  kollabiert ist, wurde die oberste Schicht der Sohle im Zulaufbereich neu eingebaut. Im Projektperimeter wurde die komplette mit den Blöcken angereicherte Mischung entfernt und neu eingebaut. Bei diesem Versuch wurde speziell darauf geachtet, dass die grösseren Steine in der Sohle versenkt wurden und die Oberfläche verdichtet wurde. Im Bereich unterhalb des Projektperimeters wurden die farbigen Blöcke entnommen und anschliessend die Sohle wieder bis zur natürlichen Lage ergänzt. Wie im Versuch A1\_02.1 wurde die Sohle 0.9 m überhöht eingebaut. Somit betrug die Stärke der mit den Blöcken angereicherten Mischung 3.3 m. Im Bereich oberhalb wurde die überhöhte Sohle mit 0 % Gefälle in Richtung Zulauf verlängert, bis sie die bestehende Sohle schneidete. Im Bereich unterhalb des Projektperimeters wurde die Sohle wiederum auf einer Länge von ca. 15.0 m auf die bestehende Sohle auslaufen gelassen.

Im Bereich der Kurve im Projektperimeter wurden auf der Aussenseite zusätzliche Blöcke verbaut, um eine Rinnenbildung im Kurvenaussenbereich und eine damit verbundene Strömungskonzentration zu verhindern.

Nach dem Einbau wurde die Sohle bei einem minimalen Abfluss benetzt und die Geschiebemischung so im Querschnitt verteilt, dass die Sohle horizontal lag und nicht geneigt war. Somit sollte eine Rinnenbildung zu Beginn des Versuchs verhindert werden.

### Teilversuche und Abflüsse

Teilversuch	Beschreibung
A1_03.1_HQ5S	$HQ_5$ (64.0 m <sup>3</sup> /s) stationär ohne Geschiebe
A1_03.1_HQ5G	$HQ_5$ (64.0 m <sup>3</sup> /s) Ganglinie mit Geschiebe
A1_03.1_HQ30S	$HQ_{30}$ (85.0 m <sup>3</sup> /s) stationär ohne Geschiebe

Tabelle 8: A1\_03.1, Beschreibung Teilversuche.

Die einzelnen Teilversuche sind aufbauend und schliessen an die vorhergehenden Versuche an. Dazwischen wurden keine Eingriffe in der Sohle vorgenommen, ausser es wird in diesem Bericht explizit erwähnt.

## 8.1 Teilversuch A1\_03.1\_HQ5S

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit einem fünfjährlichen Hochwasser belastet. Dies entspricht einem Abfluss von  $64.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Bis zum ersten Herunterfahren des Abflusses und den ersten Messungen wurde das Modell 5.8 h laufen gelassen. Anschliessend wurde der Abfluss wieder hochgefahren und rund 32.0 h gehalten. Geschiebe wurde dem Gerinne nicht beigegeben.

### Beobachtungen

Obwohl beim Einbau der Sohle besonders darauf geachtet wurde, dass die Sohle kein Quergefälle aufweist, bildete sich schon früh eine Rinne und somit eine Strömungskonzentration aus. Die Strömungskonzentration bildete sich vor der Kurve im Projektperimeter auf der in Fliessrichtung linken Seite aus.



Abbildung 35: Gerinne bei Niederwasser nach 5.8 h HQ<sub>5</sub>, mit rot markierter Rinnenbildung.

Abbildung 36 zeigt die Uferböschung auf der in Fliessrichtung linken Seite zwischen Profil 2.529 (links) und 2.501 (rechts). Die rote Linie stellt die eingebaute und die blaue die projektierte Sohlenlage dar. Das stationäre HQ<sub>5</sub> hat bereits ausgereicht, um die Sohle in diesem Bereich um die erforderlichen 0.90 m abzusenken.



Abbildung 36: Ansicht der linken Böschung mit eingebauter (rot) und projektierte (blau) Sohlenlage nach Versuch A1\_03.1\_HQ<sub>5</sub>S.

Auf Abbildung 37 wird die mit dem 3D-Scanner vermessene Sohlenlage vom Ausgangszustand mit der nach dem HQ<sub>5</sub> verglichen. Auch hier ist die Rinnenbildung vor der Kurve im Projektperimeter (blauen Fläche / Markierung) klar zu erkennen. Ein Teil des Geschiebes, das im blau markierten Bereich (Erosion) ausgetragen wurde, wurde anschliessend im rot markierten Bereich (Auflandung) in der Kurve im Projektperimeter abgelagert. Die Abbildungen sind zusätzlich im Anhang B zu finden.

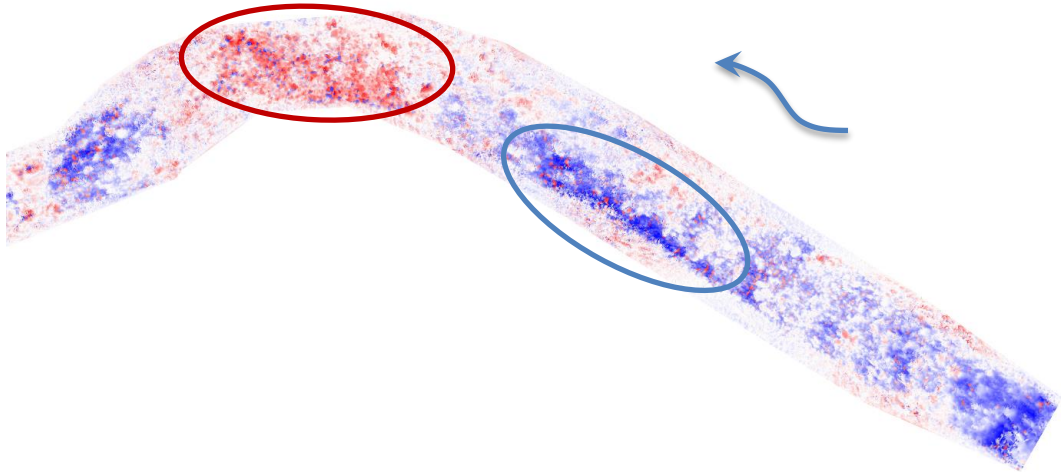


Abbildung 37: Vergleich 3D-Scans A1\_03.1\_Ausgangszustand mit A1\_03.1\_HQ5S\_2.Messung.

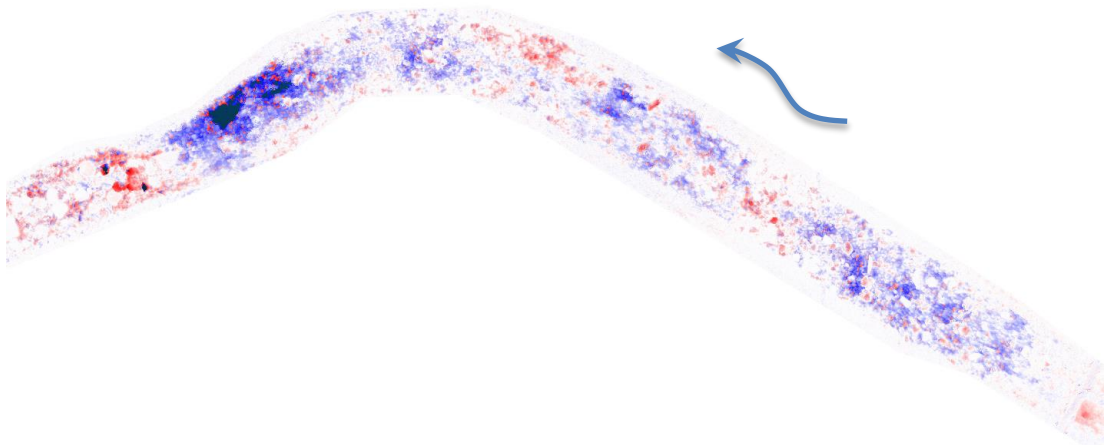


Abbildung 38: Vergleich 3D-Scans A1\_02.1\_Ausgangszustand mit A1\_02.1\_HQ5S\_2.Messung.

Beim Vergleich der Sohlenveränderung nach dem stationären HQ<sub>5</sub> beim Versuch A1\_02.1 (Abbildung 38) und beim Versuch A1\_03.1 (Abbildung 37) ist zu erkennen, dass beim Versuch A1\_03.1 viel mehr Material umgelagert wurde. Die Sohle wurde viel glatter eingebaut, in dem die grossen Blöcke alle in der Sohle versenkt wurden. Da sie nun nicht mehr aus der Sohle herausragten, hatten sie nicht mehr die gleiche stabilisierende Wirkung. Die kleineren Blöcke und Geschiebefractionen konnten zu Beginn des Versuches so besser mobilisiert und abtransportiert werden. Jedoch konnte die Strömungsrinne beim Ausnag der Kurve im Projektperimeter mit der zusätzlichen Sohlensicherung verhindert werden. Der Geschiebeeintrag vom Oberwasser in den Bereich der Linkskurve im Projektperimeter wirkte der Rinnenbildung im Kurvenausenbereich zusätzlich entgegen.

## 8.2 Teilversuch A1\_03.1\_HQ5G

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit einer Ganglinie des fünfjährlichen Hochwassers belastet. Der Spitzenabfluss der Ganglinie betrug  $64.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Der Versuch dauerte rund 44 h. Parallel zur Abflussganglinie wurde das Gerinne mit einer Geschiebeganglinie belastet. Der maximale Geschiebeeintrag lag bei rund  $179 \text{ kg/s}$ .

### Beobachtungen

Dieser Teilversuch war im Versuch A1\_03.1 der erste mit Geschiebeeintrag. Aus dem Messdiagramm (Diagramm 12) und dem Vergleich der 3D-Scans von vor und nach dem Teilversuch (Abbildung 39) ist zu erkennen, dass ein Teil des eingetragenen Materials im Projektperimeter abgelagert und nicht durch das Modell transportiert wurde.

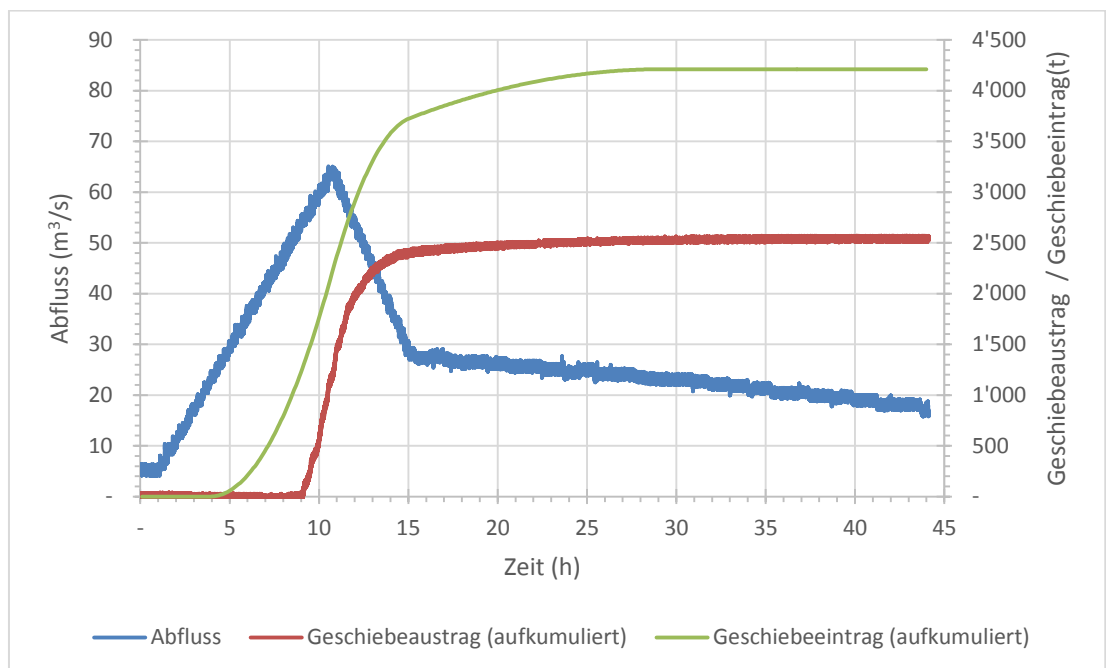


Diagramm 12: Messdiagramm A1\_03.1\_HQ5G.

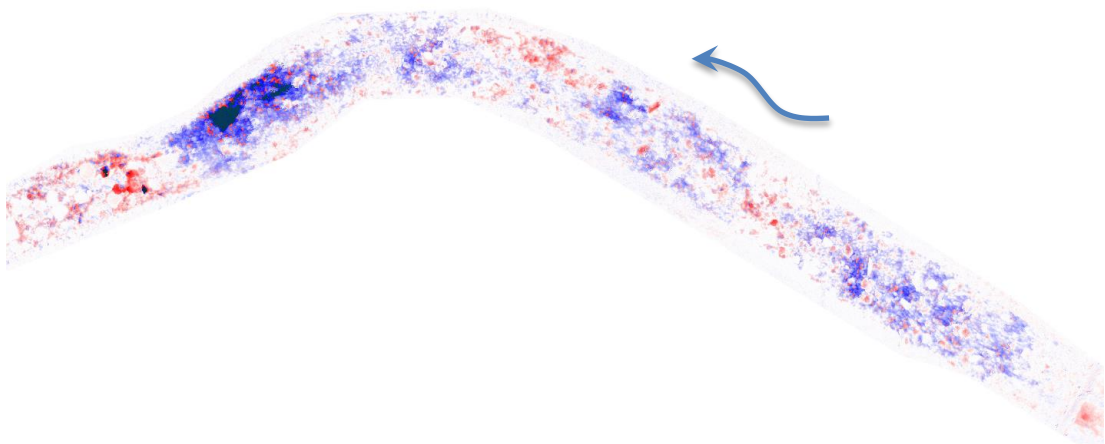


Abbildung 39: Vergleich 3D-Scans A1\_03.1\_HQ5S\_2.Messung mit A1\_03.1\_HQ5G.

### 8.3 Teilversuch A1\_03.1\_HQ30S

#### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit einem dreissigjährigen Hochwasser belastet. Dies entspricht einem Abfluss von  $85.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Geschiebe wurde dem Gerinne nicht beigegeben. Nach rund 1.2 h ist die Sohle des Modells kollabiert.

#### Beobachtungen

Die Sohle ist kurz nach dem hochfahren auf das dreissigjährige Hochwasser kollabiert. Der Beginn des Kollapses ist auf dem Messdiagramm (Diagramm 13) gut ersichtlich (Beginn Anstieg der roten Kurve). Schon früh konnte viel Material mobilisiert werden, dass sich beim abklingenden Ast der Ganglinie vom Teilversuch A1\_03.1\_HQ5G im Gerinne abgelagert hat.

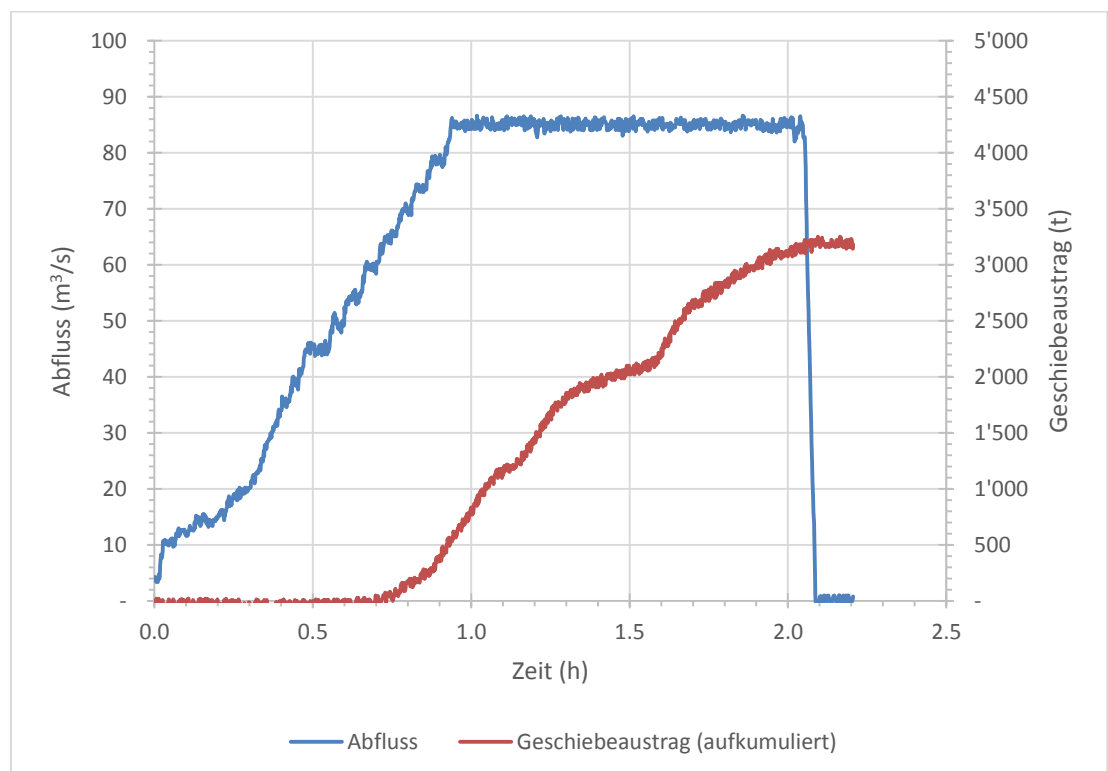


Diagramm 13: Messdiagramm A1\_03.1\_HQ30S.

Die Sohle begann auch dieses Mal wieder auf dem geraden Stück des Projektperimeters vor der Kurve zu kollabieren. Ausgangspunkt war die Rinne, die sich in den vorhergehenden Teilversuchen gebildet hat. Das dreissigjährige Hochwasser vermochte die wenigen Blöcke, die die Sohle im Bereich der gebildeten Rinne stabilisierten, aus der Sohle zu lösen und abzutransportieren. Der Kollaps hatte seinen Ursprung kurz vor Beginn der Kurve im Projektperimeter und breitete sich danach nach oben aus. Es wurde jedoch nicht die gesamte Sohle auf einmal ausgespült, sie kollabierte schubweise. Nach dem die grösseren Blöcke im unteren Bereich abtransportiert wurden, erodierte das feine Material oberhalb bis zur nächsten Anhäufung von grösseren Blöcken. Diese blieben eine gewisse Zeit lang stabil, wurden durch die stärkere Belastung jedoch auch bald aus der Sohle gelöst.

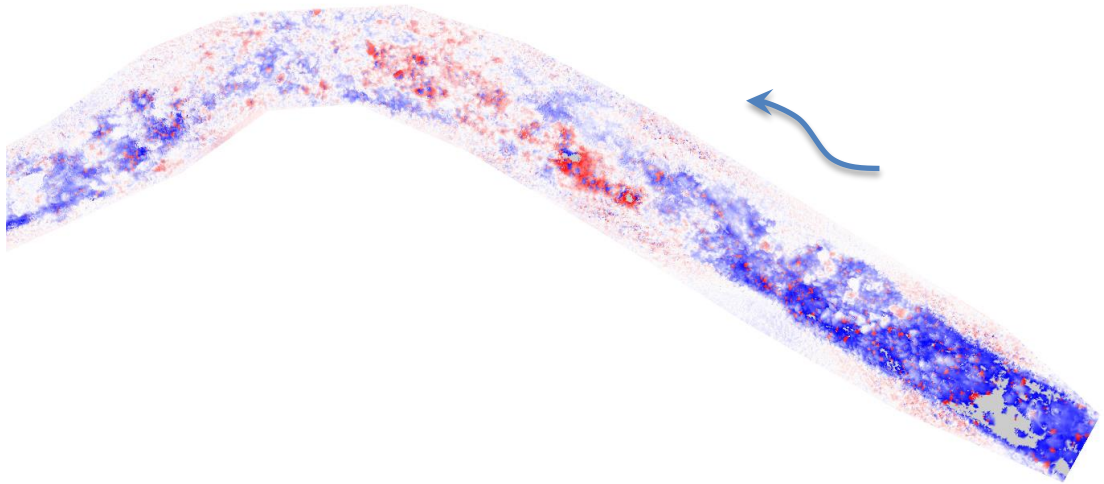


Abbildung 40: Vergleich 3D-Scans A1\_03.1\_HQ5G mit A1\_03.1\_HQ30S.

Abbildung 40 zeigt den Vergleich der 3D-Scans der Teilversuche A1\_03.1\_HQ5G und A1\_03.1\_HQ30S. Die Erosion (blaue Fläche) im oberen Bereich des Projektperimeters ist deutlich zu sehen. Auch die Ablagerung des oben ausgespülten Materials im Bereich vor der Kurve im Projektperimeter (rote Flächen) ist gut zu erkennen.

Nachdem der obere Teil des Projektperimeters bis zum Beginn des Zulaufes erodiert ist, wurde der Versuch abgebrochen.

#### 8.4 Fazit aus dem Versuch A1\_03.1

Dieser Versuch hat erneut aufgezeigt, dass die Beschickung mit Geschiebe einen grossen Einfluss auf die Stabilität der Sohle hat. Die Belastungen der Sohle in Folge von Geschiebeablagerung und Fliessgeschwindigkeitsveränderung (abhängig von der Sohlenrauigkeit) verändert sich mit der Geschiebebeschickung.

Rinnenbildungen im Gerinne verhinderten jedoch oft, dass sich Blöcke zu Stufen formierten. Die Strömung konzentrierte sich folglich in einem gewissen Teil des Querschnitts. Es konnten sich deshalb keine Stufen über die gesamte Breite des Gerinnes bilden, wie es ursprünglich vorgesehen war.

Die Sohle kollabierte in den drei bisherigen Versuchen kollapsartig und die angestrebten Stufen-Becken-Sequenzen liessen sich nur erahnen. Deshalb wurde auf weitere Versuche, die die natürliche Bildung von Stufen-Becken-Sequenzen anstreben, verzichtet. Die Versuchsserie A1 ist somit abgeschlossen. In der Versuchsserie A2 sollen die aus dem Versuch A1\_02.1 eruierten Stufenabmessungen als Grundlage für das künstlich gebaute Stufen-Becken-Gerinne dienen.

## 9 VERSUCHSSERIE A2

### 9.1 Stufenaufbau

Beim Teilversuch A1\_02.1\_91m3sS konnten beim genaueren Betrachten sieben Stufen ermittelt werden. Die durchschnittlichen Abmessungen dieser Stufen wurden als Vorbild für die in der Versuchsserie A2 künstlich gebauten Stufen übernommen.

Der Abstand zwischen den einzelnen Stufen soll 14.0 m betragen. Mit dem projektierten Brutto-Sohlengefälle von 6 % ergibt das eine Höhendifferenz zwischen den einzelnen Stufen von 0.84 m. Damit die ganze Länge des Projektperimeters mit den Stufen gesichert werden kann, braucht es 14 Stufen. Abbildung 41 zeigt die Anordnung der künstlichen Stufen im Projektperimeter. Um den Abfluss von den Böschungen weg zu lenken und den Hauptabfluss in der Mitte des Gerinnes zu konzentrieren, sollen die Stufen leicht gebogen gebaut werden.

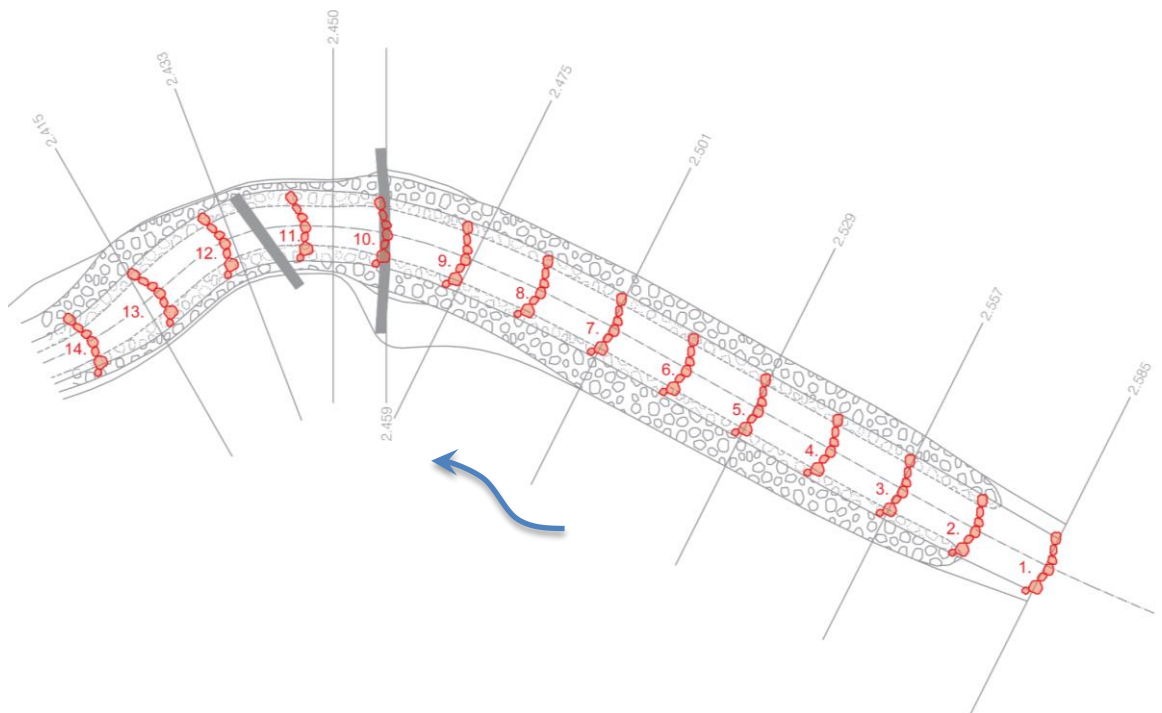


Abbildung 41: Anordnung der künstlichen Stufen im Projektperimeter.

### 9.1.1 Variante 1

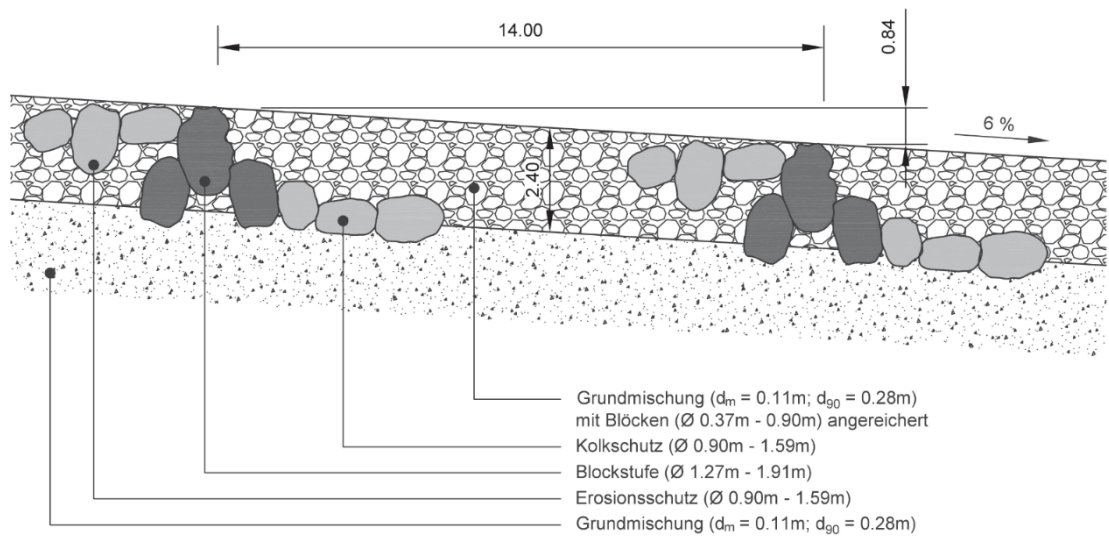


Abbildung 42: Skizze Stufe Variante 1.

Bei den ersten Versuchen mit künstlich eingebauten Stufen war noch nicht bekannt, wie sich die Erosionen vor und hinter den Stufen ausbilden. Die Stufen der ersten Variante wurden genutzt, um erste Erkenntnisse mit gebauten Stufen-Becken-Strukturen zu erlangen.

Bis auf 2.40 m unter der projektierten Sohlenlage wurde die bewegliche Sohle mit der Grundmischung verfüllt. Die beiden Blockreihen aus der zweitgrössten Blockfraktion ( $\text{Ø } 1.27 \text{ m} - 1.59 \text{ m}$ ) wurden hintereinander auf der gleichen Höhe angeordnet. Diese beiden Reihen dienen als Abstützung für die darauf versetzte Blockreihe, die aus der grössten Blockfraktion ( $\text{Ø } 1.59 \text{ m} - 1.91 \text{ m}$ ) besteht. Ober- und Unterwasserseitig wurde die Sohle mit einem Erosionsschutz ( $\text{Ø } 0.90 \text{ m} - 1.59 \text{ m}$ ) versehen. Zum Schluss wurde die Sohle bis auf die projektierte Kote mit der mit den drei kleinsten Blockfraktionen angereicherten Grundmischung aufgefüllt.



Abbildung 43: Variante 1 (Stufe ohne Verfüllung links und mit Verfüllung rechts).



### 9.1.2 Variante 2

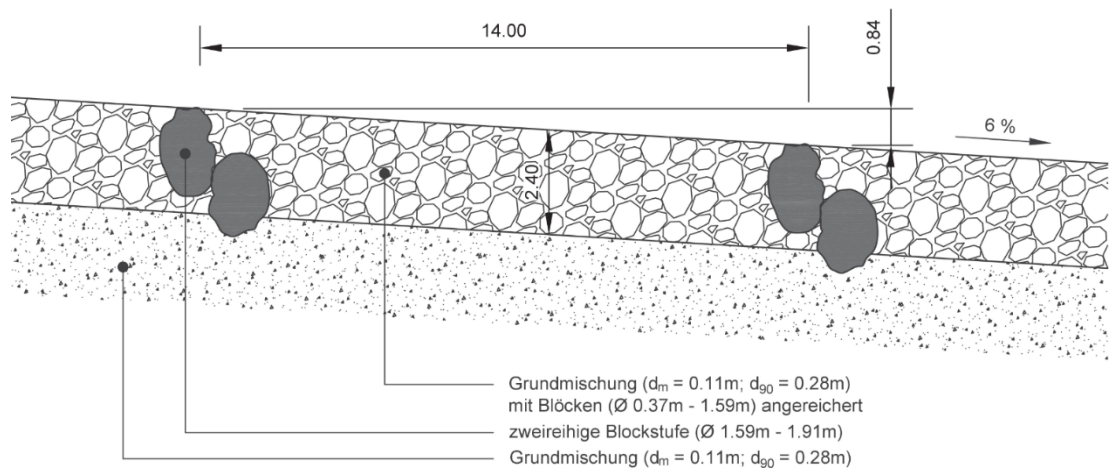


Abbildung 44: Skizze Stufe Variante 2.

Mit Variante 2 sollte untersucht werden, wie sich grosse Blöcke im Bereich zwischen den Stufen anordnen, wenn sie nicht einzeln versetzt werden, sondern wie bei Versuchsserie A1 die Sohle mit der angereicherten Mischung aufgefüllt wird.

Die Sohle wurde wieder bis 2.40 m unter der projektierten Sohle mit der Grundmischung aufgefüllt. Im Gegensatz zur Variante 1 wurde die höher liegende Blockreihe nur mit einer tiefer liegenden Reihe von Blöcken stabilisiert und nicht mit zwei. Dafür wurde die stabilisierende Blockreihe, die Unterwasserseitig angeordnet wurde nun auch mit der grössten Blockfraktion ( $\text{Ø } 1.59 \text{ m} - 1.91 \text{ m}$ ) ausgeführt. Die hier beschriebene Anordnung der beiden Blockreihen, die die Stufen bilden, wird in den folgenden Varianten identisch ausgeführt. Der gesamte Bereich zwischen den einzelnen Stufen wurde bis zur projektierten Sohlenlage mit der Ergänzungsmischung angereicherten Mischung, in welcher jedoch die grösste Blockfraktion fehlte, aufgefüllt.



Abbildung 45: Variante 2 (Stufe ohne Verfüllung links und mit Verfüllung rechts).

### 9.1.3 Variante 3

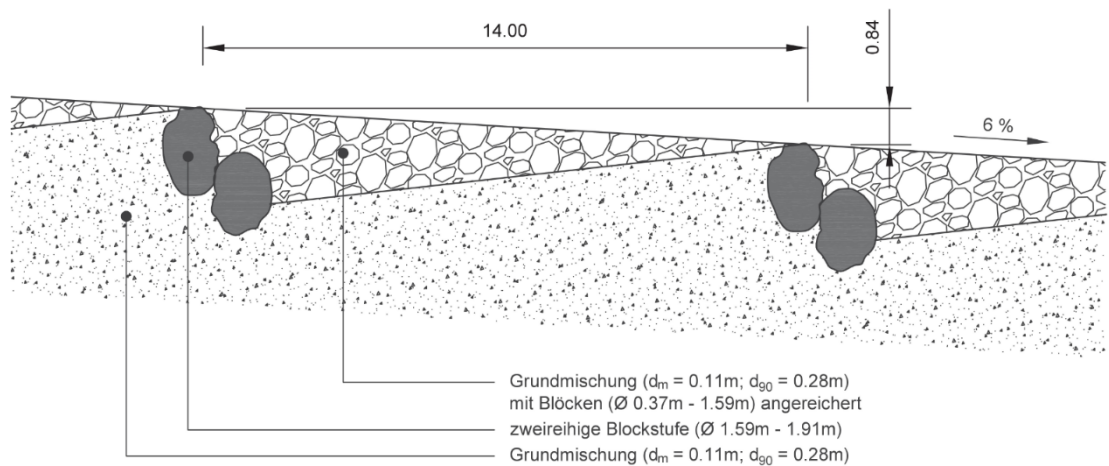


Abbildung 46: Skizze Stufe Variante 3.

Die Variante 3 entspricht baulich bis zum Versetzen der Stufen der vorherigen Variante. Das Platzieren der grossen Blöcke bei der Ausführung ist sehr aufwendig, deshalb wurde bei dieser Variante das Volumen der angereicherten Mischung, die eingebaut wurde, reduziert.

Nach dem bis 2.40 m unter die projektierte Sohle mit der Grundmischung aufgefüllt wurde, wurden die beiden Blockreihen der Stufe gleich wie bei Variante 2 versetzt. Anschliessend wurde der Bereich hinter der Stufe bis zum Fuss der nächsten Stufe mit der Grundmischung aufgefüllt, so dass sich zwischen den beiden Stufen eine Rampe bildete. Der restliche Bereich zwischen den Stufen wurde anschliessend mit der Ergänzungsmischung angereicherten Mischung, in welcher die grösste Blockfraktion fehlte, verfüllt.



Abbildung 47: Variante 3 (Stufe ohne Verfüllung links und mit Verfüllung rechts).

### 9.1.4 Variante 4

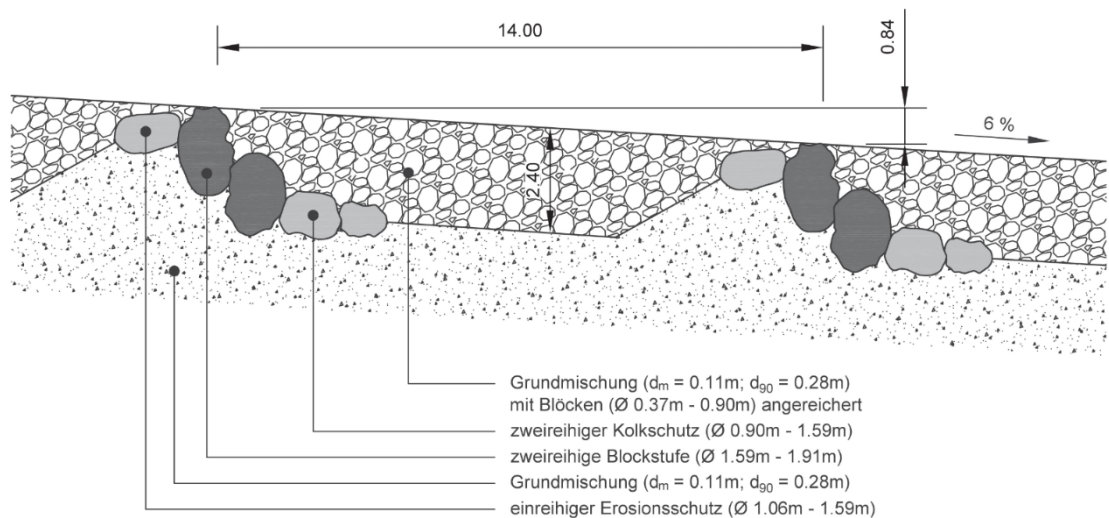


Abbildung 48: Skizze Stufe Variante 4.

Bei der Variante 4 wurden die grösseren Blöcke, die vor zu starker Erosion schützen sollen, von Beginn an so platziert, dass sie dort liegen, wo sie am wirkungsvollsten sind und wurden nicht frei platziert wie bei Variante 2 und 3.

Die Grundmischung und die beiden Blockreihen der Stufen wurden wieder gleich wie bei den zwei vorherigen Varianten eingebaut. Anschliessend wurde oberwasserseitig der Stufen ein einreihiger Erosionsschutz aus der zweit- und drittgrössten Blockfraktion ( $\text{Ø } 1.06\text{ m} - 1.59\text{ m}$ ) erstellt. Damit soll verhindert werden, dass sich die Bereiche zwischen den einzelnen Blöcken zu fest ausspülen und die Sohle oberhalb der Stufen erodiert. Im Unterwasser wurde ein zweireihiger Kolksschutz verbaut. Dafür wurden die viert- bis zweitgrössten Blockfraktionen ( $\text{Ø } 0.90\text{ m} - 1.59\text{ m}$ ) verwendet. Für die Verfüllung zwischen den Stufen, wurde die Grundmischung mit den kleinsten drei Blockfraktionen ( $\text{Ø } 0.37\text{ m} - 0.90\text{ m}$ ) angereichert.

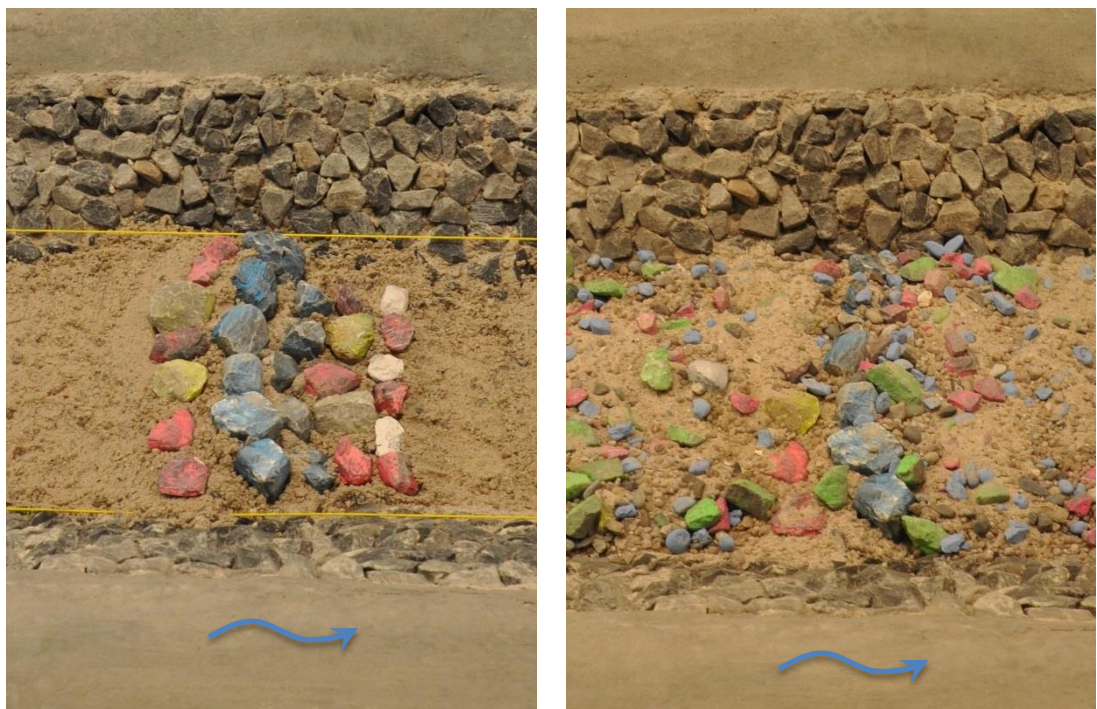


Abbildung 49: Variante 4 (Stufe mit Kolksschutz links und mit Verfüllung rechts).

### 9.1.5 Variante 5

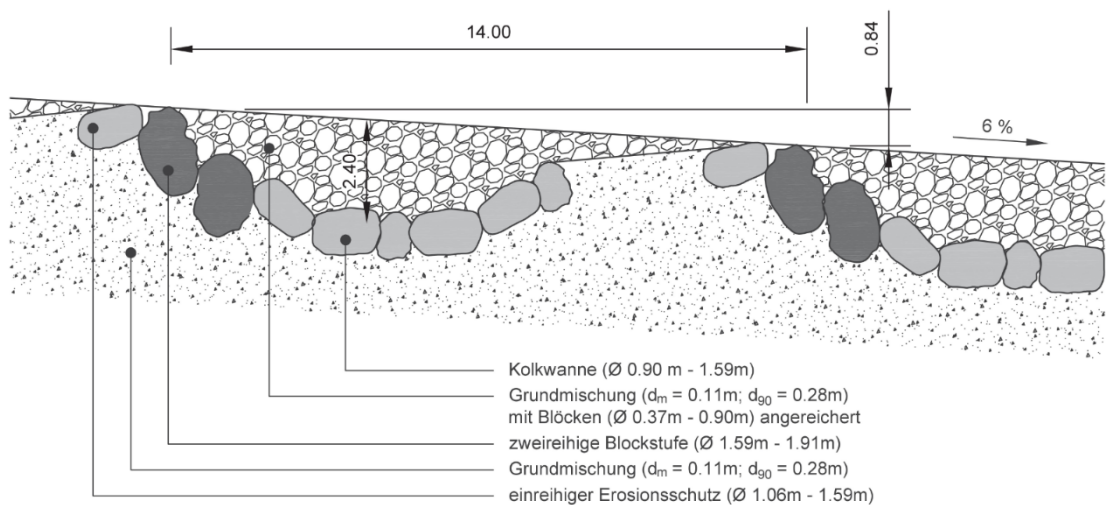


Abbildung 50: Skizze Stufe Variante 5.

Die Variante 5 weist den grössten künstlich verbauten Kolksschutz auf. Die verbaute Kolkwanne soll zum einen die Tiefe der sich bildenden Kolke begrenzen und zum andern den Wassersprung in der Nähe bei der Stufe halten.

Auch hier wurden die ersten Schritte bis zum versetzten der Stufenblöcke wieder identisch wie bei den vorherigen Varianten ausgeführt. Der einreihige oberwasserseitige Kolksschutz wurde gleich wie bei Variante 4 ausgeführt. Im Unterwasser wurde eine Kolkwanne aus den viert- bis zweitgrössten Blockfraktionen (Ø 0.90 m – 1.59 m) erstellt. Am Schluss wurde die Sohle mit den kleinsten drei Blockfraktionen (Ø 0.37 m – 0.90 m) angereicherten Grundmischung bis zur projektierten Sohle verfüllt.

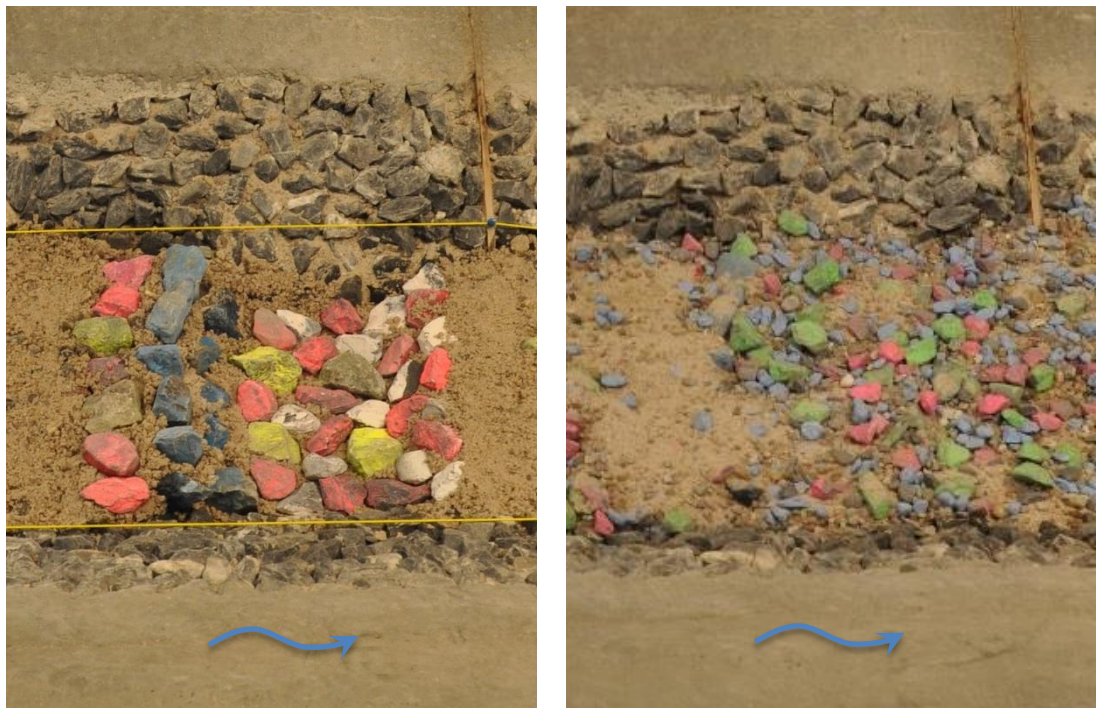


Abbildung 51: Variante 5 (Stufe mit Kolksschutz links und mit Verfüllung rechts).

### 9.1.6 Variante 6

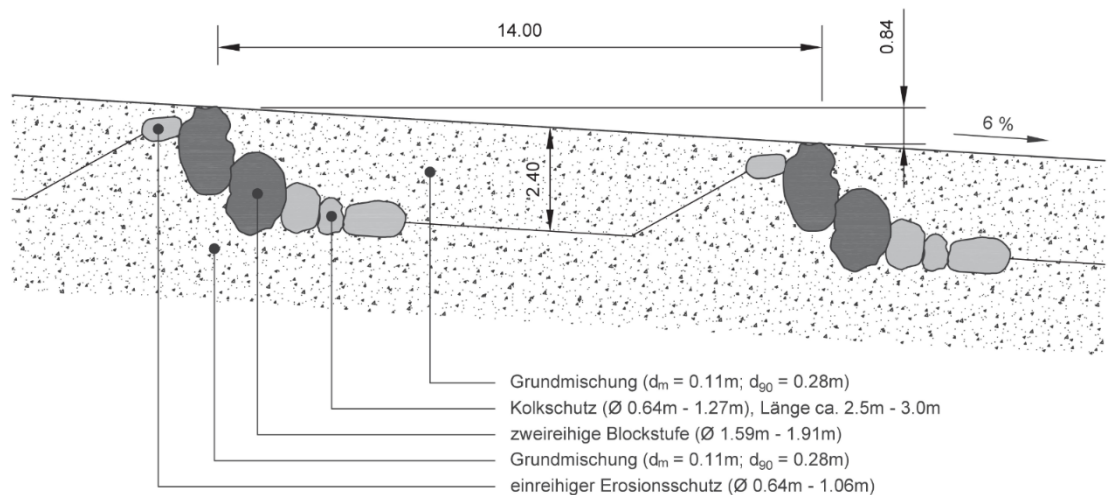


Abbildung 52: Skizze Stufe Variante 6.

Bei der Variante 6 wurde die Anzahl verbauten Blöcke nochmals erheblich reduziert. Alle verwendeten Blöcke wurden schon von Beginn an so versetzt, dass sie einen grösstmöglichen Beitrag gegen die Erosion der Sohle leisten können.

Die beiden Blockreihen der Stufe wurden gleich wie in den vorangegangenen Varianten auf der Grundmischung versetzt. Im Gegensatz zu Variante 4 und 5 wurden die Blöcke für den oberwasserseitigen Erosionsschutz um zwei Fraktionen verkleinert. Folglich wurden Blöcke der viert- und drittgrössten Blockfraktion ( $\varnothing 0.64\text{m} - 1.06\text{m}$ ) verwendet. Auch die Blöcke für den Kolkschutz im Unterwasser wurden kleiner gewählt. Neu wurden Blöcke der fünft- bis drittgrössten Blockfraktionen ( $\varnothing 0.64\text{m} - 1.27\text{m}$ ) verwendet und auf die gleichen Länge wie bei Variante 4 versetzt. Beim Verfüllen der Bereiche zwischen den Stufen wurde ausschliesslich die Grundmischung verwendet und auf die Beimischung von Blockfraktionen verzichtet.

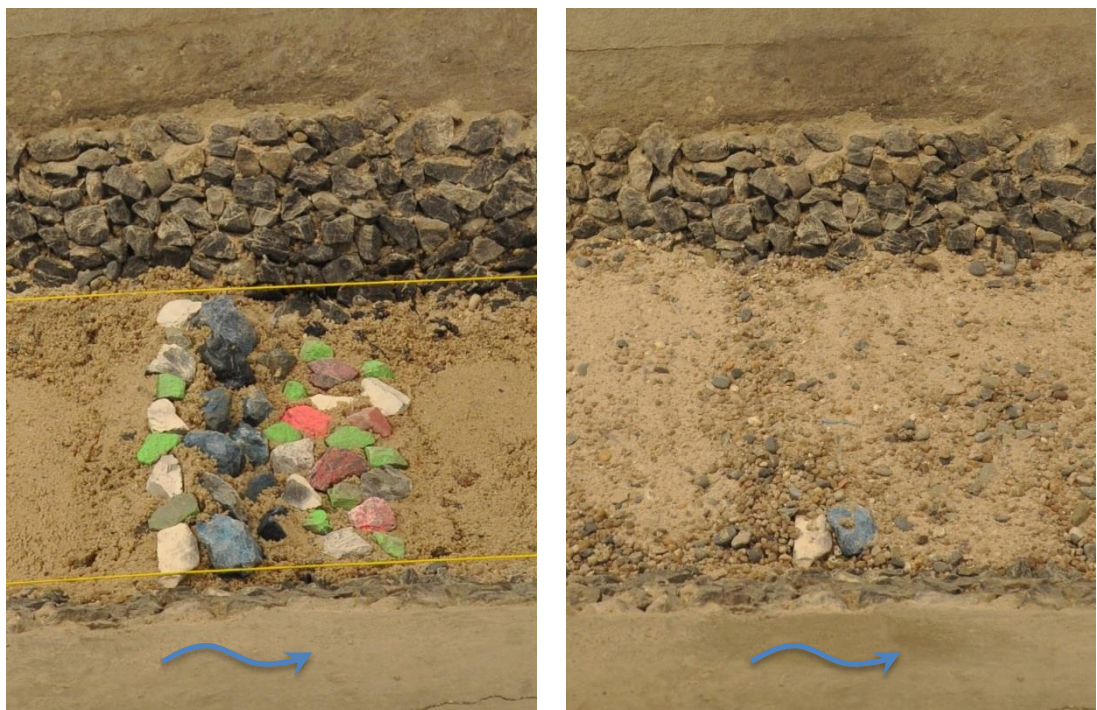


Abbildung 53: Variante 6 (Stufe mit Kolkschutz links und mit Verfüllung rechts).

### 9.1.7 Variante 7

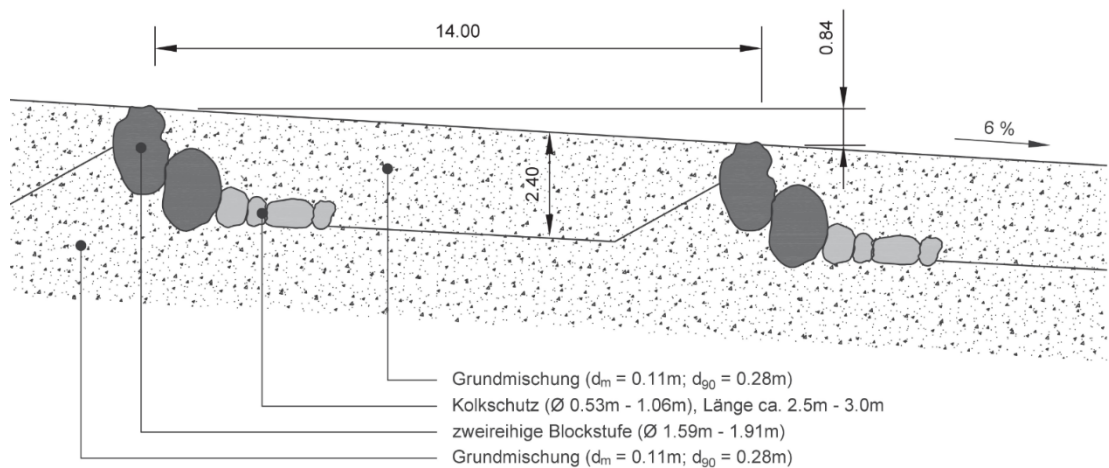


Abbildung 54: Skizze Stufe Variante 7.

Variante 7 war nicht nur die letzte Variante, die überprüft wurde, sondern auch die mit den wenigsten verbauten Blöcken und somit auch die beim Bau günstigsten Variante.

Bis zum Versetzten der beiden Blockreihen der Stufen wurde auch in dieser Variante gleich vorgegangen wie in den vorherigen Varianten. Auf den Erosionsschutz oberhalb der Stufen wurde jedoch ganz verzichtet. Beim Belasten der Varianten mit dem oberwasserseitigen Erosionsschutz hat sich gezeigt, dass die Stufen den Belastungen auch standhielten, wenn diese Blöcke teilweise weggespült wurden. Deshalb soll diese Variante zeigen, ob sich die Wasserspiegellage im Oberwasser wesentlich verändert, wenn dort der Erosionsschutz fehlt. Der Blockfraktionen für den Kolksschutz im Unterwasser wurden im Vergleich zur Variante 6 um eine Fraktion kleiner gewählt. Somit wurden jetzt die sechst- bis viertgrössten Blockfraktionen ( $\text{Ø } 0.53\text{m} - 1.06\text{m}$ ) verwendet. Der Bereich zwischen den Stufen wurde mit der Grundmischung verfüllt.

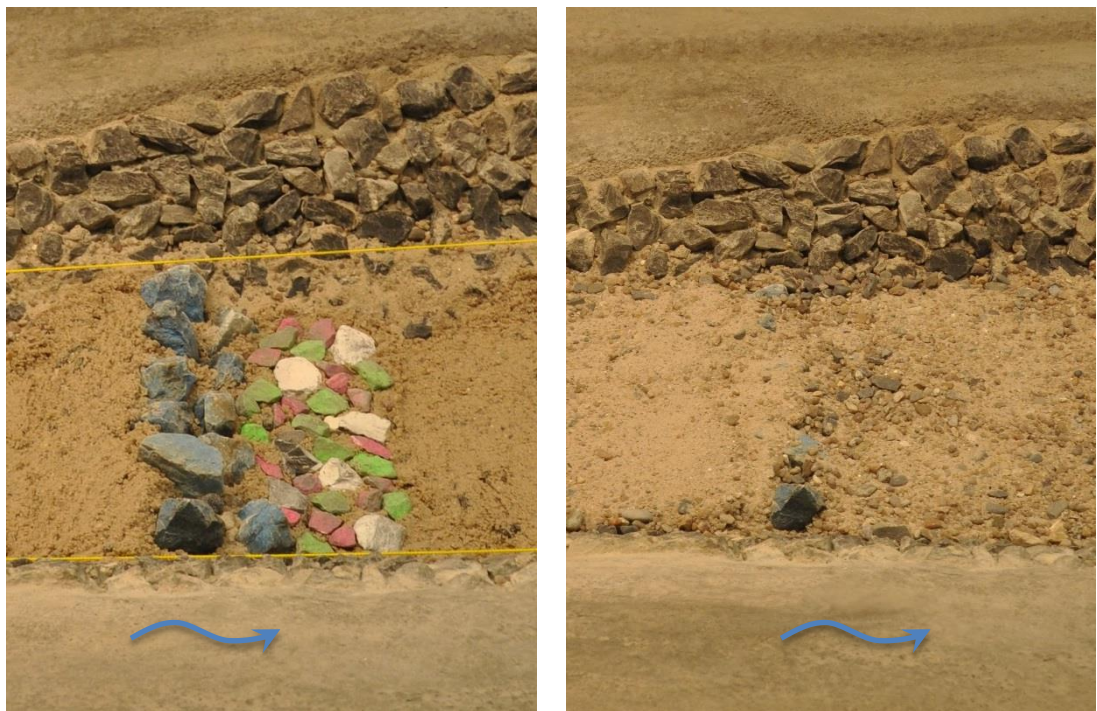


Abbildung 55: Variante 7 (Stufe mit Kolksschutz links und mit Verfüllung rechts).

## 10 VERSUCH A2\_01.1

### Einbau Sohle

Dieser Versuch war der erste mit künstlich gebauten Stufen. Deshalb konnte nicht geahnt werden, wie die Stufen auf die Belastung reagieren. Um den Aufwand für den Einbau der Sohle zu reduzieren, wurde entschieden, die Sohle nicht im ganzen Projektperimeter einzubauen. Vorerst wurden nur die ersten sechs Stufen der insgesamt 14 geplanten eingebaut. Diese wurden gemäss Variante 1 aufgebaut. Wie auf Abbildung 56 ersichtlich, wurde an der Stelle, wo die siebte Stufe verbaut werden sollte, eine provisorische Sperre aus PVC eingebaut. Da die Sohle nur im Bereich der ersten sechs Stufen eingebaut wurde, konnten somit Einflüsse des Bereichs unterhalb der provisorischen Sperre verhindert werden.

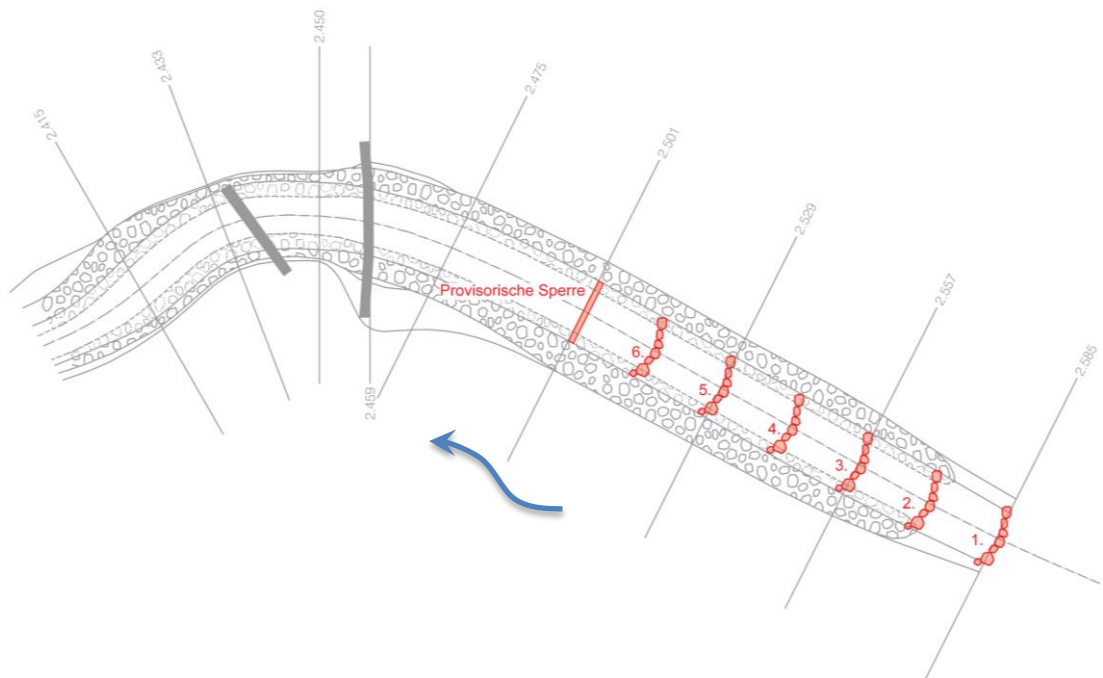


Abbildung 56: Projektperimeter mit für den Versuch A2\_01.1 eingebauten Stufen.

### Abflüsse

Bei dieser Versuchsserie ging es nicht darum auf natürliche Weise eine Stufenbildung zu erreichen, sondern die künstlich gebauten Stufen einem Belastungstest zu unterziehen. Ein Teil des Materials, das für die Verfüllung der Beckenbereiche eingebracht wurde, sollte auch bei dieser Versuchsserie ausgespült werden. Im Bereich nach den Stufen sollten sich Kolklöcher bilden. Diese Prozesse dauern jedoch nicht so lange wie bei der natürlichen Bildung der Stufen-Becken-Sequenzen. Aus diesem Grund war es nicht notwendig die stationären Abflüsse so lange wie in der Versuchsserie A1 zu halten. Auf die Beschickung mit Geschiebe wurde verzichtet. So konnte in kurzer Zeit ein erster Eindruck der Stabilität und Belastbarkeit der entworfenen Stufen gewonnen werden.

Diagramm 14 zeigt die Abflusssteigerung beim Versuch. Zu Beginn wurde der Abfluss allmählich auf das  $HQ_5$  ( $64.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) hochgefahren. Anschliessend wurde der Abfluss in einem Intervall von 2.8 h um  $5.0 \text{ m}^3/\text{s}$  bis zum  $HQ_{100}$  ( $98.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) gesteigert. Ab dem  $HQ_{100}$  wurde das Intervall für die Abflusserhöhung auf 1.4 h reduziert. Der Abfluss wurde in Schritten von  $5.0 \text{ m}^3/\text{s}$  weiter gesteigert bis kurz vor dem  $HQ_{300}$  ( $115.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) die Stufe Nr. 3 beschädigt wurde. Um die Stufe zu reparieren, wurde wie in Diagramm 14 rot eingezeichnet (der Unterbruch dauerte länger als im Diagramm aufgeführt), runtergefahren und anschliessend wieder auf den gleichen Wert hochgefahren. Der Abfluss wurde weiter gesteigert, bis die obersten drei Stufen (Nr. 1 bis 3) bei einem Abfluss von  $123.3 \text{ m}^3/\text{s}$  zerstört wurden.

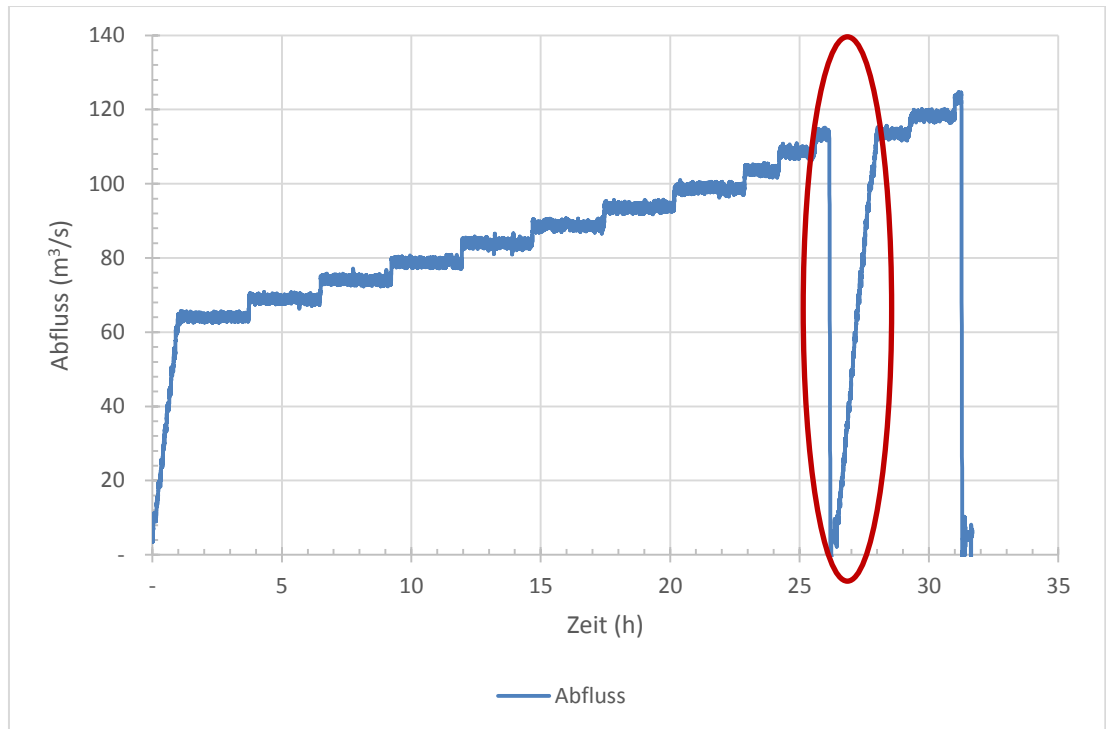


Diagramm 14: Messdiagramm Abfluss A2\_01.1.

### Beobachtungen

Das Ziel dieses Versuches war es mit den Abflüssen die Feianteile unterhalb der gebauten Stufen auszuwaschen, so dass sich nach den Stufen die erwünschten Becken bilden. Die Bildung dieser Becken begann schon sehr früh, jedoch bildeten sich nicht alle Becken gleichmässig und zum gleichen Zeitpunkt aus. Auf Abbildung 57 ist die ungleichmässige Beckenbildung beim  $HQ_5$  zu erkennen. Unterhalb der dritten Stufe hat sich bereits ein Becken gebildet, jedoch ist der Bereich nach der vierten Stufe noch mit der feinen Geschiebemischung verfüllt.

Während dem gesamten Versuch war diese ungleichmässige Beckenbildung zu erkennen. Teilweise haben sich einzelne Becken gebildet und andere wurden mit dem ausgetragenen Material wieder verfüllt. Schlussendlich bildeten sich jedoch über den ganzen Projektperimeter die Becken aus.



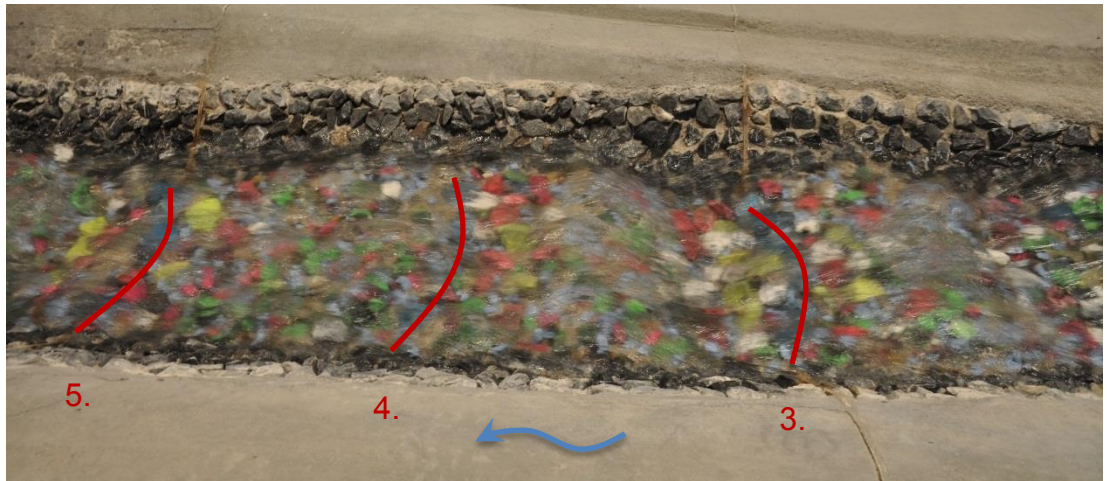


Abbildung 57: Ungleichmässige Beckenbildung bei HQ<sub>5</sub>.

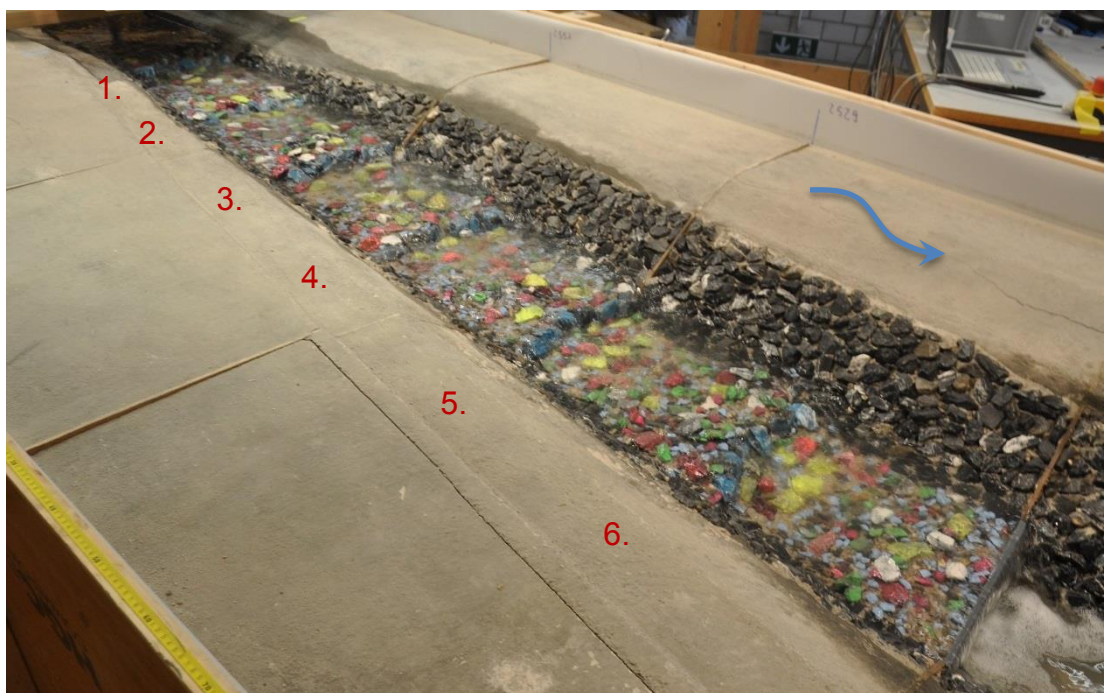


Abbildung 58: Gebildete Becken bei Niederwasser vor Reparatur der 3. Stufe.

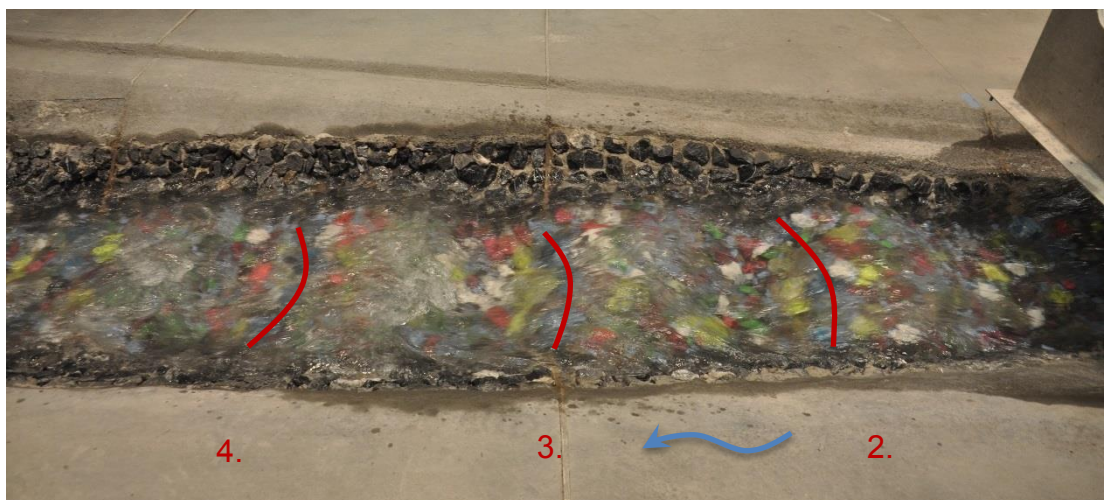


Abbildung 59: Gebildete Becken bei HQ<sub>100</sub>.

Während dem Versuch wurden zwei Mal Stufen beschädigt oder zerstört. Beim ersten Mal wurde die dritte Stufe kurz vor dem  $HQ_{300}$  ( $115.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) bei einem Abfluss von  $113.4 \text{ m}^3/\text{s}$  beschädigt. Als die gelben, stabilisierenden Blöcke unterhalb der blauen weggespült wurden, wurde der Versuch unterbrochen, damit sich die Zerstörung nicht weiter ins Oberwasser ausbreiten kann. So konnte die Stufe repariert und mit dem Versuch fortgefahren werden.

Nach dem der Abfluss wieder hochgefahren wurde, vermochte das Wasser bei einem Abfluss von  $123.3 \text{ m}^3/\text{s}$  die ersten drei Stufen zerstören. Als erstes lösten sich bei der ersten Stufe die Reihe mit den blauen Blöcken, aufgrund der geringeren Sohlenbreite und der damit verbundenen höheren Belastung. Innerhalb kürzester Zeit wurden die gelösten Blöcke ins Unterwasser getragen und haben, als sie durch das Wasser abtransportiert wurden, die zweite und dritte Stufe beschädigt. Abbildung 61 zeigt die Stufen Nr. 1 bis 3 nachdem sie zerstört wurden. Wenn die ursprünglichen Stufen nicht mit roten Linien markiert wären, könnte nur noch erahnt werden wo sie vor der Zerstörung platziert gewesen wären.



Abbildung 60: Zerörter Kolkschutz bei Stufe Nr. 3 nach  $113.4 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Abbildung 61: Zerörte Stufen Nr. 1 bis 3 nach  $123.3 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 10.1 Fazit aus dem Versuch A2\_01.1

Die künstlich eingebauten Stufen hielten den Abflüssen stand und wurden erst beim  $HQ_{300}$  ernsthaft beschädigt. Somit wurde aufgezeigt, dass die Stufenabmessungen sinnvoll sind und in den kommenden Versuchen beibehalten werden können. Es wurden jedoch sehr viele Blöcke im Gerinne platziert, die nicht notwendig gewesen wären, da sie entweder nicht freigespült wurden oder für die Stabilität nicht notwendig gewesen wären. Mit einer Reduktion und der Optimierung der Anordnung der Blöcke kann der Aufwand beim Stufenbau und somit auch die Baukosten reduziert werden.

## 11 VERSUCH A2\_02.1

### Einbau Sohle

Die eingebauten Stufen in Versuch A2\_01.1 haben den hohen Abflüssen sehr gut standgehalten. In diesem Versuch sollte untersucht werden, ob die Stufen den Abflüssen genau gleich standhalten, wenn nur die Blöcke, die die eigentliche Stufe bilden, künstlich eingebaut werden und die Bereiche zwischen den Stufen mit der angereicherten Mischung verfüllt werden. Die Blöcke in der angereicherten Mischung sollten sich selbst so formieren, dass sie vor allem im Bereich vor und nach den Stufen eine ungewünscht grosse Erosion der Sohle verhindern. Wie beim vorhergehenden Versuch wurden erneut nur die ersten sechs Stufen eingebaut. Alle sechs Stufen wurden gemäss Variante 2 eingebaut. An Stelle der Stufe Nr. 7 befindet sich nach wie vor die provisorische Sperre aus PVC, um den Bereich mit den Stufen zu sichern.

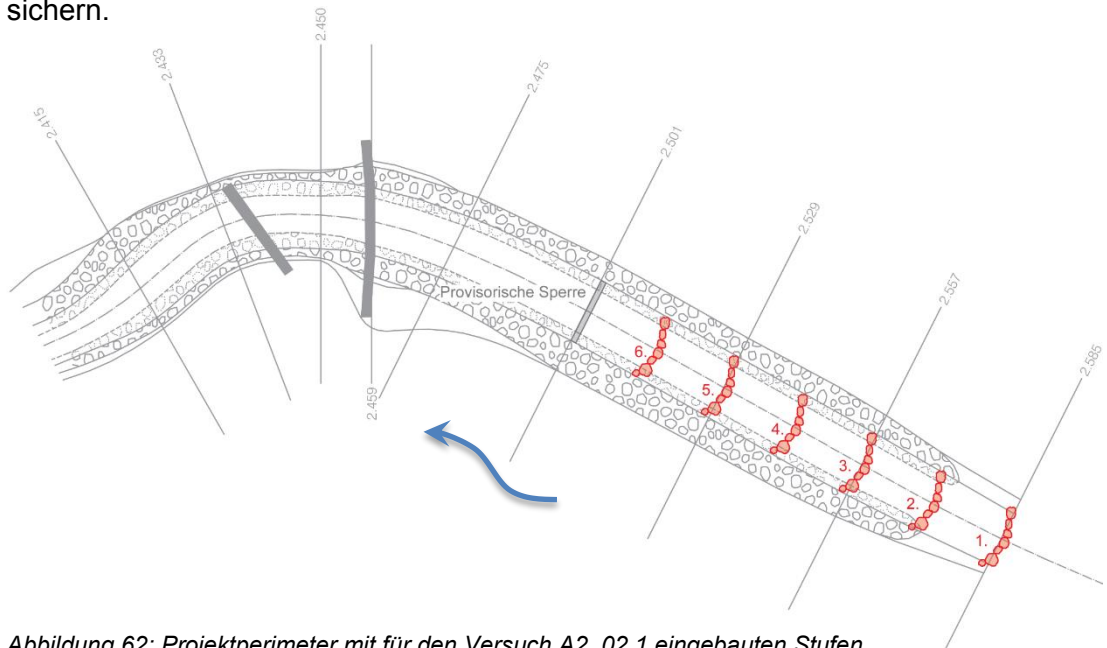


Abbildung 62: Projektperimeter mit für den Versuch A2\_02.1 eingebauten Stufen.

### Teilversuche und Abflüsse

Teilversuch	Beschreibung
A2_02.1_HQ5	Abflusssteigerung in Intervallen von 0.9 h um je 5.0 m <sup>3</sup> /s bis HQ <sub>5</sub> (64.0 m <sup>3</sup> /s ohne Geschiebe)
A2_02.1_HQ30	Abflusssteigerung ab HQ <sub>5</sub> in Intervallen von 2.8 h um je 5.0 m <sup>3</sup> /s bis HQ <sub>30</sub> (85.0 m <sup>3</sup> /s ohne Geschiebe)
A2_02.1_HQ100G	HQ <sub>100</sub> Ganglinie (98.0 m <sup>3</sup> /s mit Geschiebe reduziert)
A2_02.1_HQ300G	HQ <sub>300</sub> - Überlastfall Ganglinie (115.0 m <sup>3</sup> /s mit Geschiebe reduziert)

Tabelle 9: A2\_02.1, Beschreibung Teilversuche.

Die einzelnen Teilversuche sind aufbauend und schliessen an die vorhergehenden Versuche an. Dazwischen wurden keine Eingriffe in der Sohle vorgenommen, ausser es wird in diesem Bericht explizit erwähnt.

## 11.1 Teilversuch A2\_02.1\_HQ5

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde der Abfluss in Intervallen von rund 0.9 h um je  $5.0 \text{ m}^3/\text{s}$  erhöht bis das  $HQ_5$  ( $64.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) erreicht wurde. Anschliessend wurde der Abfluss beim  $HQ_5$  für rund 2.8 h gehalten. Am Ende wurde der Abfluss während rund 1.0 h heruntergefahren. Der ganze Teilversuch dauerte rund 14 h und Geschiebe wurde dem Gerinne nicht zugeführt.

### Beobachtungen

Bei diesem Teilversuch sollte unter anderem überprüft werden, welche Einflüsse die Geschwindigkeit beim Hochfahren auf den anfänglichen Geschiebeausstrag hat. Nachdem das  $HQ_5$  erreicht und rund 2.8 h gehalten wurde, wurde der Abfluss wieder heruntergefahren und die Sohle wurde vermessen.

Abbildung 63 zeigt den Bereich mit den eingebauten Stufen beim  $HQ_5$ . Die Strukturen der Stufen sind noch nicht sehr deutlich zu sehen. Die Becken und Stufen sind vor allem im unteren Teil nicht zu sehen. Die feinen Fraktionen wurden teilweise ausgetragen und die Sohle wurde somit gröber, der Abfluss beim  $HQ_5$  vermochte die grösseren Fraktionen und Blöcke jedoch nicht so zu verschieben und anordnen, dass sich die gewünschten Becken nach den eingebauten Stufen bilden konnten.



Abbildung 63: Sohle mit eingebauten Stufen beim  $HQ_5$ .

## 11.2 Teilversuch A2\_02.1\_HQ30

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde der Abfluss zu Beginn wieder langsam auf das  $HQ_5$  hochgefahren und anschliessend in Intervallen von rund 2.8 h um je  $5.0 \text{ m}^3/\text{s}$  erhöht bis das  $HQ_{30}$  ( $85.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) erreicht wurde. Anschliessend wurde der Abfluss beim  $HQ_{30}$  für rund 2.8 h gehalten. Am Ende wurde der Abfluss während 1.5 h heruntergefahren. Der ganze Teilversuch dauerte rund 13.6 h und Geschiebe wurde dem Gerinne nicht zugeführt.

### Beobachtungen

Beim Verfüllen der Stufen wurde die mit den Blöcken angereicherte Mischung frei in den Bereichen zwischen den Becken verteilt. Es wurde nicht wie beim Teilversuch A2\_01.1 darauf geachtet, wo genau die grösseren Blöcke liegen. Das Wasser sollte sie so umlagern, dass sie die Sohle vor grösseren Erosionen schützen. Abbildung 64 zeigt den Vergleich des 3D-Scans beim Ausgangszustand und nach dem  $HQ_{30}$ . Die blauen Flächen zeigen an, dass in diesen Bereichen die Sohle abgetragen wurde. Bei einem Stufen-Becken-System sollten die Bereiche nach den Stufen blau eingefärbt sein und nicht die Bereiche vor der Stufe. Die Reihe von blauen Blöcken wurde nicht nur im Unterwasser freigespült sondern auch im Oberwasser. Abbildung 65 zeigt im Hintergrund die vierte und in der Bildmitte die fünfte Stufe. Auch auf dem Foto ist zu erkennen, dass sich in der Mitte zwischen Stufe vier und fünf eine zusätzliche Stufe gebildet hat und die Blöcke, die die Stufe bilden sollten, oberhalb freigespült wurden. Das Wasser fliesst nun zwischen den Blöcken durch.

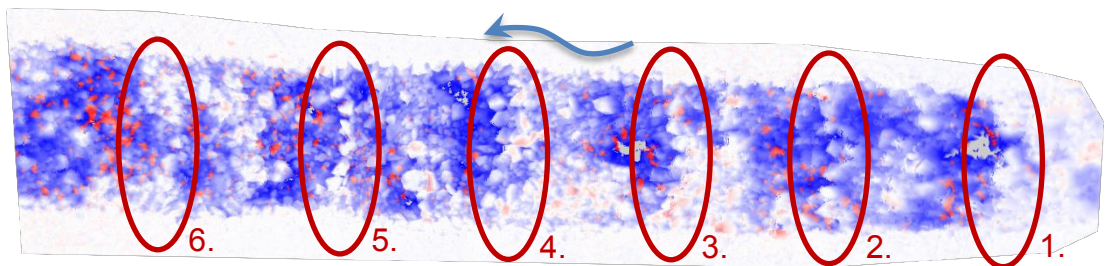


Abbildung 64: Vergleich 3D-Scans A2\_02.1 Ausgangszustand mit  $HQ_{30}$



Abbildung 65: Stufe 5 beim Niederwasser nach  $HQ_{30}$ .

### 11.3 Teilversuch A2\_02.1\_HQ100G

#### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit einer Ganglinie des hundertjährigen Hochwassers belastet. Der Spitzenabfluss der Ganglinie betrug  $98.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Nach 15.7 h wurde der Versuch zurückgefahren. Parallel zur Abflussganglinie wurde das Gerinne mit der reduzierten Geschiebeganglinie belastet. Der maximale Geschiebeeintrag lag bei rund  $329 \text{ kg/s}$ .

#### Beobachtungen

Während der Belastung mit der HQ<sub>100</sub>-Ganglinie und der reduzierten Geschiebebeschickung wurde sehr viel Material umgelagert. Ein grosser Anteil der Blöcke, die mit der Mischung zwischen den Stufen eingebracht wurden, wurde aus dem verkürzten Perimeter ausgetragen. Bei dieser Materialumlagerung wurden auch die Zwischenstufe vor der Stufe Nr. 5 erodiert (Vergleich Abbildung 64 und Abbildung 66). Die Sohle wurde im Allgemeinen feiner, da die groben Blöcke ausgetragen wurden und sich feines Material von der Beschickung zwischen den Stufen abgelagert hat.

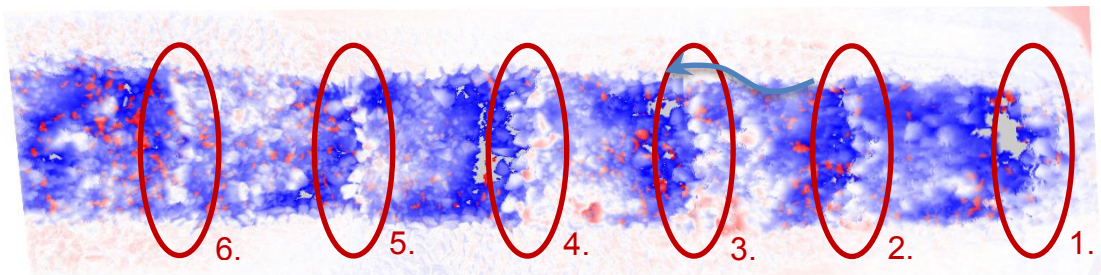


Abbildung 66: Vergleich 3D-Scans A2\_02.1\_Ausgangszustand mit A2\_02.1\_HQ100G.

Auf Abbildung 67 ist zu erkennen, dass sich bei Stufe Nr. 3 (in Fließrichtung am linken Ufer) und 4 (auf der oberen Blockreihe) einige der grossen Blöcke abgelagert haben. Diese Blöcke sind für die Stabilität der Stufen ungünstig. Sie beeinflussen die Strömung, was zu grösseren Kolken oder ungleichmässiger Belastung der Stufen führt.



Abbildung 67: Stufe Nr. 2 - 5 bei Niederwasser nach der HQ<sub>100</sub> Ganglinie.

## 11.4 Teilversuch A2\_02.1\_HQ300G

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit der Ganglinie des dreihundertjährigen Hochwassers kombiniert mit dem Überlastfall belastet. Während der Abflussganglinie wurde das Gerinne mit Geschiebe belastet. Der Spitzenabfluss der Ganglinie betrug  $115.0 \text{ m}^3/\text{s}$  und der maximale Geschiebeeintrag  $401 \text{ kg/s}$ . Nach rund 16.6 h wurde der Teilversuch aufgrund eines Kollapses unterbrochen.

### Beobachtungen

Die sechs eingebauten Stufen haben die Abflussspitze beim  $HQ_{300}$  unbeschadet überstanden. Die Stufen kamen erst an ihre Belastungsgrenzen als der Abfluss nach der Spitze bis zum  $HQ_{100}$  herunter gefahren und die Geschiebezufuhr gestoppt wurde.

Alle Stufen haben die Belastung durch den Spitzenabfluss ( $HQ_{300}$ ) gut überstanden, obwohl sich die Kolke nach den Stufen ungleichmässig gebildet haben. Die ungleichmässige Kolkbildung ist auf Abbildung 68 gut zu erkennen. Nach der Stufe Nr. 1 hat sich kein Wassersprung eingestellt, bei der Stufe Nr. 2 ist jedoch ein klarer Wassersprung zu erkennen. Nach dem die Geschiebezufuhr beim  $HQ_{100}$  ganz herunter gefahren wurde, lösten sich die blauen Blöcke aus der oberen Blockreihe der zweiten Stufe. Auf Abbildung 69 ist gut ersichtlich wie sich danach die Strömung im Bereich der ersten vier Stufen verändert hat. Durch den fehlenden Fixpunkt im Unterwasser hat sich nach der ersten Stufe der Kolk vergrössert. Dieser wurde immer tiefer und das Sohlenmaterial konnte ungehindert ins Unterwasser transportiert werden. Der Kolk wurde so tief, dass die untere Blockreihe der ersten Stufe so stark freigespült wurde und die gesamte erste Stufe in den Kolk abgerutscht ist. Kurz darauf wurde der Abfluss heruntergefahren, damit nicht der ganze Zulaufbereich ausgespült wird. Auch wenn die Sohle nach dem Kollaps nur noch kurz den Belastungen durch den abklingenden Abfluss ausgesetzt war, wurde verhältnismässig viel Sohlenmaterial aus dem Zulaufbereich in den Projektperimeter geschwemmt. Die feine Grundmischung ist in Abbildung 70 deutlich zu erkennen. Zusätzlich ist ersichtlich, dass die ersten beiden Stufen nur noch zu erahnen sind und keinen Beitrag zur Stabilität des Gerinnes mehr beitragen.

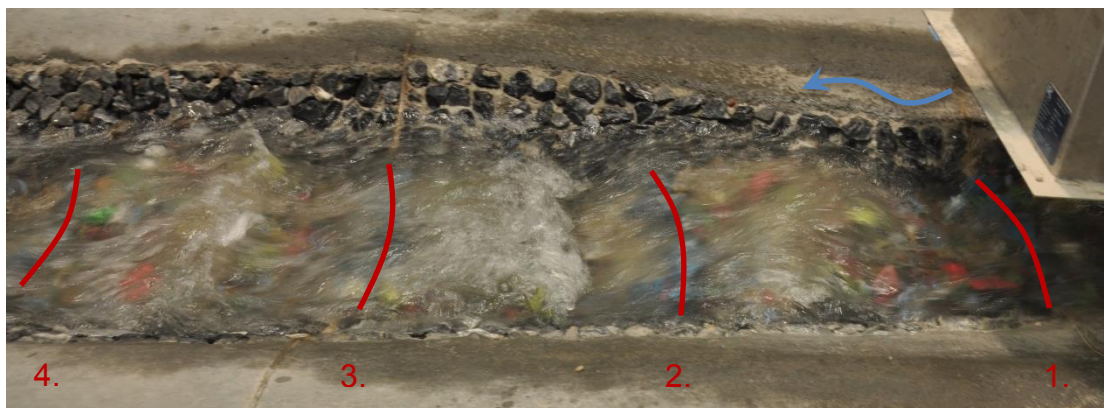


Abbildung 68: Stufen Nr. 1 - 4, bei  $HQ_{100}$  kurz nach Unterbrechung Geschiebezufuhr.

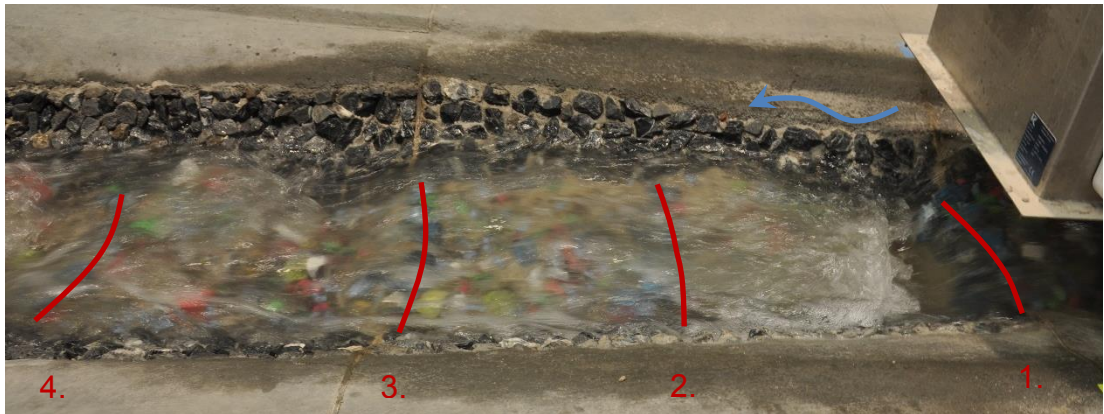


Abbildung 69: Stufen Nr. 1 - 4, bei  $HQ_{100}$  kurz vor Kollaps.



Abbildung 70: Stufen Nr. 1 - 4, nach Kollaps ohne Abfluss.

## 11.5 Fazit aus dem Versuch A2\_02.1

Der Versuch A2\_02.1 hat gezeigt, dass die Stufen grundsätzlich grossen Belastungen standhalten. Der Kollaps trat erst ein als beim Überlastfall die Geschiebezufuhr komplett gestoppt wurde. Die nächsten Versuche sollen nun auf den gesamten Projektperimeter ausgeweitet und alle 14 Stufen eingebaut werden.

Die Anzahl Blöcke, die im Projektperimeter verbaut werden, kann noch optimiert, beziehungsweise reduziert werden. Der Versuch hat gezeigt, dass sich Blöcke teilweise an Stellen formiert haben, wo sie keinen Beitrag zur Stabilität der Stufen beitragen. Sondern eher im Gegenteil, die Strömung teilweise negativ beeinflussen. Deshalb wird die Anzahl Blöcke in den nächsten Versuchen in den weniger stark belasteten Bereichen reduziert. Bereiche, die der Strömung weniger stark exponiert sind, sollen mit der Grundmischung verfüllt werden und die grossen Blöcke dort platziert werden, wo sie die Sohle am meisten vor Erosionen schützen.

Bei beiden Versuchen mit den künstlich eingebauten Stufen wurde die erste Stufe beschädigt. Das projektierte Gerinne weitet sich zwischen der ersten und der dritten Stufe von 10.0 m auf 12.0 m auf. Die geringere Breite des Überfalls bei der ersten Stufe hat einen erhöhten spezifischen Abfluss zur Folge. Dadurch wird automatisch auch die Belastung der Stufe und des dazugehörigen Kolksschutzes erhöht. Um ein erneutes Kollabieren der ersten Stufe zu verhindern, soll die Stufe beim Sohleneinbau für den nächsten Versuch in Mörtel versetzt werden. So wird ein Fixpunkt erstellt, der bei einem Kollaps im Projektperimeter verhindert, dass sich die daraus folgende Erosion in den Zulaufbereich ausbreitet.



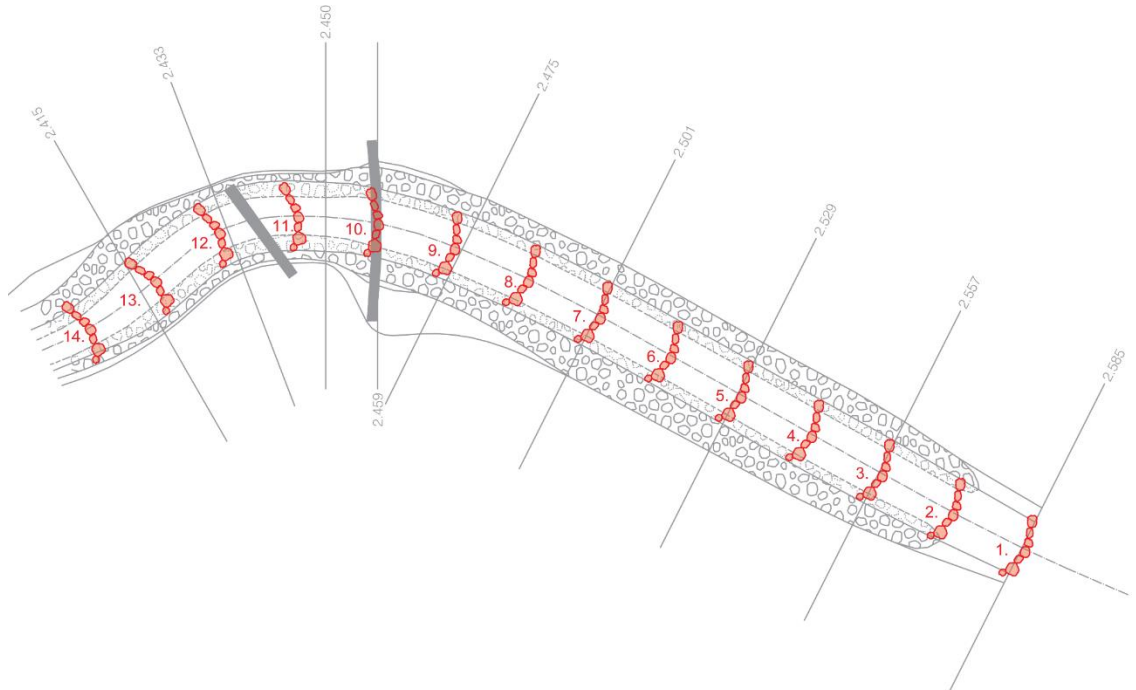
## 12 VERSUCH A2\_03.1

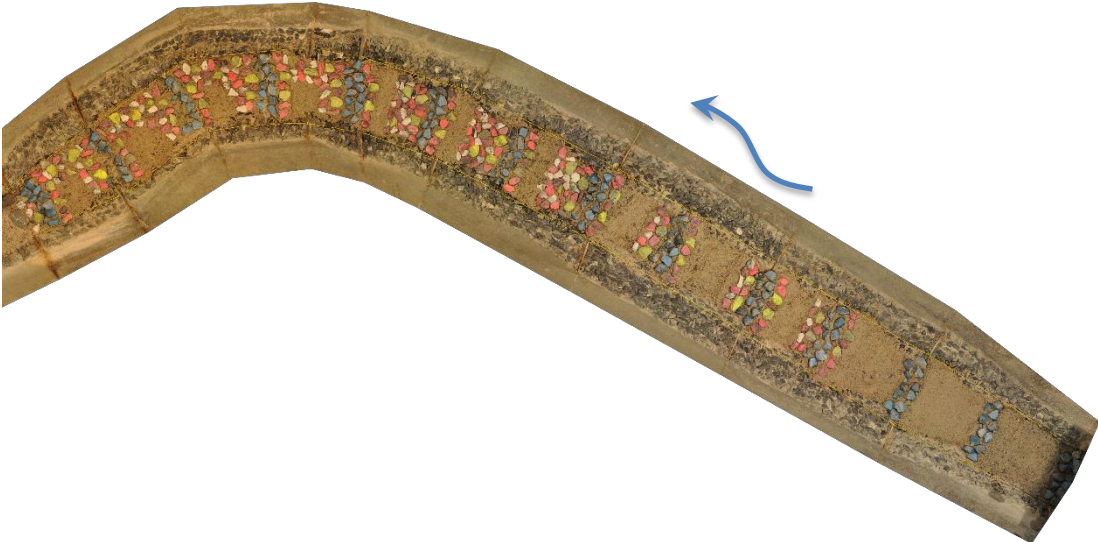
### Einbau Sohle

Alle 14 Stufen wurden in diesem Versuch eingebaut und auf ihre Belastbarkeit überprüft. Die provisorische Sperre, die im Versuch A2\_01.1 und A2\_02.1 für die Abgrenzung des Versuchsbereiches benötigt wurde, musste als erstes entfernt werden. Wie im Fazit des Versuchs A2\_02.1 empfohlen, wurden die Blöcke der ersten Stufe in Mörtel versetzt. Anschliessend wurden die restlichen 13 Stufen eingebaut und mit dem entsprechenden Erosionsschutz versehen. Abbildung 71 zeigt die 14 auf den ganzen Projektperimeter verteilten Stufen. Von den ersten neun Stufen wurden jeweils drei mit den gleichen Erosionsschutzmassnahmen ausgestattet. Welche Variante bei welchen Stufen verwendet wurde, ist in Tabelle 10 ersichtlich. Frühere Versuche haben gezeigt, dass die Sohle auf der Aussenseite der Kurve im Projektperimeter durch die dort konzentrierte Strömung stärker belastet wird. Die Gefahr besteht, dass die Sohle dort in Folge der durch die Kurve bedingten Strömungskonzentration stärker erodiert. Um dies zu verhindern, wurden die auf Variante 4 basierenden Stufen mit einem zusätzlichen Kolkschutz im Aussenbereich der Kurve versehen.

Stufen Nr.	1 bis 3	4 bis 6	7 bis 9	10 bis 14
Einbau	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 4 (+ Aussenbereich)

Tabelle 10: Varianten Stufenaufbau Versuch A2\_03.1.





*Abbildung 71: Skizze (oben) und Orthophoto (unten) des Stufeneinbaus für Versuch A2\_03.1.*

## Teilversuche und Abflüsse

Teilversuch	Beschreibung
A2_02.1_HQ5	Abflussteigerung in Intervallen von 0.9 h um je 5.0 m <sup>3</sup> /s bis HQ <sub>5</sub> (64.0 m <sup>3</sup> /s ohne Geschiebe)
A2_02.1_HQ30	Abflussteigerung ab HQ <sub>5</sub> in Intervallen von 2.8 h um je 5.0 m <sup>3</sup> /s bis HQ <sub>30</sub> (85.0 m <sup>3</sup> /s ohne Geschiebe)
A2_02.1_HQ100G_1.Versuch	HQ <sub>100</sub> Ganglinie 1. Versuch (98.0 m <sup>3</sup> /s mit Geschiebe reduziert)
A2_02.1_HQ100G_2.Versuch	HQ <sub>100</sub> Ganglinie 2. Versuch (98.0 m <sup>3</sup> /s mit Geschiebe reduziert)
A2_02.1_HQ300G	HQ <sub>300</sub> - Überlastfall Ganglinie (115.0 m <sup>3</sup> /s mit Geschiebe reduziert)

Tabelle 11: A2\_03.1, Beschrieb Teilversuche.

Die einzelnen Teilversuche sind aufbauend und schliessen an die vorhergehenden Versuche an. Dazwischen wurden keine Eingriffe in der Sohle vorgenommen, ausser es wird in diesem Bericht explizit erwähnt.

### 12.1

#### Teilversuch A2\_03.1\_HQ5

##### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde der Abfluss in Intervallen von rund 0.9 h um je 5.0 m<sup>3</sup>/s erhöht bis das HQ<sub>5</sub> (64.0 m<sup>3</sup>/s) erreicht wurde. Anschliessend wurde der Abfluss beim HQ<sub>5</sub> für rund 2.8 h gehalten. Am Ende wurde der Abfluss während rund 1.0 h heruntergefahren. Der ganze Teilversuch dauerte rund 15.0 h und Geschiebe wurde dem Gerinne nicht zugeführt.

##### Beobachtungen

Die Stufen haben der Belastung durch das HQ<sub>5</sub> problemlos standgehalten. Jedoch haben sich die Kolke nach den Stufen nicht gleichmässig ausgebildet, wie auf Abbildung 72 zu erkennen ist. Die blauen Flächen, die sich nach den Stufen gebildet haben, sind nicht überall gleich stark ausgeprägt. Das bedeutet, dass nach manchen Stufen mehr Material ausgetragen wurde als nach andern. In den drei blau eingekreisten Bereichen ist die Bildung der Kolke klar am grössten. Die Stufen dazwischen haben im Vergleich dazu eine reduzierte Kolkbildung erfahren. Einen Zusammenhang zwischen Stufenvariante und Kolkprägung konnte bis jetzt noch nicht gemacht werden. Bei den kleineren Abflüssen hat diese ungleichmässige Kolkbildung keine grosse Auswirkung. Gleichet sie sich jedoch bis zur Belastung mit den grösseren Abflüssen nicht aus, kann dies zu einem ungleichmässigen Strömungsbild im Gerinne führen. Folglich würde sich die Belastung der einzelnen Stufen klar unterscheiden.

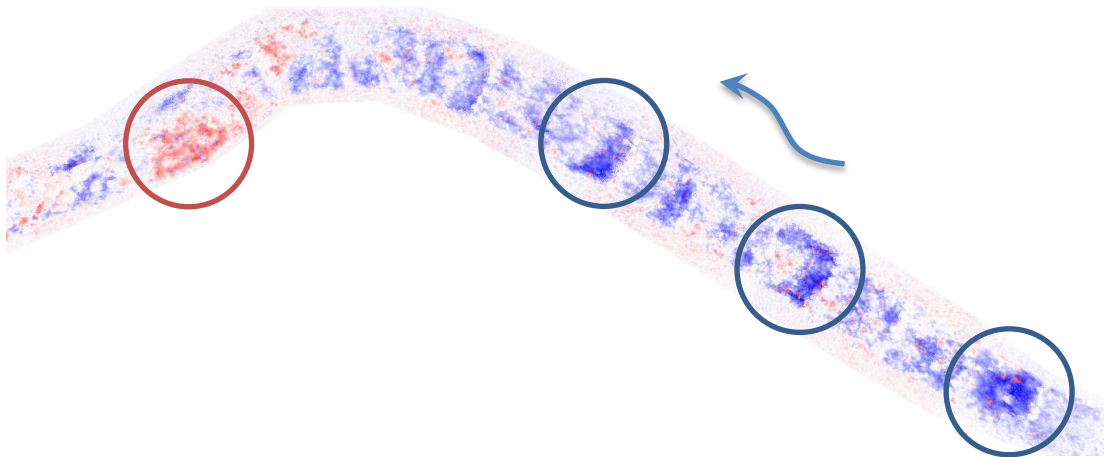


Abbildung 72: Vergleich 3D-Scans A2\_03.1\_Ausgangszustand mit A2\_03.1\_HQ5.

Nicht nur die einzelnen Stufen haben sich unterschiedlich ausgebildet, sondern auch die einzelnen Bereiche im Projektperimeter. Im oberen geraden Bereich (Abbildung 72) sind mit einzelnen Ausnahmen die Stufen schon gut zu erkennen. Das Material das in diesem Bereich abgetragen wurde, muss zuerst durch den Kurvenbereich im Projektperimeter transportiert werden, bis es aus dem Projektperimeter ausgetragen werden kann. Solange jedoch Material aus dem Oberwasser in den Bereich der Linkskurve im Projektperimeter getragen wird, behindert das die Kolkbildung dort. Durch die Kurvensituation bedingt, fliesst die Hauptströmung entlang der Kurvenausenseite. Durch die kleinen Fließgeschwindigkeiten in der Kurveninnenseite lagert sich dort das feine Geschiebe ab, wie auf Abbildung 72 und Abbildung 73 gut zu erkennen ist. Obwohl sich so auch eine Strömungskonzentration im Kurvenausenbereich bildet, hat der Erosionsschutz seine Wirkung gezeigt und eine Erosion verhindert.



Abbildung 73: Kurvenbereich im Projektperimeter bei Niederwasser nach Belastung mit HQ5.

## 12.2 Teilversuch A2\_03.1\_HQ30

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde der Abfluss zu Beginn wieder langsam auf das HQ<sub>5</sub> hochgefahren und anschliessend in Intervallen von rund 2.8 h um je 5.0 m<sup>3</sup>/s erhöht bis das HQ<sub>30</sub> (85.0 m<sup>3</sup>/s) erreicht wurde. Anschliessend wurde der Abfluss beim HQ<sub>30</sub> für rund 2.8 h gehalten. Am Ende wurde der Abfluss während 1.5 h heruntergefahren. Der ganze Teilversuch dauerte rund 13.7 h. Geschiebe wurde dem Gerinne nicht zugeführt.

### Beobachtungen

Bei der Abflusssteigerung bis zum HQ<sub>30</sub> hat sich im Gerinne nicht viel geändert. Die Kolke nach den Stufen wurden teilweise ein wenig tiefer und in der Innenseite der Kurve im Projektperimeter hat sich noch etwas Geschiebe abgelagert. Im Allgemeinen wurde sehr wenig Material ausgetragen. Der durch den Geschiebekorb aufgefangene Geschiebeausstrag betrug rund 225 kg. Die rote Linie im Diagramm 15 zeigt die Messung des Geschiebeausstrags während dem Versuch. Im Versuch A2\_03.1\_HQ5 ist im Vergleich dazu fast die dreifache Menge Geschiebe aus dem Modell ausgetragen worden.

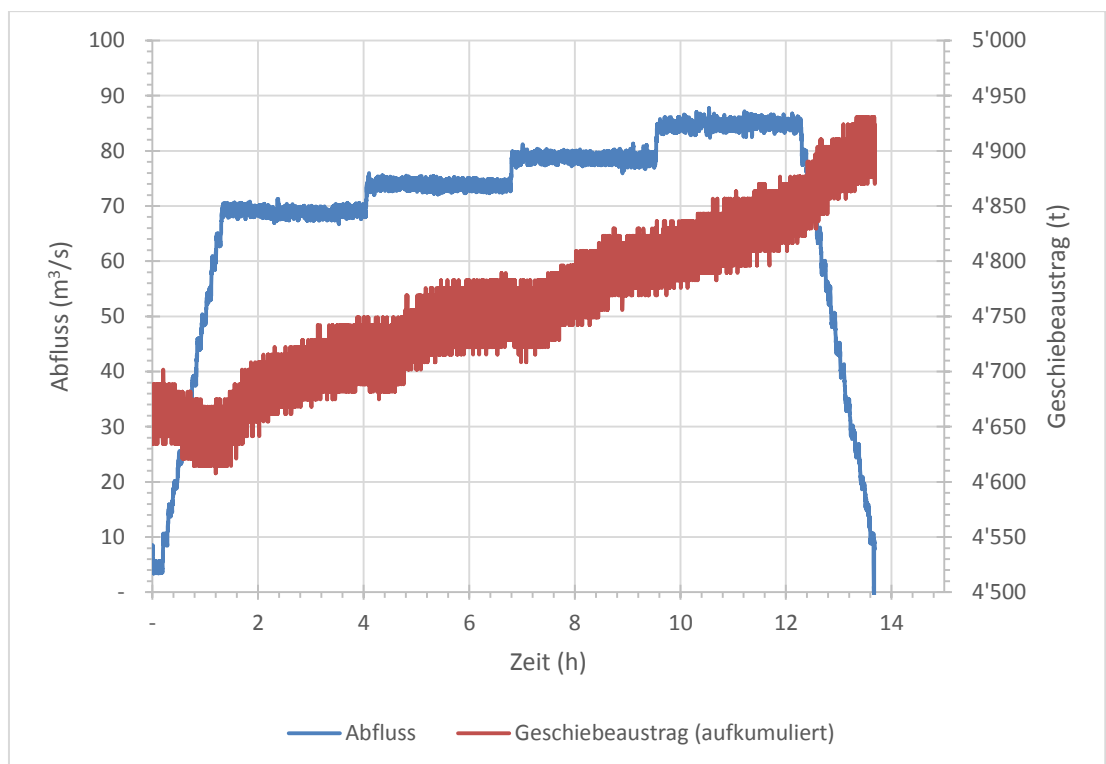


Diagramm 15: Messdiagramm Geschiebeausstrag Teilversuch A2\_03.1\_HQ30.

## 12.3 Teilversuch A2\_03.1\_HQ100G\_1.Versuch

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit einer Ganglinie des hundertjährigen Hochwassers belastet. Parallel zur Abflussganglinie wurde das Gerinne mit der reduzierten Geschiebeganglinie belastet. Kurz vor dem Spitzenabfluss bei  $95.0 \text{ m}^3/\text{s}$  wurde eine Stufe zerstört. Deswegen wurde der Versuch nach rund 10.9 h abgebrochen.

### Beobachtungen

Bei diesem Versuch wurde die Sohle das erste Mal mit einem geschiebeführenden Abfluss belastet. Kurz vor der Abflussspitze ( $HQ_{100}$  mit  $98.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) wurde die Stufe Nr. 4 beschädigt. Aus der oberen Blockreihe haben sich zwei blaue Blöcke gelöst und wurden ins Unterwasser getragen. Wie auf Abbildung 74 ersichtlich, wurde der eine Block noch im folgenden Beckenbereich gestoppt, wobei der andere erst im nächsten liegen geblieben ist.



Abbildung 74: Beschädigte Stufe Nr. 4 nach 1. Versuch mit  $HQ_{100}$  Ganglinie.

Damit sich die Erosion nicht weiter ins Oberwasser ausbreiten konnte, wurde der Abfluss kurz nach der Beschädigung herunter gefahren. Anschliessend wurde die Stufe repariert, damit die Stabilität der restlichen Stufen weiter überprüft werden konnte. Abbildung 75 zeigt die Stufe Nr. 4 nachdem die obere Blockreihe neu eingebaut und mit einem oberwasserseitigen Erosionsschutz ausgestattet wurde.



Abbildung 75: Stufe Nr. 4 nach Reparatur der oberen Blockreihe und des Erosionsschutzes oberhalb.

## 12.4 Teilversuch A2\_03.1\_HQ100G\_2.Versuch

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit einer Ganglinie des hundertjährigen Hochwassers belastet. Der Spitzenabfluss der Ganglinie betrug  $98.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Nach 18.2 h wurde der Versuch zurückgefahren. Parallel zur Abflussganglinie wurde das Gerinne mit der reduzierten Geschiebeganglinie belastet. Der maximale Geschiebeeintrag lag bei rund  $329 \text{ kg/s}$ .

### Beobachtungen

Nach der Reparatur der Stufe Nr. 4, hielt diese und auch alle anderen Stufen dem Abfluss stand. Wie schon nach dem Versuch A2\_03.1\_HQ5 waren die Kolke nach den Stufen jedoch immer noch ungleichmässig ausgebildet und im Kurvenbereich des Projekterimeters wurde das Material auf der Innenseite teilweise abgelagert. Der Kolk nach der ersten Stufe bildete sich im Vergleich zu den anderen am stärksten aus (siehe rote Markierung auf Abbildung 76). Dies zeigt, dass es notwendig war, diese Stufe in Mörtel zu versetzen und somit ein Fixpunkt zu generieren.

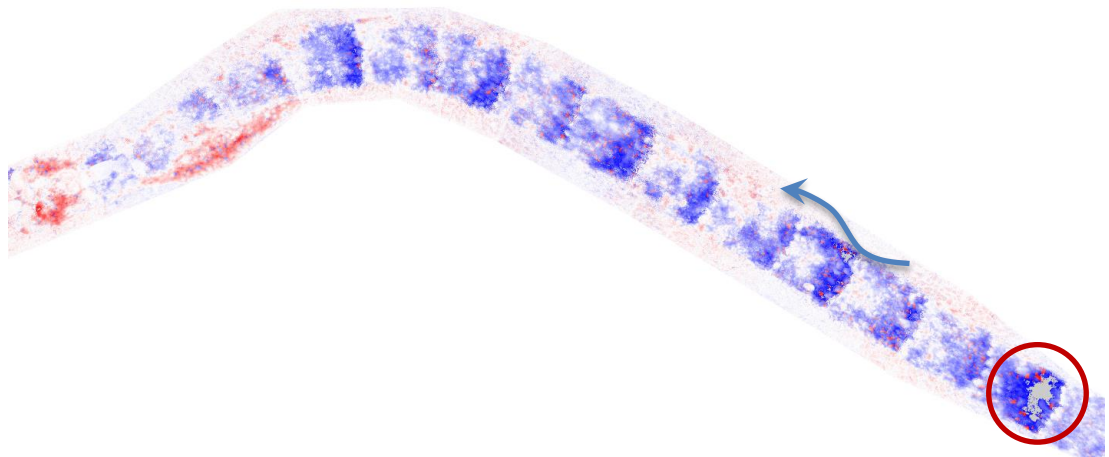


Abbildung 76: Vergleich 3D-Scans A2\_03.1\_Ausgangszustand mit A2\_03.1\_HQ100G\_2.Versuch.

## 12.5 Teilversuch A2\_03.1\_HQ300G

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit der Ganglinie des dreihundertjährigen Hochwassers kombiniert mit dem Überlastfall belastet. Während der Abflussganglinie wurde das Gerinne mit Geschiebe belastet. Der Spitzenabfluss der Ganglinie betrug  $115.0 \text{ m}^3/\text{s}$  und der maximale Geschiebeeintrag  $401 \text{ kg/s}$ . Der Teilversuch dauerte rund 18.6 h.

### Beobachtungen

Die Stufen sind auch während der Belastung mit dem  $HQ_{300}$  und dem Überlastfall stabil geblieben. Dieses Szenario ist nicht nur für die Stabilität sondern auch für die Fischdurchgängigkeit ein sehr ungünstiger Fall. Wird bei hohen Abflüssen die Geschiebezufuhr unterbrochen, wie es der Überlastfall simuliert, wird immer mehr Sohlenmaterial aus den Beckenbereichen ausgetragen, da der Nachschub von oben fehlt. Dies hat zur Folge, dass sich die Sohle zwischen den Becken absenkt und somit die Kolke tiefer werden. Das bedeutet, dass die Gefahr grösser wird, dass die untere Blockreihe der Stufen in den Kolk abrutscht. Durch die Sohlenabsenkung im gesamten Beckenbereich liegt der Wasserspiegel in den Becken nach solchen Ereignissen auch tiefer. Somit steigt die Wasserspiegeldifferenz bei den Stufen an und die Fische müssen bei der Wanderung in die Laichgebiete grössere Hindernisse überwinden.



Abbildung 77: Stufen im Bereich der heutigen Sperre nach der  $HQ_{300}$ -Überlastfall-Ganglinie bei Niedrigwasser.



Um beurteilen zu können, ob die Fischdurchgängigkeit des künstlich gebauten Stufen-Becken-Gerinnes gewährleistet ist oder die Abstürze zu hoch sind, war es notwendig die Abmessungen der Stufen zu eruieren. Damit die Fische die einzelnen Stufen bei ihrer Wanderung problemlos überwinden können, dürfen die Abstürze bei den Stufen nicht zu gross sein. Zudem sollen sich vor und nach den Stufen Becken befinden, die es den Fischen ermöglichen sich auszuruhen und Anlauf zu holen, um die nächste Stufe zu überwinden. Die Resultate der Messungen sind in Tabelle 12 aufgeführt. Die detaillierten Abmessungen sind im Anhang A aufgelistet. Im Innenbereich der Kurve im Projektperimeter und bei der letzten Stufe haben sich die Kolke nicht so ausgeprägt ausgebildet wie im restlichen Bereich des Gerinnes. Deshalb wurden die Stufen ohne Kolk nicht in der Berechnung der Durchschnittswerte berücksichtigt. Bei den Kolken wurden jeweils zwei Werte gemessen. Zum einen wurde der tiefste Kolk (Kolktiefe max.) und zum andern der unmittelbar unterhalb der am besten durchströmten Aufstieglücke liegende Kolk (Kolktiefe Fische) gemessen.

	Min. Wert	Max. Wert	Durchschnittswert
Differenz Wasserspiegel	0.36 m	1.02 m	0.72 m
Kolktiefe Fische	0.63 m	1.95 m	1.13 m
Kolktiefe max.	1.02 m	1.95 m	1.40 m
Beckenlänge	4.90 m	7.60 m	6.24 m

Tabelle 12: Stufenabmessungen nach  $HQ_{300}$ -Überlastfall für Beurteilung Fischdurchgängigkeit.

Die gemessenen Wasserspiegeldifferenzen scheinen hoch zu sein für die Fische. Zwischen den einzelnen grossen Blöcken bildeten sich jedoch immer wieder kleine Passagen, durch die sie teilweise schwimmen können. Im Vergleich zu einer Sperre mit einer fest eingebauten Überfallkante, können die im Modell eingebauten Stufen besser überwunden oder durchschwommen werden.



Abbildung 78: Stufen Nr. 6 bis 8 nach der  $HQ_{300}$ -Überlastfall-Ganglinie. Gut zu erkennen sind die einzelnen Lücken zwischen den Blocksteinen, durch welche die Fische die Stufe überwinden können.

## 12.6 Fazit aus dem Versuch A2\_03.1

Die Stufen haben den Belastungen fast standgehalten. Die Stufe Nr. 4 wurde bei der  $HQ_{100}$ -Ganglinie und somit der ersten Belastung mit einem geschiebeführenden Abfluss zerstört. Der Versuch wurde nach der Beschädigung herunter gefahren, um die Stufe reparieren zu können und um einen Kollaps zu verhindern. Deshalb konnte nicht eruiert werden, wie sich der restliche Bereich der Sohle verhalten hätte und wie schnell sich die Erosion ins Oberwasser ausgebreitet hätte.

Die Beckenbereiche haben sich sehr unterschiedlich ausgebildet. Nicht nur unterscheiden sich die verschiedenen Varianten der Stufen, sondern auch die Stufen derselben Variante. So ist die Kolkwanne nach der Stufe Nr. 7 fast gänzlich freigelegt, wobei die Kolkwannen der anderen beiden nach Variante 5 gebauten Stufen nicht sichtbar sind. Solange dies keine Auswirkung auf die Stabilität und Fischdurchgängigkeit hat, kann das so geduldet werden.

Die für die Fischdurchgängigkeit festgelegten Kolkiefen im Unterwasser der Stufen, wurden hier problemlos eingehalten. Die vom Projektteam empfohlene Absturzhöhe von 0.5 m, liegt jedoch unterhalb der beim  $HQ_{300}$ -Überlastfall gebildeten und gemessenen Wasserspiegeldifferenzen. Da sich jedoch nicht klare Abstürze gebildet haben und zwischen den Blöcken immer wieder Bereiche vorhanden sind, wo das Wasser durchfließt, wird die Fischdurchgängigkeit trotzdem gewährleistet sein.

Die Stufen wurden während diesem Versuch mit Erosionsschutzmassnahmen gemäss Variante 3 bis 5 im Ober- und Unterwasser vor einer unerwünscht grossen Erosion geschützt. Die verwendeten Blöcke verursachen beim Transport und Verbau jedoch grossen Aufwand. Deshalb sollte die Anzahl und Grösse der Blöcke nochmals reduziert werden. Die ersten sechs Stufen werden deshalb nochmals ausgebaut und neu mit einem reduzierten Erosionsschutz eingebaut. Um zu überprüfen, wie sich die Stufen bei längeren oder erneuten Belastungen verhalten, werden diese in diesem Zustand belassen.

**13 VERSUCH A2\_04.1**

**Einbau Sohle**

Nach dem die künstlich eingebauten Stufen beim Versuch A2\_03.1 die Belastungen überstanden haben, sollten in diesem Versuch einige Stufen aus dem letzten Versuch nochmals belastet werden und zusätzlich neue Varianten mit vermindertem Erosionsschutz überprüft werden.

Die Stufen 7 bis 14 wurden beim Umbau für diesen Versuch nicht angerührt und so belassen, wie nach dem Teilversuch A2\_03.1\_HQ300G. So kann überprüft werden, ob die Stufen auch einer längeren Belastung standhalten. Die ersten sechs Stufen wurden jedoch ausgebaut und mit reduziertem Erosionsschutz neu eingebaut. Der Erosionsschutz oberhalb der Stufen und der Kolksschutz unterhalb wurden dabei reduziert um zu überprüfen, ob es möglich ist noch mehr Blöcke einzusparen und somit den Aufwand sowie die Baukosten zu senken. Von den sechs neu eingebauten Stufen wurden jeweils drei mit den gleichen Erosionsschutzmassnahmen versehen.

Stufen Nr.	1 bis 3	4 bis 6	7 bis 14
Einbau	Variante 7	Variante 6	Bestehende Stufen aus Versuch A2_03.1

Tabelle 13: Varianten Stufenaufbau Versuch A2\_04.1.

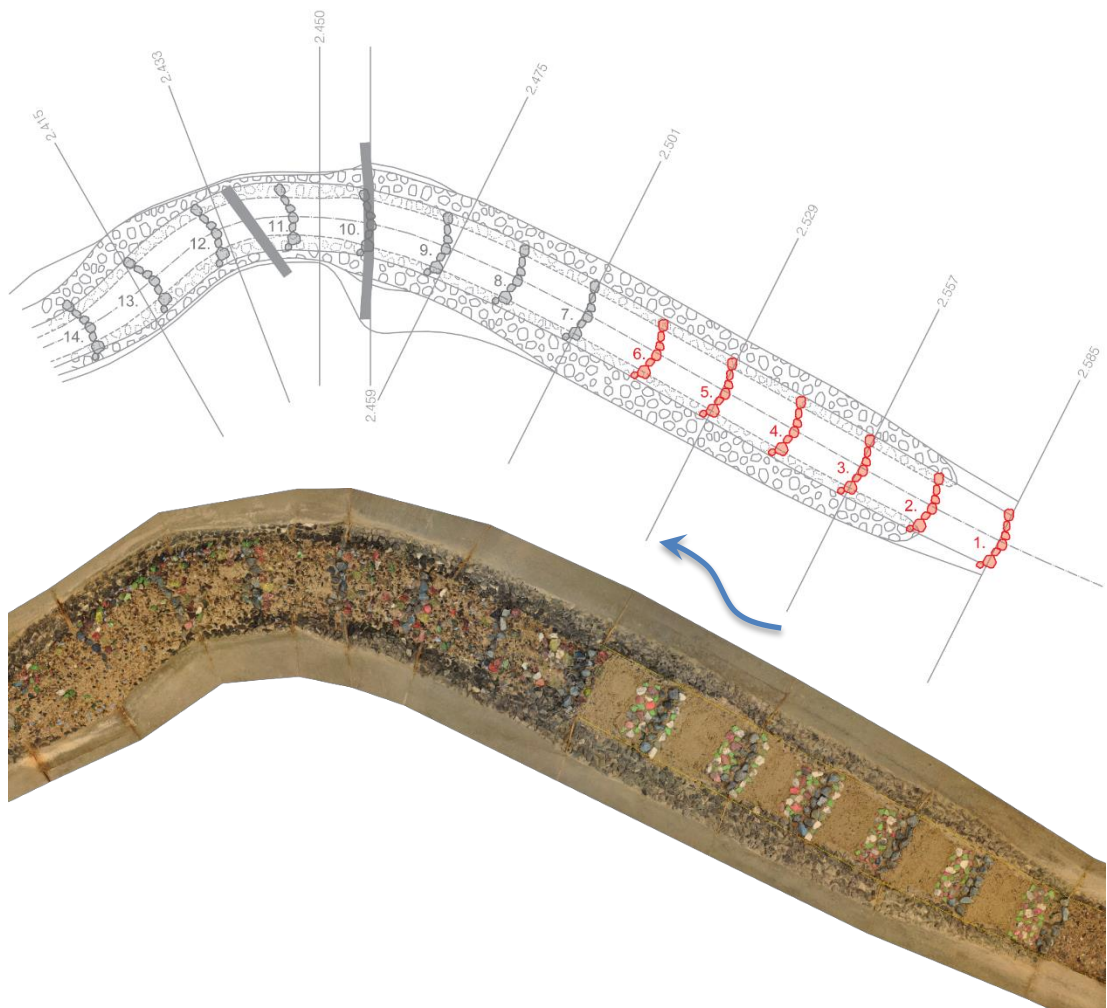


Abbildung 79: Skizze (oben) und Orthophoto (unten) des Stufenaufbaus für Versuch A2\_04.1.

## Teilversuche und Abflüsse

Teilversuch	Beschreibung
A2_03.1_HQ5	Abflusssteigerung in Intervallen von 0.9 h um je 5.0 m <sup>3</sup> /s bis HQ <sub>5</sub> (64.0 m <sup>3</sup> /s ohne Geschiebe)
A2_03.1_HQ30	Abflusssteigerung ab HQ <sub>5</sub> in Intervallen von 2.8 h um je 5.0 m <sup>3</sup> /s bis HQ <sub>30</sub> (85.0 m <sup>3</sup> /s ohne Geschiebe)
A2_03.1_HQ100G	HQ <sub>100</sub> Ganglinie (98.0 m <sup>3</sup> /s mit Geschiebe reduziert)
A2_03.1_HQ300G	HQ <sub>300</sub> - Überlastfall Ganglinie (115.0 m <sup>3</sup> /s mit Geschiebe reduziert)

Tabelle 14: A2\_04.1, Beschrieb Teilversuche.

Die einzelnen Teilversuche sind aufbauend und schliessen an die vorhergehenden Versuche an. Dazwischen wurden keine Eingriffe in der Sohle vorgenommen, ausser es wird in diesem Bericht explizit erwähnt.

### 13.1 Teilversuch A2\_04.1\_HQ5

#### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde der Abfluss in Intervallen von rund 0.9 h um je 5.0 m<sup>3</sup>/s erhöht bis das HQ<sub>5</sub> (64.0 m<sup>3</sup>/s) erreicht wurde. Anschliessend wurde der Abfluss beim HQ<sub>5</sub> für rund 2.8 h gehalten. Am Ende wurde der Abfluss während rund 1.0 h heruntergefahren. Der ganze Teilversuch dauerte rund 15.0 h und Geschiebe wurde dem Gerinne nicht zugeführt.

#### Beobachtungen

Da die Bereiche zwischen den Stufen nur mit der Grundmischung und nicht mit zusätzlichen Blöcken verfüllt wurden, haben sich die Kolke nach den Stufen viel schneller gebildet als im letzten Versuch. Jedoch wurden dadurch die Erosionsschutzmassnahmen stärker belastet. Wie auf Abbildung 80 ersichtlich ist, ist der Kolkschutz nach der ersten Stufe bereits beschädigt worden und einige der kleineren Blöcke wurden gelöst und ins Unterwasser getragen.



Abbildung 80: Stufen Nr. 1 bis 4 bei Niederwasser nach HQ<sub>5</sub>.

## 13.2 Teilversuch A2\_04.1\_HQ30

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde der Abfluss zu Beginn wieder langsam auf das  $HQ_5$  hochgefahren und anschliessend in Intervallen von rund 2.8 h um je  $5.0 \text{ m}^3/\text{s}$  erhöht bis das  $HQ_{30}$  ( $85.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) erreicht wurde. Anschliessend wurde der Abfluss beim  $HQ_{30}$  für rund 2.8 h gehalten. Am Ende wurde der Abfluss während 1.5 h heruntergefahren. Der ganze Teilversuch dauerte rund 13.9 h und Geschiebe wurde dem Gerinne nicht zugeführt.

### Beobachtungen

Mit zunehmendem Abfluss vermochte das Wasser vermehrt die verbauten Blöcke der Variante 7 umzulagern. Vor allem die pinken und grünen Blöcke der sechst- und fünftgrösste Fraktion ( $\varnothing 0.53 \text{ m}$  bis  $0.90 \text{ m}$ ) wurden durch die Belastung umgelagert. Nach dem  $HQ_{30}$  war der Kolkchutz der ersten Stufe deshalb nicht mehr intakt. Um bei den grösseren Abflüssen einen zu tiefen Kolk zu verhindern, wurde nach der Belastung mit dem  $HQ_{30}$  der Kolkchutz nach der ersten Stufe entfernt und durch eine Kolkwanne ersetzt. Dafür wurden Blöcke der fünft- bis drittgrössten Fraktionen ( $\varnothing 0.64 \text{ m}$  bis  $1.27 \text{ m}$ ) verwendet (siehe Abbildung 82).



Abbildung 81: Stufen Nr. 1 und 3 bei Niederwasser nach  $HQ_{30}$ .



Abbildung 82: Neubau des Kolkschutzes (Kolkwanne) nach Stufe Nr. 1 nach  $HQ_{30}$ .

### 13.3 Teilversuch A2\_04.1\_HQ100G

#### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit einer Ganglinie des hundertjährigen Hochwassers belastet. Der Spitzenabfluss der Ganglinie betrug  $98.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Nach 18.2 h wurde der Versuch zurückgefahren. Parallel zur Abflussganglinie wurde das Gerinne mit der reduzierten Geschiebeganglinie belastet. Der maximale Geschiebeeintrag lag bei rund  $329 \text{ kg/s}$ .

#### Beobachtungen

Bei  $94.0 \text{ m}^3/\text{s}$  hat sich ein Block aus der oberen Blockreihe der Stufe Nr. 6 gelöst (rot markierter Block auf Abbildung 83). Der Block wurde jedoch nicht weit transportiert und blieb im Bereich des Kolkes nach der Stufe Nr. 6 liegen. Unter genauer Beobachtung wurde der Versuch weitergeführt. Die Stufe Nr. 6 und die oberhalb liegende Stufe Nr. 5 haben die Abflussspitze und den abklingenden Ast des  $HQ_{100}$  überstanden. Trotzdem wurde die Stufe, bevor sie mit der  $HQ_{300}$ -Überlastfall-Ganglinie belastet wurde, repariert. Da es nicht sehr stabil gewesen wäre, nur den einen Block zurück zu setzen und der oberwasserseitige Erosionsschutz auch zerstört war, wurde die gesamte Stufe mit Erosions- und Kolkschutz neu versetzt. Der Kolkschutz der Stufe Nr. 5 wurde auch ersetzt. Aufgrund der Sohlenabsenkung hinter dem fehlenden Block der Stufe Nr. 6, haben sich auf der rechten Seite (in Fließrichtung) einzelne Blöcke aus dem Kolkschutz gelöst.



Abbildung 83: Stufen Nr. 5 bis 7 nach  $HQ_{100}$ .



Abbildung 84: Stufen Nr. 5 bis 7 nach Reparatur.

## 13.4 Teilversuch A2\_04.1\_HQ300G

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit der Ganglinie des dreihundertjährigen Hochwassers kombiniert mit dem Überlastfall belastet. Während der Abflussganglinie wurde das Gerinne mit Geschiebe belastet. Der Spitzenabfluss der Ganglinie betrug  $115.0 \text{ m}^3/\text{s}$  und der maximale Geschiebeeintrag  $401 \text{ kg/s}$ . Der Teilversuch dauerte rund 18.7 h.

### Beobachtungen

Nach den Reparaturen nach dem  $HQ_{30}$  und  $HQ_{100}$  sind die Stufen nun stabil geblieben und es hat keine grösseren Beschädigungen der Stufen gegeben. Einzelne Blöcke haben sich während den Teilversuchen ein wenig verschoben, die Stabilität der Stufe war jedoch nicht gefährdet. Die beiden roten Markierungen in Abbildung 85 zeigen die in Fließrichtung auf der linken Seite liegenden, verschobenen Blöcke in der Stufe Nr. 2 und 3.



Abbildung 85: Stufen Nr. 2 bis 4 nach  $HQ_{300}$ -Überlastfall.

Der oberwasserseitige Erosionsschutz wurde wie in Abbildung 86 ersichtlich teilweise beschädigt und weggespült (weisse und grüne Blocksteine, siehe Abbildung 84). Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Stabilität dadurch nicht gefährdet ist. Bei kleinen Abflüssen wird die Strömung an den Stellen ohne oberwasserseitigen Blockschutz konzentriert.



Abbildung 86: Stufen Nr. 4 bis 6 nach  $HQ_{300}$ -Überlastfall. Der oberwasserseitige Erosionsschutz wurde teilweise ausgetragen.

Nach dem Teilversuch mit der HQ<sub>300</sub>-Überlastfall-Ganglinie wurden die Stufen und Becken bei Niederwasser wieder vermessen, um vergleichen zu können, welche Einflüsse die verschiedenen Stufenvarianten haben und wie sich die Abmessungen seit dem Teilversuch A2\_03.1\_HQ300G verändert haben. Die einzelnen detaillierten Abmessungen sind im Anhang A aufgelistet.

	Min. Wert	Max. Wert	Durchschnittswert
Differenz Wasserspiegel	0.48 m	1.08 m	0.78 m
Kolktiefe Fische	0.81 m	1.77 m	1.14 m
Kolktiefe max.	1.05 m	2.19 m	1.58 m
Beckenlänge	5.50 m	9.90 m	7.28 m

Tabelle 15: Bereich der Stufenabmessungen nach HQ<sub>300</sub>-Überlastfall für die Beurteilung der Fischdurchgängigkeit.

Tabelle 15 und Tabelle 16 zeigen auf, dass die Wasserspiegeldifferenzen im Vergleich zum Versuch A2\_03.1 leicht grösser und die Kolke etwas tiefer und länger geworden sind. Im Bereich der ersten sechs Stufen ist das sicherlich auf den reduzierten Erosionsschutz und die Verfüllung mit der Grundmischung ohne Blöcke zurückzuführen. Da die grossen Blöcke fehlten, konnte die Grundmischung leichter ausgespült werden und die Sohle senkte sich ab. Im unteren Bereich konnten die mehrfache Versuchsdurchführung Sohlenmaterial lösen und aus dem Projektperimeter transportieren.

	Durchschn. A2_03.1	Durchschnitt A2_04.1
Differenz Wasserspiegel	0.72 m	0.78 m
Kolktiefe Fische	1.13 m	1.14 m
Kolktiefe max.	1.40 m	1.58 m
Beckenlänge	6.24 m	7.28 m

Tabelle 16: Vergleich Stufenabmessungen nach A2\_03.1\_HQ300G und A2\_04.2HQ300G.



### 13.5 Fazit aus dem Versuch A2\_04.1

Die Beckenbereiche der neu verbauten Stufen wurden nach Einbau des Erosionsschutzes nur mit der Grundmischung verfüllt, um die zu verbauende Menge grosser Blöcke nochmals zu reduzieren. Die Beckenbereiche wurden dadurch schneller ausgewaschen. Das Fehlen der grossen Blöcke führte jedoch nicht zu einer Verminderung der Stabilität.

Der Erosionsschutz und somit der Verbau von grossen Blöcken wurde mit den Varianten 6 und 7 erneut reduziert. Wobei bei der Variante 7 im Vergleich zur Variante 6 nochmals deutlich weniger Blöcke verbaut wurden. Die kleinste bei Variante 7 verwendete Blockfraktion wurde bereits beim  $HQ_5$  und  $HQ_{30}$  aus dem Kolkenschutz gespült. Die bei der Variante 6 im Kolkenschutz verbauten Blockfraktionen vermochte das Wasser nicht umzulagern. Somit konnte mit diesem Versuch die Anzahl und Grösse der Blöcke weiter optimiert werden. Zusätzlich konnte die Blockgrössen nach unten begrenzt und die minimal notwendige Anzahl Blöcke aufgezeigt werden.

Vor allem bei der ersten Stufe wurde der Kolkenschutz schon nach dem  $HQ_5$  und  $HQ_{30}$  massiv beschädigt. Dies ist auf die geringere Gerinnebreite und die folglich grössere Belastung zurückzuführen. Um eine zu grosse Kolkbildung zu verhindern, wurde als Gegenmassnahme eine Kolkwanne verbaut, welche den Beckenbereich auch bei grossen Abflüssen wie dem  $HQ_{100}$  und  $HQ_{300}$  genügend vor Erosionen geschützt hat.

Bei drei Stufen haben sich Blöcke aus der oberen Blockreihe verschoben oder gelöst. Nach der  $HQ_{100}$ -Ganglinie musste die Stufe Nr. 6 repariert werden. Obwohl ein Block aus der oberen Blockreihe gelöst wurde, blieb der Rest der Stufe stabil. Die zweite und dritte Stufe haben trotz den verschobenen Blöcken auch der  $HQ_{300}$ -Überlastfall-Ganglinie standgehalten. Es konnte somit gezeigt werden, dass wenn einzelne Blöcke aus der oberen Blockreihe getragen werden, dies nicht zwingend zu einem Kollaps führt.

Die Stufen, die nach dem Versuch A2\_04.1 nicht verändert und somit erneut belastet wurden, haben den erneuten Versuchen standgehalten. Es konnte somit gezeigt werden, dass die Stabilität auch nach mehrfacher Belastung immer noch gewährleistet ist.

## 14

**VERMESSUNG DES GERINNES WÄHREND HOCHWASSEREREIGNISSEN**

Während den Versuchen wurde lediglich die Sohle beweglich eingebaut. Die Böschungen wurden fest verbaut und wurden somit von jeglicher Erosion geschützt. Damit die Böschung auf die Belastung in Folge der Stufen ausgelegt werden kann, wurden die Sohlen- und Wasserspiegellagen und die Abflussgeschwindigkeit gemessen. Die Sohlen- und Wasserspiegellagen wurden jeweils mit dem Nivelliergerät und die Abflussgeschwindigkeiten mit dem Micro-Messflügel aufgenommen. Die Messpunkte sind in Abbildung 87 eingezeichnet. Unmittelbar oberhalb der Stufe und in der Mitte der Beckenbereiche wurden jeweils in der Mitte des Gerinnes und in Fließrichtung links und rechts im Bereich des Böschungsfusses Werte aufgenommen. Zum Zeitpunkt der Messungen befand sich der Micro-Messflügel immer ungefähr in der Mitte der Abflusstiefe. Zuerst wurden das Gerinne beim  $HQ_5$  und  $HQ_{30}$  ohne Geschiebetrieb und anschliessend beim  $HQ_{100}$  und  $HQ_{300}$  mit Geschiebetrieb vermessen. Die Messwerte in der Mitte der Beckenbereiche sind teilweise nicht wie erwartet mit dem Abfluss ansteigend. Dies ist damit zu erklären, dass sich der Wassersprung je nach Abfluss unterschiedlich ausprägte und somit nicht im gleichen Bereich des Beckens lag.

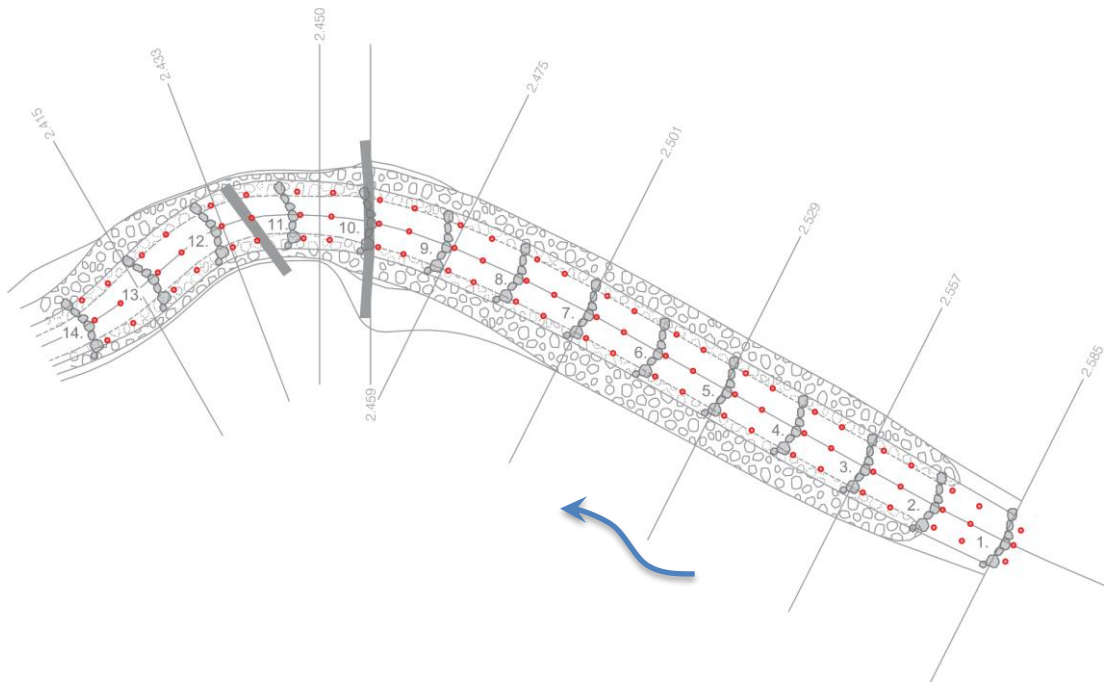


Abbildung 87: Situation mit eingezeichneten Messpunkten.

Auf den folgenden Seiten werden die wichtigsten Ergebnisse präsentiert. Die detaillierten Messresultate befinden sich im Anhang A.

### 14.1 Vermessung Sohle und Wasserspiegel (Abflusstiefe)

Um die Abflusstiefe bei den verschiedenen Hochwasserabflüssen berechnen zu können, wurde jeweils der Wasserspiegel- und die Sohlenlage aufgenommen. Im Diagramm 16 sind die über den Querschnitt gemittelten Werte für jeden Hochwasserabfluss aufgeführt. Die Sohle ist grösstenteils stabil geblieben, da die Sohle schon mehrfach belastet wurde und die Becken folglich schon vor der ersten Messung komplett ausgebildet waren. Folglich steigt der Wasserspiegel mit zunehmendem Abfluss.

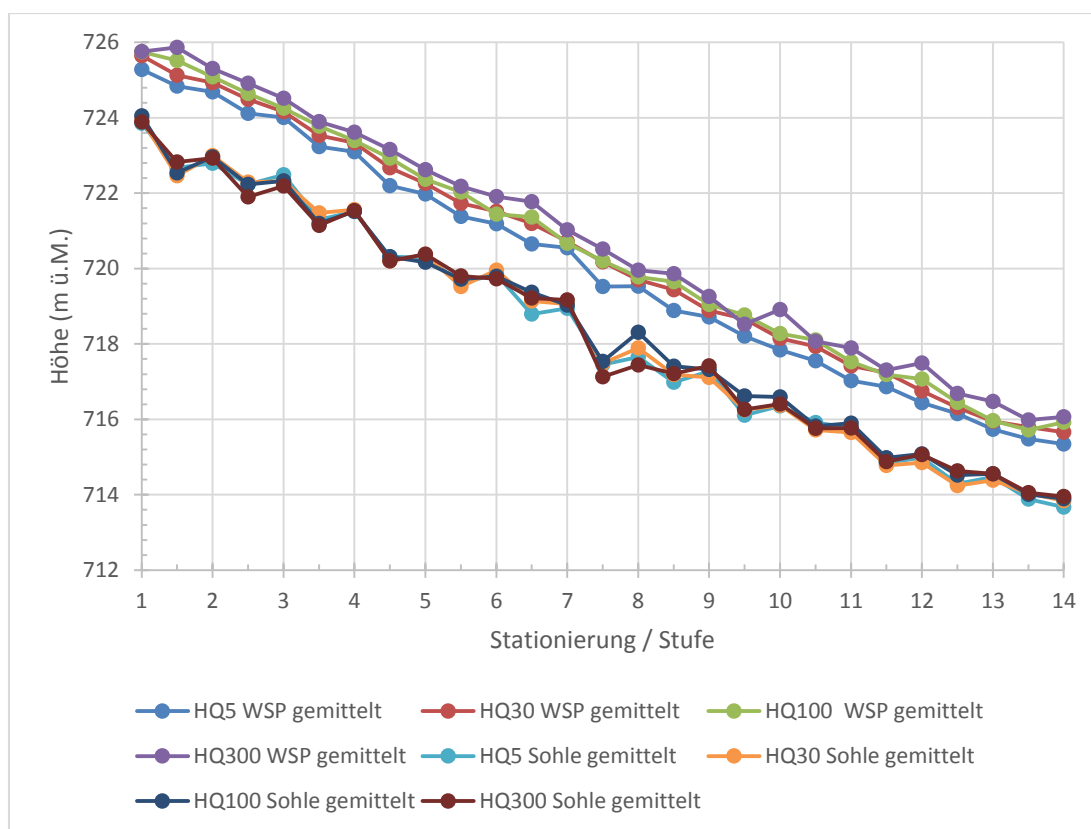


Diagramm 16: Vergleich gemittelte Wasserspiegel und Sohlen bei HQ<sub>5</sub> bis HQ<sub>300</sub>.

Für die Böschungsdimensionierung ist die Abflusstiefe unter anderem ein wichtiger Parameter. Aus den gemessenen Wasserspiegel- und Sohlenlagen wurden deshalb die Abflusstiefen berechnet. Um einen Überblick über die Bandbreite die Werte zu erhalten, wurden in Tabelle 17 die über das Querprofil gemittelten (3 Werte), minimalen und maximalen Abflusstiefen bei den Hochwasserabflüssen aufgeführt.

	Durchschnittliche Abflusstiefe	Minimale Abflusstiefe	Maximale Abflusstiefe
HQ <sub>5</sub>	1.17 m	0.60 m	3.05 m
HQ <sub>30</sub>	2.01 m	0.83 m	3.11 m
HQ <sub>100</sub>	2.04 m	0.75 m	3.38 m
HQ <sub>300</sub>	2.37 m	0.83 m	3.71 m

Tabelle 17: Abflusstiefen in Abhängigkeit des Abflusses bei vollständig gebildeten Becken.

Da die maximalen Werte für die Bemessung der Böschung massgebend sind, werden in Diagramm 17 die Abflusstiefen beim  $HQ_{300}$  in Fließrichtung links, mittig und rechts im Querschnitt aufgezeigt. Für die anderen Hochwasserabflüsse sind die jeweiligen Abflüsse im Anhang A aufgeführt. Es ist ersichtlich, dass die Abflusstiefen unmittelbar vor den Stufen geringer sind als in den Beckenbereichen. Zusätzlich ist auch die Strömungskonzentration an der Kurvenaussenseite am Ende des Projektparimeters zu erkennen. In diesem Bereich konzentriert sich der Abfluss deutlich auf der rechten Seite.

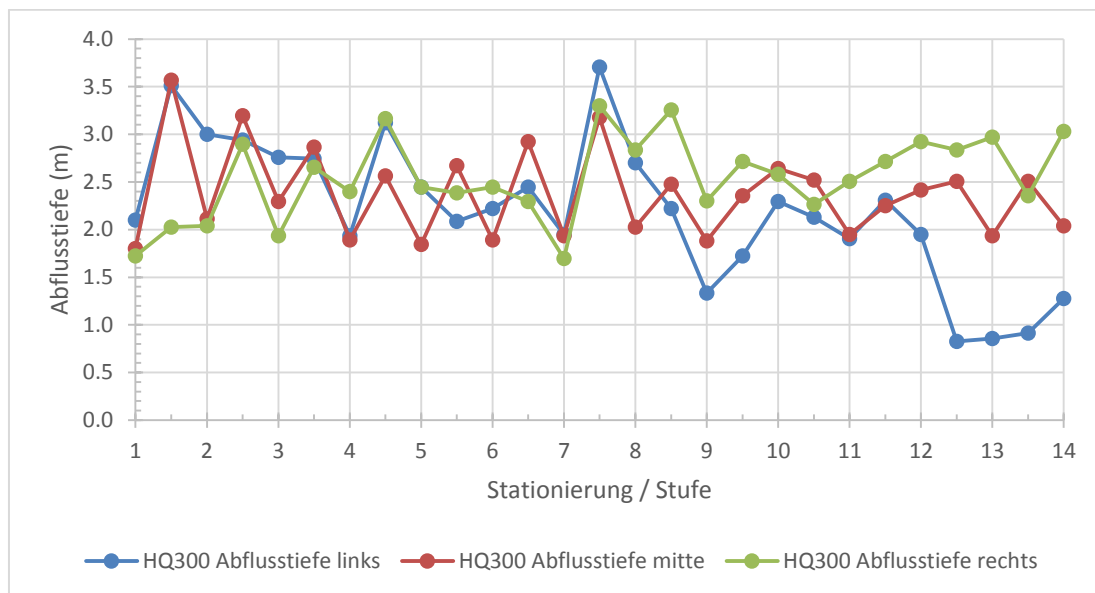


Diagramm 17: Abflusstiefen beim  $HQ_{300}$ .

Wie die Stufenvarianten die Abflusstiefe beeinflussen ist in Diagramm 18 ersichtlich. Die gemittelten Werte (Mittel über jeweilige Stufen der gleichen Variante) unmittelbar vor den Stufen verändern sich nicht signifikant. Ausser bei der Variante 4 sind auch die gemittelten Werte in den Beckenbereichen ähnlich. Die geringen Abflusstiefen in der Kurveninnenseite beeinflussen und vermindern die Werte in diesem Bereich.

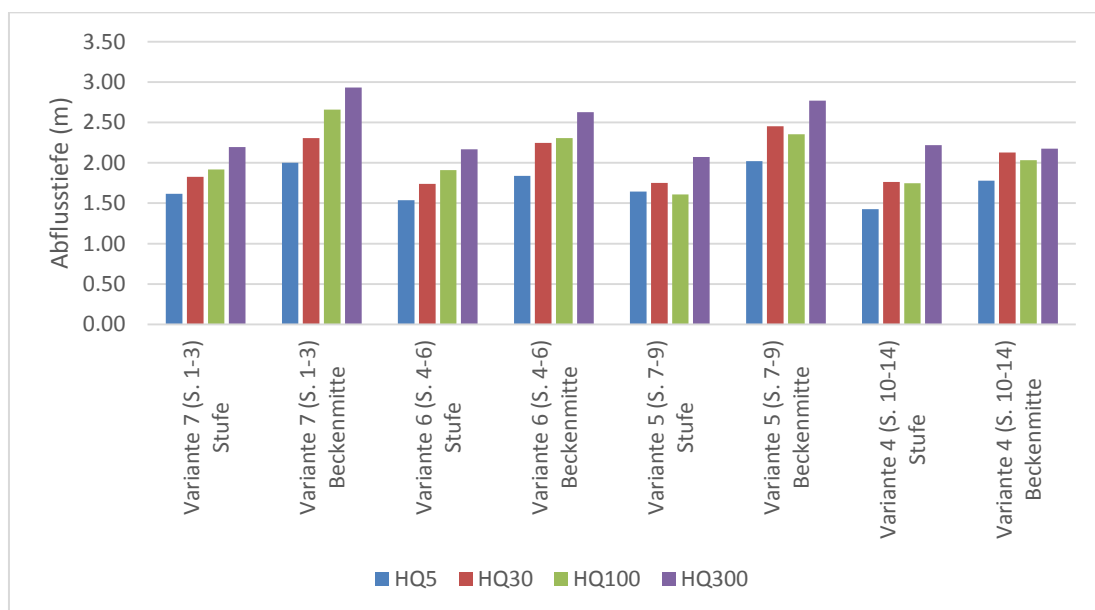


Diagramm 18: Vergleich der gemittelten Abflusstiefen für die einzelnen Stufenvarianten bei  $HQ_5$  bis  $HQ_{300}$ .

### 14.2 Messung Fließgeschwindigkeit

Neben der Abflusstiefe spielt auch die Fließgeschwindigkeit eine massgebende Rolle für die Böschungsbemessung. In Tabelle 18 sind die über den gesamten Projektperimeter gemittelten, minimalen und maximalen Fließgeschwindigkeiten aufgeführt.

	Durchschnittliche Fließgeschwind.	Minimale Fließgeschwind.	Maximale Fließgeschwind.
HQ <sub>5</sub>	3.3 m/s	1.8 m/s	4.7 m/s
HQ <sub>30</sub>	3.9 m/s	1.5 m/s	5.3 m/s
HQ <sub>100</sub>	4.3 m/s	1.6 m/s	5. m/s
HQ <sub>300</sub>	4.7 m/s	1.9 m/s	6.9 m/s

Tabelle 18: Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Abflusses bei vollständig gebildeten Becken.

Diagramm 19 zeigt die Fließgeschwindigkeiten beim HQ<sub>300</sub>. Da dies der grösste untersuchte Abfluss ist, führen die hohen Fließgeschwindigkeiten auch zu den grössten Belastungen. Im oberen, geraden Bereich (zwischen Stufe Nr. 2 und 9) des Projektperimeters sind die Fließgeschwindigkeiten im Böschungsbereich grundsätzlich höher als in der Mitte des Gerinnes. Aufgrund der Kurvensituation im unteren Bereich des Projektperimeters konzentriert sich die Strömung dort auf der rechten Seite des Gerinnes. Folglich sind die Fließgeschwindigkeiten ab der Stufe Nr. 9 auf der rechten Seite des Gerinnes grösser als links.

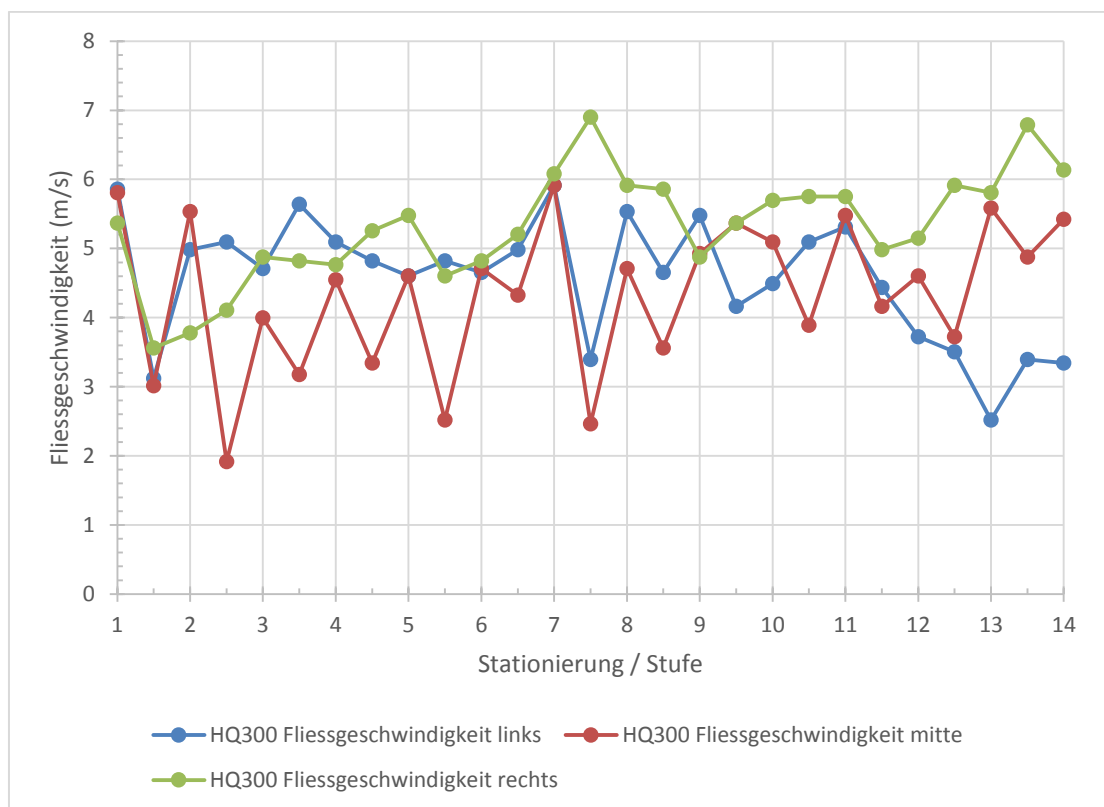


Diagramm 19: Vergleich der Fließgeschwindigkeiten beim HQ<sub>300</sub>.

Wie schon bei der Abflusstiefe ist im Diagramm 20 ersichtlich, dass der Einfluss der Stufenvarianten auf die Fließgeschwindigkeit nicht sonderlich gross ist. Somit unterscheidet sich auch die Belastung der Böschung nicht massgebend bei den unterschiedlichen Stufenvarianten.

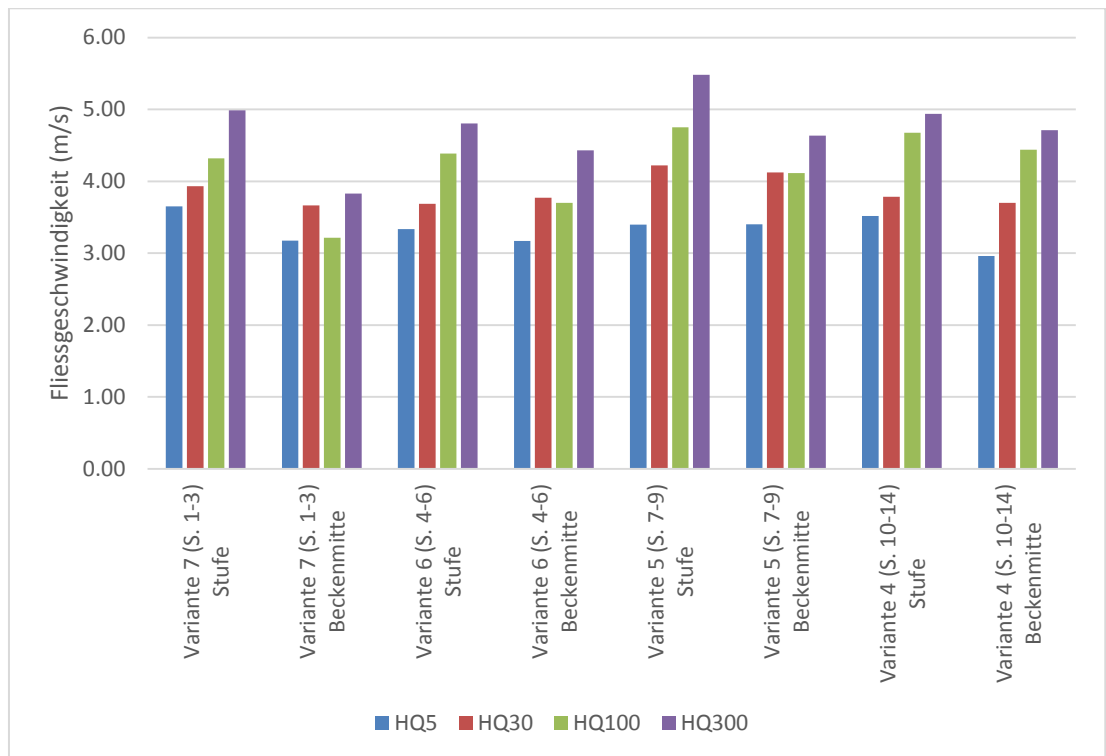


Diagramm 20: Vergleich der gemittelten Fließgeschwindigkeit für die einzelnen Stufenvarianten bei HQ<sub>5</sub> bis HQ<sub>300</sub>.

### 14.3

#### Fazit der Vermessung des Gerinnes bei Hochwasserereignissen

Da die Böschungen während den Versuchen fest eingebaut waren und noch dimensioniert werden müssen, dienen diese Messungen als Grundlage für die Böschungsbemessung. Die verschiedenen Stufenvarianten sind grundsätzlich gleich aufgebaut und weisen ähnliche Abmessungen auf. Da die Grösse und Anzahl der Blöcke im Erosionsschutz der Sohle nur einen geringen Einfluss auf die Abflusstiefen und die Fließgeschwindigkeiten hat, kann aufgrund dieser Messungen keine Stufenvariante bevorzugt werden.

## 15 VERSUCH A2\_05.1

### Einbau Sohle

Nach dem Versuch A2\_04.1 wurde entschieden, dass die Stufen der Variante 6 den Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit und Stabilität entsprechen und diese Parameter nicht weiter optimiert werden müssen. Bei der Sitzung betreffend der Ethohydraulik vom 20. Januar 2017 wurde entschieden, dass die Fischdurchgängigkeit der Stufen bei einem weiteren Versuch optimiert werden soll. Jede Stufe soll mindestens eine Aufstiegs-lücke aufweisen, um den Fischen den Auf- bzw. Abstieg zu erleichtern. Um den Fischbiologen die Beurteilung der Fischdurchgängigkeit zu erleichtern, sollen die Aufstiegs-lücken nach der Belastung bei kleinen, für die Fischwanderung massgebenden Abflüssen vermessen werden.

Die Stufen 7 bis 9 wurden vor dem Versuch abgebrochen und neu aufgebaut gemäss Variante 6 (Die restlichen Stufen wurden nach dem Versuch A2\_04.1 nicht verändert). Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass bei jeder Stufe die Blöcke der beiden Blockreihen an einer Stelle nicht ineinander verzahnt positioniert werden. So soll sich über beide Blockreihen eine Rinne bilden, die nicht durch Blöcke verstellt ist. Den Fischen wird dadurch der Aufstieg erleichtert und beim Abstieg wird die Verletzungs-gefahr vermindert. Um die Dynamik der Gerinnesohle zu erhöhen, wurden diese Aufstiegs-lücken wechselseitig zwischen dem ersten und zweiten Block nach der Böschung angeordnet.



Abbildung 88: Stufen 8 und 9 mit Kolkenschutz mit rot markierten Aufstiegs-lücken.

Während der Belastung mit der HQ<sub>100</sub>-Ganglinie wurde die Stufe 6 beschädigt. Da auch die Stabilität der anderen Stufen durch die grossen und lang andauernden Belastungen reduziert wurde, wurde entschieden, dass die Stufen 2 bis 6 vor der Belastung mit der HQ<sub>300</sub>-Überlastfall-Ganglinie abgebrochen und neu aufgebaut werden sollen. Auch diese fünf Stufen wurden nach Variante 6 gebaut und wurden mit der Aufstiegs-lücke für die Fischdurchgängigkeit ausgestattet. Da die erste Stufe in Mörtel versetzt wurde, wurde ausschliesslich die Kolkwanne im ersten Becken neu erstellt.

Stufen Nr.	1 bis 6	7 bis 9	10 bis 14
Einbau für A2_05.1_HQ100G	Stufen aus Versuch A2_03.1	Variante 6	Stufen aus Versuch A2_03.1
Stufen für A2_05.1_HQ300G	Variante 6	Stufen aus A2_05.1_HQ300G	Stufen aus Versuch A2_03.1

Tabelle 19: Varianten Stufenaufbau Versuch A2\_04.1.

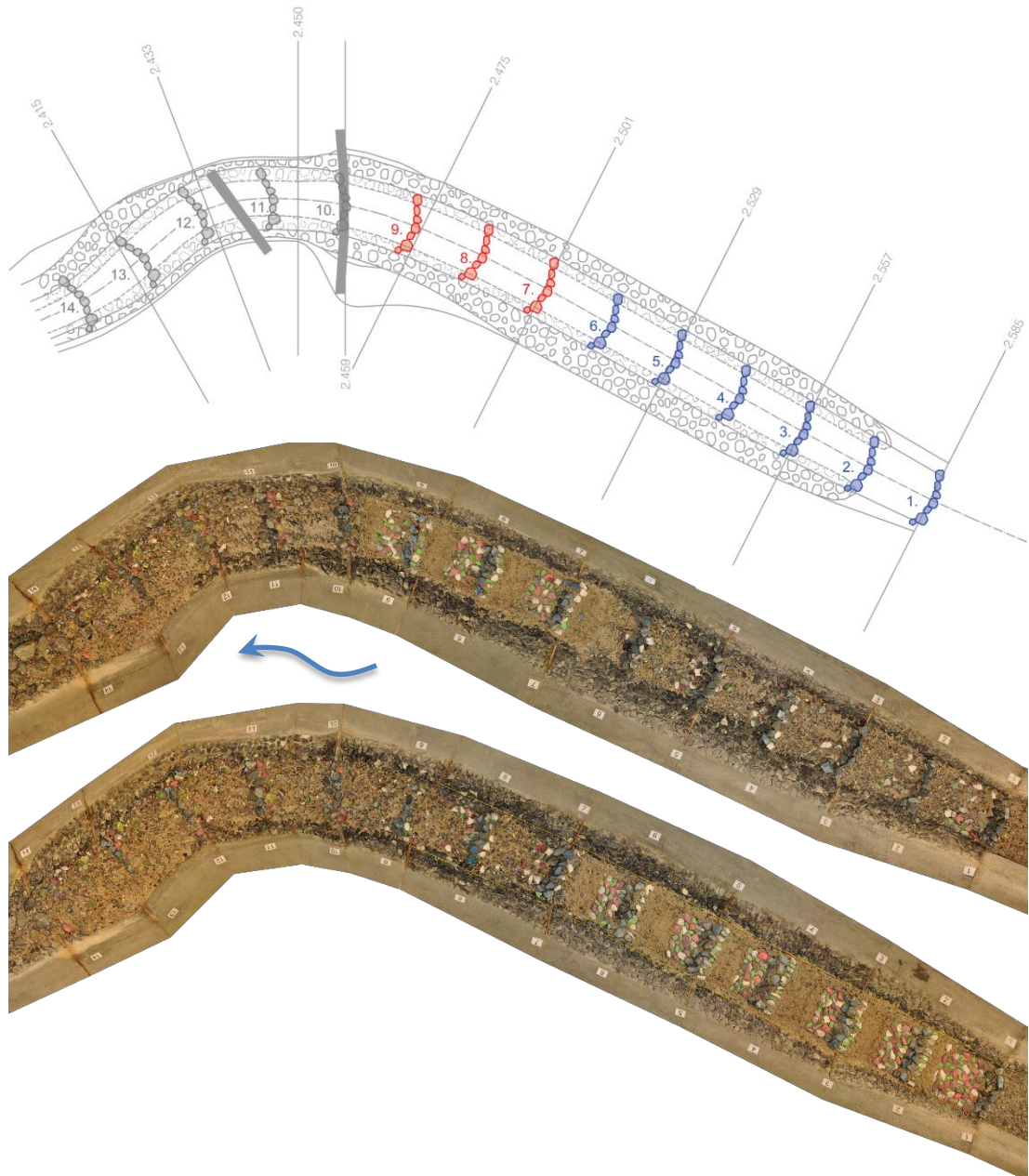


Abbildung 89: Skizze (oben) mit eingebauten Stufen (rot: A2\_05.1\_HQ100G und blau: A2\_05.1\_HQ300G) und Orthophoto der beiden Umbauten (mitte: A2\_05.1\_HQ100G und unten: A2\_05.1\_HQ300G).



## 15.1 Teilversuch A2\_04.1\_HQ100G

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit einer Ganglinie des hundertjährigen Hochwassers belastet. Der Spitzenabfluss der Ganglinie betrug  $98.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Nach 16.1 h wurde der Versuch zurückgefahren. Parallel zur Abflussganglinie wurde das Gerinne mit der reduzierten Geschiebeganglinie belastet. Der maximale Geschiebeeintrag lag bei rund  $329 \text{ kg/s}$ .

### Beobachtungen

Mit diesem Versuch soll zum einen die Stabilität der mit der Aufstiegsrücke ausgestatteten Stufen überprüft und zum anderen die Stufen so ausgebildet werden, dass anschliessend die Messungen für die Beurteilung der Fischdurchgängigkeit durch die Fischbiologen durchgeführt werden können.

Auf Abbildung 90 ist zu erkennen, dass sich der Kolk nach der Belastung mit der  $HQ_{100}$ -Ganglinie bei der Stufe 9 nicht so stark ausgebildet hat wie den bei Stufen 6 bis 8, obwohl alle gleich aufgebaut wurden.



Abbildung 90: Stufen 6 bis 10 nach A2\_05.1\_HQ100G bei Niederwasser.

Auch wenn sich die Kolke nicht gleichmässig stark ausgebildet haben, war die Stabilität der drei neu gebauten Stufen stets gewährleistet. Die Verminderung der Stabilität infolge der Aufstiegsrücken ist folglich in einem akzeptablen Rahmen. Abbildung 91 zeigt Stufe 7 und 8 bei Niederwasser nach dem Teilversuch A2\_05.1\_HQ100G. Die vorgesehenen, rot markierten Aufstiegsrücken haben sich wie gewünscht ausgebildet und führen Wasser.



Abbildung 91: Stufen 7 und 8 nach A2\_05.1\_HQ100G bei Niederwasser.

Die neu gebauten Stufen 7 bis 9 blieben während der HQ<sub>100</sub>-Ganglinie zwar stabil, jedoch wurde die Stabilität der Stufen im oberen Teil des Projektperimeters durch die vielen Belastungen reduziert. Während dem Versuch A2\_04.1 wurden die Stufen mit einer HQ<sub>100</sub>- und einer HQ<sub>300</sub>-Überlastfall-Ganglinie belastet. Beim Überlastfall wurde das Gerinne mit einem HQ<sub>100</sub> ohne Geschiebebeschickung belastet. Dabei wurden die Feianteile aus dem Projektperimeter geschwemmt, die Sohle wurde dadurch rauer und die Kolke tiefer. Während den anschliessenden Abschlussmessungen wurde die Sohle jeweils rund 6 Stunden mit dem HQ<sub>5</sub> und HQ<sub>30</sub> ohne Geschiebebeschickung und jeweils rund 3 Stunden mit dem HQ<sub>100</sub> und HQ<sub>300</sub> mit Geschiebebeschickung belastet. Zusätzlich wurde die Sohle noch mit verkürzten HQ<sub>100</sub>-Ganglinien für Präsentationszwecke belastet. Die wiederholte Belastung mit den hohen Abflüssen und unterschiedlichem Geschiebetrieb vermochte die Stufen zu schwächen. Deshalb löste das Wasser bei diesem Teilversuch einen Block der oberen Blockreihe der Stufe 6 und verschob ihn in den nachfolgenden Beckenbereich. Der verschobene Block ist auf Abbildung 92 rot markiert. Die Stufe ist jedoch nicht kollabiert, obwohl der Block bereits kurz nach der Hochwasserspitze bei einem Abfluss von 97.0 m<sup>3</sup>/s verschoben wurde.



Abbildung 92: Stufen 5 bis 7 nach A2\_05.1\_HQ100G bei Niederwasser.

Vor der Belastung mit der HQ<sub>300</sub>-Überlastfall-Ganglinie muss eine so geschwächte Stufe erneuert werden. Da die Wahrscheinlichkeit gross ist, dass auch die restlichen Stufen beschädigt werden, wenn die Belastung weiter gesteigert wird. Die Stabilität einer reparierten Stufe, bei der einzelne ausgetragene Blöcke zurückgesetzt wurden, ist nicht gleich hoch, wie bei einer von Grund auf neu gebauten Stufe. Deshalb ist es sinnvoller eine beschädigte Stufe ganz abzubauen und neu aufzubauen. Da der Kolkschutz nach der ersten Stufe und die oberen Blockreihen der Stufen 2 und 3 ebenfalls schon seit dem Teilversuch A2\_04.1\_HQ300G geschwächt waren, wurde entschieden die Stufen 1 bis 6 neu aufzubauen. Bei der ersten Stufe wurde nur der Kolkschutz neu gebaut, da die Stufe in Mörtel versetzt worden war. Die Stufen 2 bis 6 wurden auch nach Variante 6 aufgebaut, wobei die Aufstiegslücke auch hier wechselseitig angeordnet wurde. So kann die Auswirkung der veränderten Anordnung der Blöcke auf die Stabilität und Fischdurchgängigkeit genauer untersucht werden.

Nach dem Einbau der Stufen 7 bis 9 wurde vorgeschlagen, die Blöcke des Erosionsschutzes oberhalb der Stufen nicht wie bisher flach hin zu legen, sondern stehend zu platzieren. So soll einem Aufschlagen der springenden Fische entgegen gewirkt werden. Beim Umbau der Stufen 2 bis 6 wurde der Vorschlag umgesetzt und die Blöcke wurden so positioniert, dass die A-Achse in Fliessrichtung liegt und die B-Achse vertikal ausgerichtet ist. Abbildung 93 zeigt die Stufen 4 und 5 mit den so angeordneten Blöcken im oberwasserseitigen Erosionsschutz. Die Aufstiegsrücken sind jeweils rot markiert.

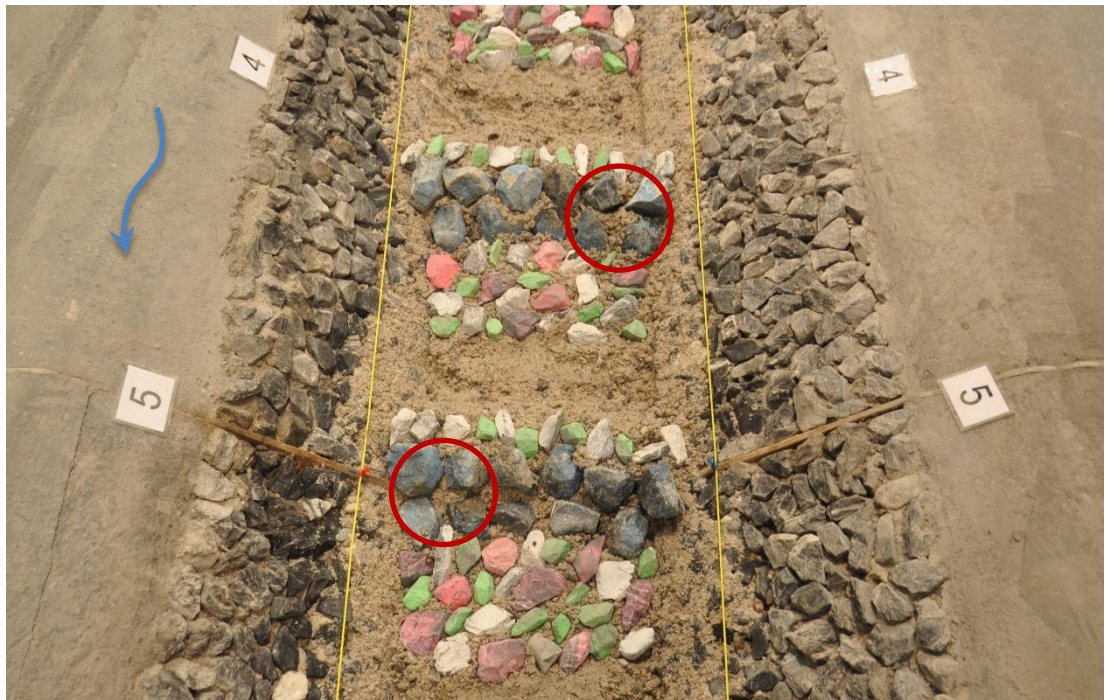


Abbildung 93: Stufen mit Kolksschutz während dem Umbau nach A2\_05.1\_HQ1000G.

## 15.2 Teilversuch A2\_04.1\_HQ300G

### Versuchsdurchführung

Bei diesem Teilversuch wurde die Sohle mit der Ganglinie des dreihundertjährigen Hochwassers kombiniert mit dem Überlastfall belastet. Während der Abflussganglinie wurde das Gerinne mit Geschiebe belastet. Der Spitzenabfluss der Ganglinie betrug  $115.0 \text{ m}^3/\text{s}$  und der maximale Geschiebeeintrag  $401 \text{ kg/s}$ . Der Teilversuch dauerte rund 18.9 h.

### Beobachtungen

Sowohl die vor diesem Teilversuch neu gebauten, wie auch die bereits mehrfach belasteten Stufen haben die Belastung durch die HQ<sub>300</sub>-Überlastfall-Ganglinie überstanden. Wobei sich auch hier die Kolke in den Beckenbereichen sehr unterschiedlich ausgebildet haben (siehe Abbildung 94). Die Kolke nach Stufe 2 und 5 sind viel tiefer als die nach Stufe 3 und 4.



Abbildung 94: Stufen 2 bis 6 nach A2\_05.1\_HQ300G bei Niederwasser.

Wie auf Abbildung 95 zu erkennen ist, wurde der Kolkenschutz der Stufe 5 beschädigt und teilweise ausgetragen. Somit wurde erneut aufgezeigt, dass die nicht fixierten Blöcke bei grossen Belastungen ausgetragen werden können. Wenn der Erosionsschutz wie bei der Stufe Nr. 5 erodiert wird, kann die untere Blockreihe wie bei früheren Versuchen unterspült werden und dadurch in den Kolk abrutschen. Durch den fehlenden Rückhalt vom Unterwasser haben sich die mittleren Blöcke leicht in Richtung Unterwasser verschoben. Die Blöcke links und rechts von der Aufstieglücke haben sich auch so verschoben, dass der Fischaufstieg nicht mehr ohne Hindernis möglich ist. Vergleich Abbildung 95 mit Abbildung 93.



Abbildung 95: Stufe 5 nach A2\_05.1\_HQ300G.

Die Blöcke, die den oberwasserseitigen Erosionsschutz bilden, wurden bei den Stufen 2 bis 6 beim Einbau nicht mehr flach positioniert sondern aufgestellt. Es hat sich gezeigt, dass die Blöcke dadurch nichtweniger stabil sind, sondern eher im Gegenteil an Stabilität gewinnen. Sie sind tiefer in der Sohle verankert und das Wasser hat somit eine kleinere Angriffsfläche und es wirkt weniger Kraft auf den einzelnen Block.

Abbildung 96 zeigt die Stufen 2 bis 6 nach der Belastung mit der HQ<sub>300</sub>-Überlastfall-Ganglinie. Rot markiert sind die eingebauten Aufstiegsrücken. Beim kleinsten möglichen Abfluss, der mit der installierten Pumpe stabil gefahren werden kann, führen die Aufstiegsrücke fast aller Stufen (ausser Stufe 5) Wasser. Jedoch konzentriert sich der Abfluss nicht nur in den Aufstiegsrücken, sondern fliesst auch durch andere Lücken in den oberen Blockreihen.

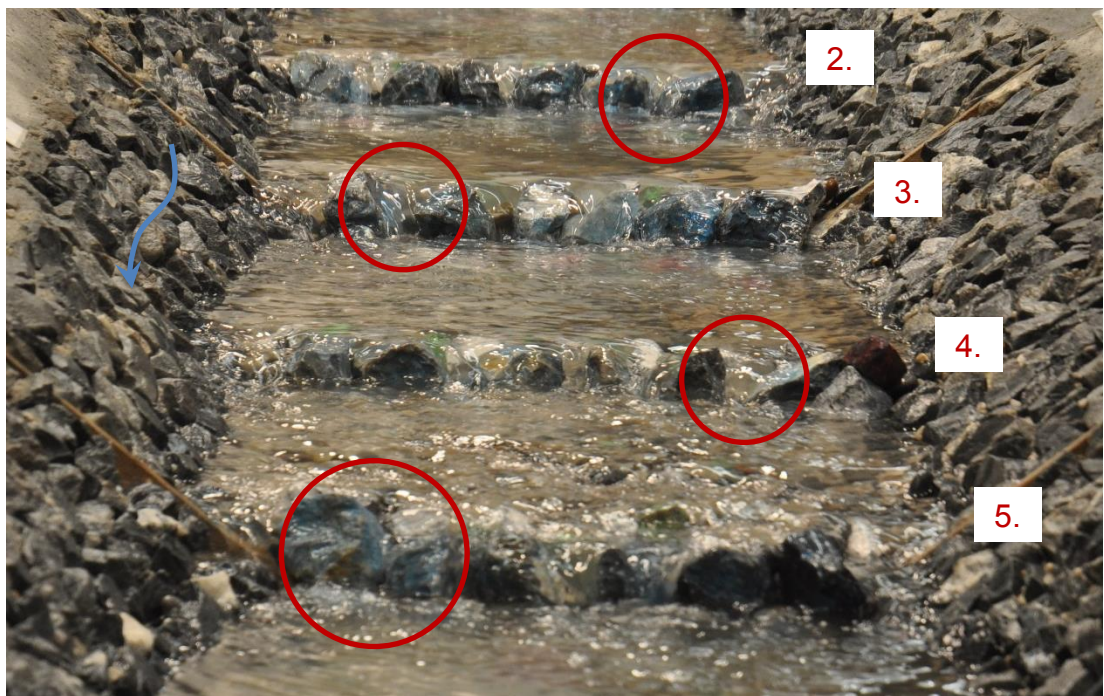


Abbildung 96: Stufen 2 bis 5 nach A2\_05.1\_HQ300G bei Niederwasser.

### 15.3 **Fazit aus dem Versuch A2\_05.1**

Mit diesem Versuch wurde hauptsächlich untersucht, ob die Möglichkeit besteht, die Stufen für die Fischdurchgängigkeit zu optimieren, ohne dabei die Stabilität zu reduzieren. Dafür wurden die Blöcke, die die Stufen bilden, beim Einbau so versetzt, dass sich eine Aufstiegs-lücke für die Fische bildet. Der Versuch hat aufgezeigt, dass die Stabilität der Stufe durch die Lücke nicht gross beeinträchtigt wird.

Erneut konnte beobachtet werden, dass sich die Strömung und somit die Kolke nicht über alle Stufen gleich stark ausbildet. Bei Stufe 5 wurden fast alle Blöcke des Kolk-schutzes ausgetragen. Um ein allfälliges Abrutschen der Stufe in den Kolk und somit einen Kollaps der Sohle zu verhindern, können die Blöcke der Stufe in Beton versetzt werden. Die Stabilität der Sohle wird damit enorm gesteigert ohne die Natürlichkeit des Gerinnes zu fest zu beeinträchtigen.

Die Blöcke des Erosionsschutzes oberhalb der Stufen 2 bis 6 wurden beim Umbau nach der HQ<sub>100</sub>-Ganglinie nicht flach, sondern stehend verbaut, so dass die A-Achse in Fliessrichtung und die B-Achse vertikal ausgerichtet ist. Diese Ausrichtung soll das Risiko vermindern, dass springende Fische sich beim Aufprall auf einen Block verletzen. Es hat sich herausgestellt, dass die Blöcke dadurch nicht an Stabilität verlieren, sondern gewinnen. Es müssen jedoch mehr Blöcke verbaut werden, da die Blöcke stehend weniger Breite beanspruchen.

## 16 MESSUNGEN ETHOHYDRAULIK

Die Fischdurchgängigkeit der Stufen soll zusätzlich durch externe Fischbiologen beurteilt werden. Dafür sind zusätzliche Messungen bei den für die Fischwanderung relevanten Abflüssen notwendig. Um die optimalen Bedingungen dafür zu schaffen, wurde das Gerinne vor den Messungen mit einem geschiefbeführenden Abfluss belastet, der dem  $HQ_5$  ( $64.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) entspricht. So wurden die beim Überlastfall bei Teilversuch A2\_04.1\_HQ300G leer geräumten Beckenbereiche wieder teilweise mit Geschiebe verfüllt.

Für die Abschätzung der Fischdurchgängigkeit durch die Fischbiologen wurden die Aufstieglücken bei den für die Laichwanderung massgebenden Abflüssen vermessen. Aufgrund der Abflussdaten der Jahre 2003 bis 2016 der Station Zweilütschinen an der Weissen Lutschine wurde durch die Fischbiologen eine Dauerkurve und eine Häufigkeitsverteilung der Abflüsse von den Monaten September bis Dezember erstellt. Darauf basierend wurden das 10% Quantil ( $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ), der Mittelwert ( $4.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ) und das 90% Quantil ( $9.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) als für die Messungen massgebende Abflüsse festgelegt. Um die kleinen Abflüsse genau einstellen zu können, wurde eine zusätzliche Pumpe sowie Schwebekörperdurchflussmesser installiert.

Von den acht nach Variante 6 gebauten und mit Aufstieglücken versehenen Stufen wurden die Stufen 2 bis 4 und 6 bis 8 vermessen. Wie bereits erwähnt, hat sich bei der Stufe 5 der Kolk stark und bei der Stufe 9 sehr schwach ausgebildet. Deshalb wurden diese beiden Stufen bei der Vermessung nicht berücksichtigt.

Bei der Vermessung der Parameter und der anschliessenden Interpretation der Messresultate ist darauf zu achten, dass der Modellähnlichkeit nicht bei beliebig kleinen Abflüssen angewendet werden kann. Wird die Abflusstiefe zu klein, kann die Oberflächenspannung des Wassers den Wasserspiegel beeinflussen und die Rauigkeit der Sohle wird nicht mehr korrekt abgebildet. Zusätzlich werden die kleinen Geschiebefraktionen (kleiner als  $6 \text{ mm}$ ) im Modell nicht richtig abgebildet, da das Modell für die hydraulische Belastbarkeit ausgelegt wurde und nicht für Morphologische Untersuchungen. Kleinräumigen Strukturen wie Bänke, Niederwasserrinnen und Kolkstrukturen werden deshalb nicht korrekt abgebildet und verändern sich bei jedem Hochwasser.

Für die Beurteilung durch die Fischbiologen sind folgende Parameter massgebend.

- Wasserspiegeldifferenz beim der Stufe
- Kolkentiefe unterhalb der Aufstieglücke
- Geschwindigkeit in Engstelle
- Wassertiefe im Talweg an der seichtesten Stelle
- Länge der Engstelle (Strecke mit erhöhter Geschwindigkeit)
- Wassertiefe in Engstelle

Im folgenden Teil sind die Resultate der Messungen aufgelistet und bei Bedarf ihre Genauigkeit und Übertragbarkeit kommentiert.

### 16.1 Wasserspiegeldifferenz beim der Stufe

Um die Wasserspiegeldifferenz berechnen zu können, wurde mit dem Stechpegel der Wasserspiegel oberhalb (bevor das Wasser sich beschleunigt) und unterhalb der eingebauten Aufstiegs-lücke (eingestautes Wasser im Pool) gemessen.

Abfluss	Minimaler Wert	Maximaler Wert	Mittelwert
1.4 m <sup>3</sup> /s	0.66 m	0.83 m	0.73 m
4.3 m <sup>3</sup> /s	0.44 m	1.11 m	0.75 m
9.6 m <sup>3</sup> /s	0.69 m	0.90 m	0.74 m

Tabelle 20: Zusammenfassung Messresultate "Wasserspiegeldifferenz bei der Stufe".



Abbildung 97: Wasserspiegelmessung bei Stufe 8 mit Stechpegel bei 1.4 m<sup>3</sup>/s.

### 16.2 Kolk-tiefe unterhalb der Aufstiegs-lücke

Zusätzlich wurde die Sohlenlage in den Pools direkt unterhalb der Aufstiegs-lücken gemessen. Der somit vermessene Kolk ist nicht zwingend der tiefste auf der ganzen Gerinnebreite. Es wurde der Kolk vermessen, den der Fisch als letztes durchquert bevor er durch die Aufstiegs-lücke in Richtung Oberwasser schwimmt.

Abfluss	Minimaler Wert	Maximaler Wert	Mittelwert
1.4 m <sup>3</sup> /s	0.75 m	1.17 m	0.99 m
4.3 m <sup>3</sup> /s	1.01 m	1.35 m	1.17 m
9.6 m <sup>3</sup> /s	1.08 m	1.50 m	1.34 m

Tabelle 21: Zusammenfassung Messresultate „Kolk-tiefe unterhalb der Aufstiegs-lücke“.



### 16.3 Geschwindigkeit in Engstelle

Die Fließgeschwindigkeit des Wassers wurde mit einem Micro-Messflügel der Firma Schildknecht gemessen. Bei kleinen Abflüssen können die Fließgeschwindigkeiten durch den Messflügel beeinflusst werden, da der Messflügel einen verhältnismässig grossen Widerstand erzeugt in den kleinen zu vermessenden Abflussquerschnitten. Die Geschwindigkeit wurde oberhalb des Beckenbereiches im Unterwasser gemessen. Somit wurde die maximale Geschwindigkeit gemessen. Es ist zu beachten, dass sich das Wasser beim Durchfliessen der Blöcke beschleunigt und die Fische nicht über die ganzen Länge konstant mit dieser Geschwindigkeit schwimmen müssen.

Abfluss	Minimaler Wert	Maximaler Wert	Mittelwert
1.4 m <sup>3</sup> /s	2.19 m/s	3.29 m/s	2.92 m/s
4.3 m <sup>3</sup> /s	2.90 m/s	3.61 m/s	3.32 m/s
9.6 m <sup>3</sup> /s	3.23 m/s	3.72 m/s	3.50 m/s

Tabelle 22: Zusammenfassung Messresultate "Geschwindigkeit in Engstelle".

### 16.4 Wassertiefe im Talweg an der seichtesten Stelle

Die Wassertiefe an der seichtesten Stelle im Talweg wurde mit dem Stechpegel abgeschätzt. Die Resultate sollten jedoch mit Vorsicht betrachtet werden, da die Abflusstiefen in diesen Bereichen sehr gering sind, können Verfälschungen auf Grund der Oberflächenspannung des Wassers auftreten. Abbildung 98 zeigt die Vermessung des Talwegs oberhalb der Stufe 4 bei einem Abfluss von 1.4 m<sup>3</sup>/s. Es ist schwer abzuschätzen wo die seichteste Stelle genau ist. Nach jedem Hochwasser mit Geschiebetransport liegt die seichteste Stelle an einem anderen Ort.

Abfluss	Minimaler Wert	Maximaler Wert	Mittelwert
1.4 m <sup>3</sup> /s	0.21 m	0.69 m	0.39 m
4.3 m <sup>3</sup> /s	0.45 m	0.78 m	0.60 m
9.6 m <sup>3</sup> /s	0.57 m	1.02 m	0.76 m

Tabelle 23: Zusammenfassung Messresultate „Wassertiefe im Talweg an der seichtesten Stelle“.



Abbildung 98: Vermessung des Talwegs an der seichtesten Stelle oberhalb Stufe 4 bei 1.4 m<sup>3</sup>/s.

### 16.5 Länge der Engstelle (Strecke mit erhöhter Geschwindigkeit)

Die Länge der Engstelle wurde mit dem Massstab abgeschätzt. Dafür wurde die horizontale Distanz gemessen, bei der das Wasser mit erhöhter Geschwindigkeit durch die Aufstieglücke fließt. Die angegebenen Werte sollen als Abschätzungen betrachtet werden und sind keine genauen Resultate. Da die Geschwindigkeit vor allem im Oberwasser allmählich beschleunigt wird, fällt es schwer den Ort zu definieren, wo der Bereich mit der erhöhten Geschwindigkeit beginnt.

Abfluss	Minimaler Wert	Maximaler Wert	Mittelwert
1.4 m <sup>3</sup> /s	0.60 m	3.15 m	1.20 m
4.3 m <sup>3</sup> /s	1.20 m	2.10 m	1.48 m
9.6 m <sup>3</sup> /s	1.35 m	2.40 m	1.73 m

Tabelle 24: Zusammenfassung Messresultate "Länge der Engstelle".

### 16.6 Wassertiefe in Engstelle

Die Wassertiefe in der Engstelle wurde mit einem Massstab gemessen. Die Messung ist jedoch als Abschätzung zu betrachten.



Abbildung 99: Vermessung der Abflusstiefe in der Engstelle bei Stufe 2 bei 1.4 m<sup>3</sup>/s.

Abbildung 99 zeigt die Vermessung der Abflusstiefe in der Aufstieglücke bei der Stufe 2 während einem Abfluss von 1.4 m<sup>3</sup>/s. Obwohl der Massstab sehr schmal ist, beeinflusst er den Wasserspiegel, da das Wasser in der Aufstieglücke konzentriert auf einer kleinen Breite mit einer hohen Geschwindigkeit abfließt. Zusätzlich ist es schwer den massgebenden Querschnitt zu finden und die Wassertiefe im richtigen Winkel zu messen.

Abfluss	Minimaler Wert	Maximaler Wert	Mittelwert
1.4 m <sup>3</sup> /s	0.18 m	0.69 m	0.41 m
4.3 m <sup>3</sup> /s	0.42 m	1.02 m	0.67 m
9.6 m <sup>3</sup> /s	0.57 m	1.05 m	0.80 m

Tabelle 25: Zusammenfassung Messresultate "Wassertiefe in Engstelle".

## 16.7 **Fazit Messungen Ethohydraulik**

Mit diesen Messungen wurden die Grundlagen für die Beurteilung der Fischdurchgänglichkeit durch die Fischbiologen geschaffen. Die gewünschten Parameter wurden so gut wie möglich vermessen und aufgelistet. Gewisse Resultate sollen jedoch viel mehr als Abschätzung angesehen werden, und nicht als genaue Messresultate. Bei den gering Abflüssen und Abflusstiefen können die Werte nicht mehr massstäblich umgerechnet werden, da die Modellgesetze nicht mehr gelten. Zusätzlich wird der Einfluss der Messungenauigkeit der Messinstrumente immer grösser, je geringer die Abflüsse werden. Weiter ist zu beachten, dass sich die Sohlengeometrie nach geschiebeführenden Abflüssen jeweils verändert.

## 17 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

In diesem Kapitel werden aufgrund der zuvor vorgestellten Versuchsergebnisse sowie Diskussionen Schlussfolgerungen gezogen und auf diesen basierend die Empfehlungen für das Stufen-Becken-Gerinne Sandweidli formuliert.

### 17.1 Schlussfolgerungen

Während der Versuchsserie A1 hat sich herausgestellt, dass sich ein natürliches Stufen-Becken-Gerinne nur beschränkt bildet und die gebildeten Strukturen sehr instabil sind. Rinnenbildungen, Strömungskonzentrationen und Geschiebebeigabe führten dazu, dass die Sohlenstrukturen bei allen Versuchen kollapsartig versagten. Nach jeder Abflusssteigerung lagerten sich Blöcke um und die Strukturen im Gerinne veränderten sich wieder. Die im Vergleich zur Blockgrösse relativ hohe Gerinnebreite liess eine Stufenbildung nicht zu. Die Blöcke vermochten sich nicht ineinander Verzahnen und konnten sich somit nicht gegenseitig stabilisieren. Gewisse Strukturen konnten jedoch vermessen werden. Die daraus gewonnen Erkenntnisse dienten anschliessend als Grundlage für die Ausarbeitung der Stufenabmessungen der künstlich gebauten Stufen der Versuchsserie A2.

Bei der Versuchsserie A2 wurden die Stufen folglich künstlich eingebaut. Die ersten Versuche in einem reduzierten Projektperimeter mit sechs Stufen haben gezeigt, dass sich die Geometrie der Stufen-Becken-Sequenzen bewährt haben, die gewählten Stufenabmessungen sinnvoll sind und so in den nächsten Versuchen übernommen werden können. Im nächsten Schritt wurden 14 Stufen verteilt auf den gesamten Projektperimeter verbaut. Somit konnte auch die Kurvensituation im Projektperimeter untersucht werden. Immer wieder wurden Stufen zerstört, teilweise mit kollapsartigem Versagen und begleitet von grosser Erosionsbildung im Oberwasser. Nicht nur im Modell sondern besonders auch bei der Umsetzung in der Natur wird der Einbau der Stufen aufgrund der Platzverhältnisse und der unterschiedlichen Geometrien der einzelnen Blöcke sehr kompliziert sein. Aufgrund dessen und der grossen Gerinnebreite im Verhältnis zur Blockgrösse können sich die Blöcke nur schlecht selbst stabilisieren und verzahnen. Werden die Blöcke nicht im Beton versetzt, ist das System nicht robust und überlastfähig. Im Modell wurden mehrere Male, insofern dies möglich war, beschädigte Stufen repariert, um den Versuch weiterführen zu können. Die reparierten Stufen hielten nach der letzten Reparatur auch den grossen Abflüssen stand. Die zusätzliche Sicherung im Aussenbereich der Kurve im Projektperimeter hat eine Rinnenbildung verhindert. Die Stufen im Kurvenbereich hatten im Allgemeinen keine Stabilitätsprobleme.

Sieben Varianten für den Stufenaufbau wurden überprüft. Der Aufbau der zweireihigen Blockstufe wurde grundsätzlich nicht gross verändert. Jedoch wurden der Kolk-schutz und die Verfüllung der Beckenbereiche bei den verschiedenen Varianten verändert und gleichzeitig optimiert. Die Anzahl und Grösse der eingebauten Blöcke wurde ständig reduziert, wodurch beim Bau Aufwand und Kosten gespart werden können. Die letzte und am wenigsten befestigte Variante hat aufgezeigt, dass der Erosionsschutz nicht nach Belieben minimiert werden kann und die Sohle mit Blöcken einer gewissen Grösse gegen Erosion geschützt werden muss. Zum Schluss wurde die beste Variante 6 noch in Hinsicht auf die Fischdurchgängigkeit optimiert. Eine Aufstiegs-lücke für die Fische wurde eingebaut, so dass bei jeder Stufe eine Rinne vorhanden ist, die nicht durch grössere Blöcke verstellt ist.

Die Fischdurchgängigkeit wird durch die geplanten Strukturen massgebend verbessert, sie wird zusätzlich durch externe Fischbiologen beurteilt.

## 17.2 Empfehlungen

Anhand der Erkenntnisse der Versuchsserie A1 wurde entschieden, dass der Abstand zwischen den zweireihigen Blockstufen in der Versuchsserie A2 14.0 m betragen soll. Mit dem vorgegebenen Sohlengefälle von 6 % ergibt das 0.84 m Brutto-Höhenunterschied von Stufe zu Stufe. Um die Strömung von der Böschung weg zu lenken, sollen die Stufen, leicht gebogen werden, so dass die Strömung in die Sohlenmitte gelenkt wird. Aufgrund des Strömungsbildes, das sich eingestellt hat, werden diese Abmessungen für den Bau empfohlen.

Die Stufen sollen gemäss Variante 6 aufgebaut und gesichert werden. Auf die Fundationsschicht mit der Grundmischung soll eine zweireihige Blockstufe aus Blöcken mit einem Durchmesser von 1.59 m bis 1.91 m gesetzt werden. Ein 2.5 m bis 3.0 m langer Kolkenschutz aus Blöcken mit einem Durchmesser von 0.64 m bis 1.27 m soll die Kolkbildung nach den Stufen verhindern. Oberwasserseitig soll eine Blockreihe mit einem Blockdurchmesser von 0.64 m bis 1.06 m verbaut werden. Diese verhindert zum einen eine ungleichmässige Umströmung der stufenbildenden Blöcke bei Niederwasser und dient zum andern als Fixpunkt. So wird die Sohle im oberwasserseitigen Beckenbereich bei Hochwasserereignissen nicht zu tief erodiert. Da die erste Stufe stärker belastet wird, empfiehlt es sich den Beckenbereich danach mit einer Kolkwanne wie im Versuch A2\_04.1 zu sichern. Die Beckenbereiche sollen zum Schluss mit der Grundmischung aufgefüllt werden. Die Becken unterwasserseitig der Stufen und die Deckschicht darin soll sich anschliessend selbstständig ausbilden.

Zusätzlich zum Kolkenschutz unterhalb der jeweiligen Stufen, ist im Kurvenbereich auch ein Kolkenschutz auf der Kurvenaussenseite notwendig. Bereits bei der Versuchsserie A1 hat sich gezeigt, dass die Strömung durch die Kurvensituation im Bereich der rechten Böschung konzentriert wird. Aus diesem Grund soll der Fuss der in Fliessrichtung rechten Böschung durch ein 3.0 m bis 4.0 m breites Band an Blöcken mit einem Durchmesser von 0.64 m bis 1.27 m gesichert werden.

Im Verlauf der Versuche wurde die oberste Stufe mit Mörtel befestigt, um einen Fixpunkt zu schaffen. Beim Bau der Stufen-Becken-Gerinne soll im Gegensatz zum Modell nicht nur die erste Stufe in Beton versetzt werden, sondern jede zweite Stufe im ganzen Projektperimeter. Eine rasche Ausbreitung der Erosion ins Oberwasser und ein kollapsartiges Versagen des gesamten Systems wird damit verhindert. Die Infrastrukturbauten in Gewässernähe werden dadurch geschützt und aufwendige und kompliziert Reparaturarbeiten am fertiggestellten Gerinne vermieden. Die im Modell in Mörtel versetzte Stufe hat gezeigt, dass es grundsätzlich möglich ist die Stufen so zu sichern, dass der dafür verwendete Beton auch nach grossen Hochwässern nicht sichtbar ist.

Während den Versuchen wurde lediglich die Sohle beweglich eingebaut. Die Böschung, welche jedoch genauso wichtig ist für die Stabilität des Gerinnes wurde fest eingebaut. Als Grundlage für die Böschungsdimensionierung können die Abschlussmessungen verwendet werden.

Zuletzt wurden die Stufen der Variante 6 mit einer Aufstieglücke versehen, um die Fischdurchgängigkeit zu erhöhen. Dadurch wird die Stabilität der Stufen nicht reduziert. Die Fische können bei ihrer Laichwanderung davon profitieren, da die Stufen eine Rinne aufweisen, die nicht durch grössere Blöcke verstellt ist. Mit Hilfe der durchgeführten Messungen an den Aufstieglücken soll die Fischdurchgängigkeit durch externe Fischbiologen beurteilt werden. Den Fischen wird jedoch so sicherlich geholfen bei ihrem Weg ins Laichgebiet.