

Hochwasserschutz Frutigen (CH): Modellversuche zum Rückhalt von Schwemmholz in verzweigter Flussmorphologie

Andris Wyss, Florian Hinkelammert-Zens, Michael Auchli, Jana Hess, Rolf Künzi, Volker Weitbrecht

Zusammenfassung

In einem verzweigten Flussabschnitt der Engstlige oberstrom von Frutigen (Kanton Bern, CH) soll bei Hochwasser Schwemmholz zurückgehalten werden, damit es in der nachfolgenden Dorfstrecke nicht zu Verklausungen an Brücken kommt. Das Rückhaltesystem soll einen maximalen Rückhalt von Schwemmholz gewährleisten und gleichzeitig den Geschiebehaushalt nur minimal beeinträchtigen. Zudem muss das System die bestehende Geschiebebewirtschaftung weiterhin ermöglichen und das vorhandene Auengebiet von nationaler Bedeutung möglichst wenig beeinträchtigen. Um verschiedene Schwemmholzrückhaltesysteme zu untersuchen, wurde der betreffende Flussabschnitt der Engstlige (ca. 1 km Länge) in einem gegenständlichen Modell im Maßstab 1:35 untersucht. Ein ausführliches Variantenstudium zeigte, dass im Dimensionierungsszenario HQ_{100} mit verschiedenen Varianten ein Schwemmholzrückhalt zwischen 30% und 60% erreicht werden konnte. Als Bestvariante stellte sich ein Parallelrechen mit Lenkelement heraus. Dieses System wurde anschliessend optimiert und in verschiedenen Ganglinienversuchen bei HQ_5 , HQ_{100} und EHQ ($= 1.5 \times HQ_{100}$) überprüft. Ebenfalls wurde die Sensitivität des Systems auf die Schwemmholzganglinie und die Rechenlänge untersucht. Die Versuche zeigten, dass das System die Anforderungen erfüllt. Es hält 55 – 65% des zugegebenen Schwemmholzes zurück, während gleichzeitig genügend Geschiebe durch das Rückhaltesystem nach unterstrom transportiert wird. Im Überlastfall, d.h. bei einer für das System möglichst ungünstigen Schwemmholzganglinie, muss jedoch mit der Remobilisierung von Schwemmholzpaketen gerechnet werden. Allerdings wird dieses Risiko als nicht grösser als im Ist-Zustand eingeschätzt. Bei sehr seltenen Ereignissen (EHQ) zeigte das System zudem ein robustes Verhalten. Die extremen Abflüsse führten zu einer Steigerung des Rückhalts auf 77 – 88% (bei gleicher Holzzugabe wie im HQ_{100}).

1 Ausgangslage

An der Engstlige in Frutigen (Kanton Bern, CH) soll in einem verzweigten Flusslauf ein Schwemmholzrückhaltesystem gebaut werden, um die nachfolgende Dorfstrecke bei Hochwasser vor Schwemmholzverklausungen zu schützen. Die Dorfstrecke weist ein deutliches Hochwasserschutzdefizit auf. Ihre Abflusskapazität beträgt knapp HQ_{30} . In Zukunft wird die Abflusskapazität durch verschiedene bauliche Massnahmen entlang der Dorfstrecke zwar auf ein HQ_{100} ($Q = 140 \text{ m}^3/\text{s}$) erhöht (HZP 2017), trotzdem muss aufgrund des geringen Freibords weiterhin mit Schwemmholzverklausungen an den vorhandenen Brücken gerechnet werden. Dieses Risiko soll durch ein Schwemmholzrückhaltesystem oberstrom der Dorfstrecke minimiert werden. Dabei muss das geplante Schwemmholzrückhaltesystem am Standort Grassi (Abb. 1) folgenden Anforderungen genügen:

- **Schwemmholzrückhalt:** Grundsätzlich soll so viel Schwemmholz wie möglich zurückgehalten werden. Angestrebt wird jedoch kein vollständiger Schwemmholzrückhalt (>90%), sondern ein teilweiser Schwemmholzrückhalt (30 – 60%). Grund dafür sind diverse Randbedingungen, unter anderen die Systemanforderungen hinsichtlich Geschiebehaushalt, Auengebiet und Geschiebebewirtschaftung.

- **Geschiebehaushalt:** Das Schwemmholzrückhaltesystem darf den Geschiebehaushalt nicht zu stark beeinträchtigen. Bei Hochwasser muss ein gewisse Geschiebefracht am Rückhaltesystem vorbei in die Dorfstrecke transportiert werden, um unzulässige Erosionen in der Dorfstrecke zu vermeiden ($Q_S = 370 - 560 \text{ kg/s}$ bei HQ_{100}).
- **Auengebiet:** Das Schwemmholzrückhaltesystem soll das bestehende Auengebiet von nationaler Bedeutung möglichst wenig beeinträchtigen, d.h. möglichst wenig Fläche beanspruchen und die bestehende Ökomorphologie möglichst wenig verändern.
- **Geschiebebewirtschaftung:** Am Standort Grassi wird Geschiebe entnommen. Dadurch können die Sohlenlagen in der Dorfstrecke kontrolliert und Auflandungen vermieden werden. Im heutigen Zustand werden die Entnahmen wechselseitig entlang der Mittelinsel (Abb. 1a) durchgeführt. Die Mittelinsel dient dabei als Wasserhaltung und ermöglicht die Baggerungen von Geschiebe auf der trockengelegten Seite. In Zukunft muss das Rückhaltesystem weiterhin mit der Geschiebebewirtschaftung vereinbar sein. Die Mittelinsel muss dafür allerdings nicht zwingend bestehen bleiben, sondern kann zugunsten eines alternativen Geschiebebewirtschaftungskonzepts aufgegeben werden.

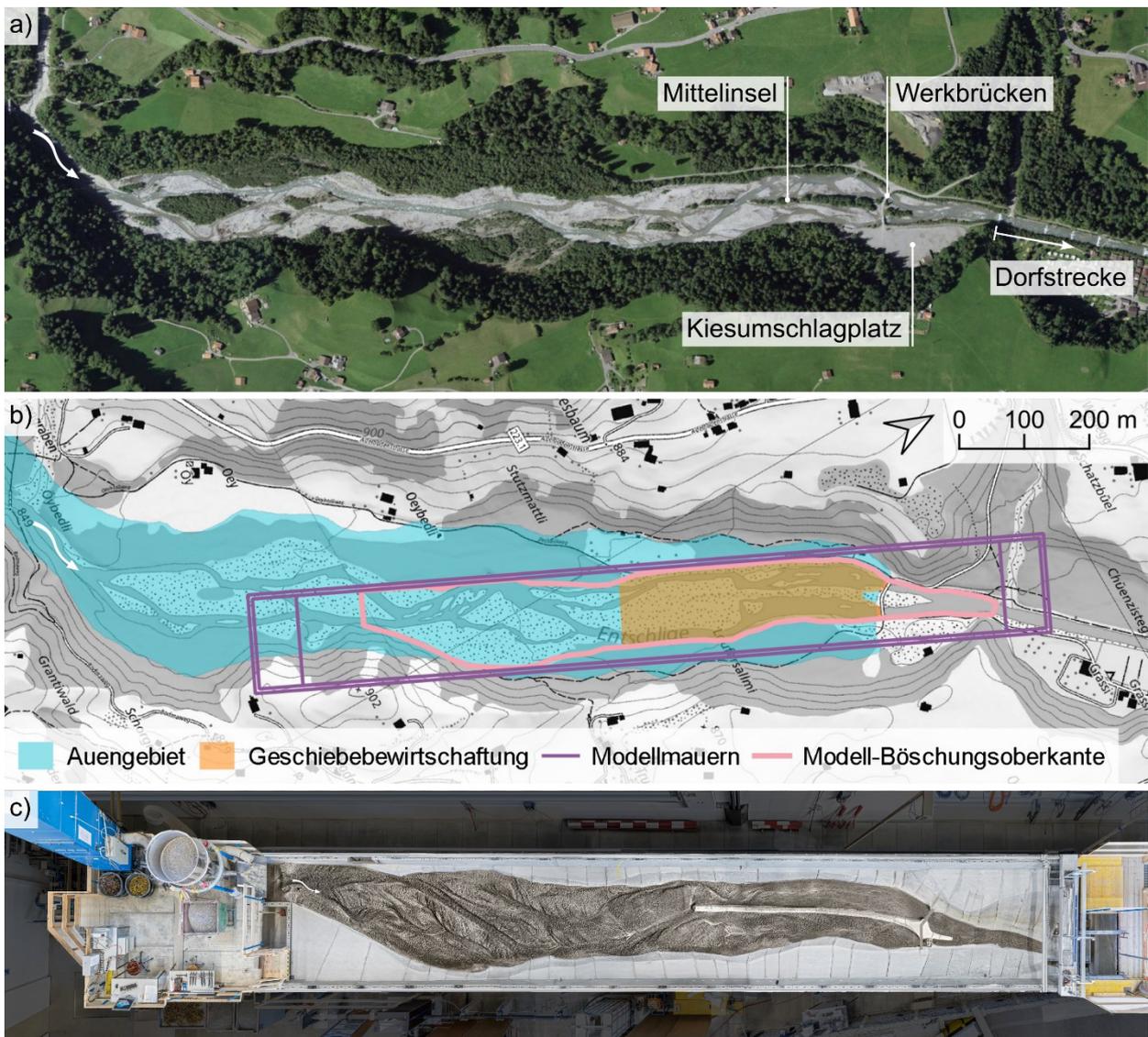


Abb. 1 Verlauf der Engstlige am Standort Grassi oberstrom des Dorfs Frutigen als a) Luftaufnahme, b) Kartenausschnitt mit Modellperimeter und c) Foto des gegenständlichen Modells in der Versuchshalle der VAW. (Quelle Luftaufnahme und Kartenmaterial: swisstopo)

2 Modellversuche

Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich wurde von der Gemeinde Frutigen beauftragt, verschiedene Konzepte von Schwemmholzrückhaltesystemen im gegenständlichen Modell zu untersuchen und darauf aufbauend einen Systemvorschlag zu entwickeln. Zu diesem Zweck wurde die Engstlige am Standort Grassi im Maßstab 1:35 nachgebildet.

Das Modell bestand bei Inbetriebnahme aus den festen Böschungen, der Mittelinsel und den Werkbrücken sowie der mobilen Flusssohle (Abb. 1c). Die Kornverteilung des Sohlenmaterials wurde aus Naturdaten ($d_{30} = 3.0$ cm, $d_{50} = 8.6$ cm, $d_{90} = 27$ cm) skaliert. Als Modellschwemmholz wurde entastetes Schnittholz ($L_H = 1 - 10$ m) eingesetzt. Das Dimensionierungsvolumen von $4'000$ fm³ Schwemmholz entsprach im Modell knapp 300 Liter Lockervolumen. Im Modell wurden verschiedene Größen messtechnisch erfasst, darunter der Modellzufluss (mittels MID), die Geschiebezugaberate (Dosieranlage), die Geschiebeaustragsrate (Wägezellen), die Schwemmholzzugabe (manuell-volumetrisch), das zurückgehaltene Schwemmholz (manuell-volumetrisch) sowie die Sohlenlagen vor und nach jedem Versuch (Laserscanner).

Das Versuchsprogramm umfasste knapp 70 Versuche und kann in folgende Versuchsreihen unterteilt werden: i) die Untersuchung des Ist-Zustands, ii) das Variantenstudium, iii) die Systemoptimierung, iv) die Überprüfung des finalen Systems mittels Ganglinienversuchen sowie v) die Untersuchung zur Sensitivität des Systems hinsichtlich der Schwemmholzganglinie und der Rechenlänge. Die Resultate der Versuchsreihen ii) bis v) sind in diesem Beitrag zusammengefasst.

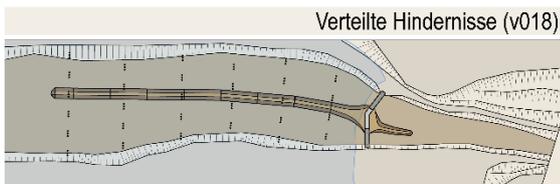
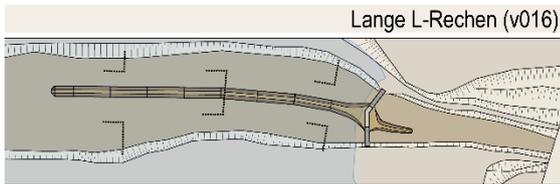
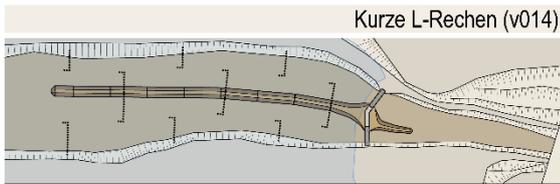
3 Resultate

3.1 Variantenstudium

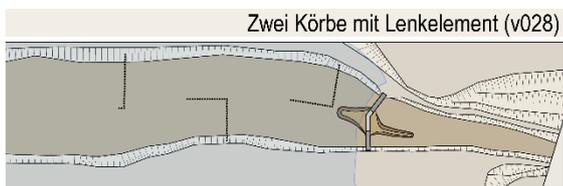
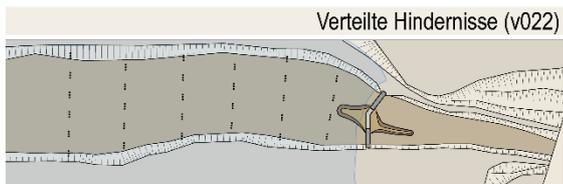
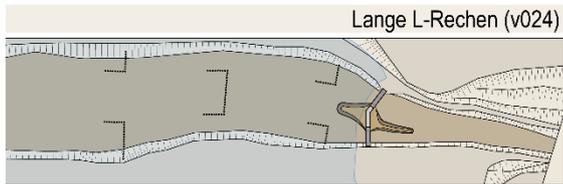
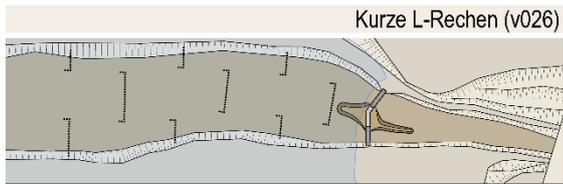
Im Variantenstudium wurden insgesamt zwölf verschiedene Schwemmholzrückhaltesysteme untersucht (Abb. 2). Neben der Anordnung der Rückhalteelemente unterschieden sich die Systeme in der Positionierung in Bezug auf des Auengebiet (innerhalb, außerhalb oder teilweise innerhalb) sowie bezüglich der Modellbestandteile (mit/ohne Mittelinsel, mit/ohne Werkbrücken). Zur Beurteilung des Schwemmholzrückhalts wurde jede Variante mit dem Dimensionierungsvolumen von $4'000$ fm³ Schwemmholz bei einem stationären Abfluss von HQ_{100} während 3 h (Naturstunden) belastet. Neun der zwölf untersuchten Varianten erreichten einen Schwemmholzrückhalt im Bereich von 30 – 70%. Jedoch hielten alle drei Varianten der Gruppe außerhalb des Auengebiets nur < 30% des Schwemmholzes zurück. Damit konnte aufgezeigt werden, dass ein relevanter Schwemmholzrückhalt nur mit einem System erreicht werden kann, das zumindest teilweise im Auengebiet steht. Die Varianten außerhalb des Auengebiets wurden entsprechend nicht weiterverfolgt.

Ein detaillierter Vergleich der verbliebenen neun Varianten verdeutlichte, dass die Variante *Parallelrechen mit Lenkelement* die Bestvariante darstellt. Gründe dafür sind neben dem effizienten Schwemmholzrückhalt, i) dass diese Variante das Auengebiet weniger stark beeinträchtigt als die meisten anderen Varianten, ii) dass die Investitionskosten für dieses System im Vergleich zu allen anderen Systemen als „mittel“ eingestuft werden, iii) dass das System eine geringe Anzahl bautechnischer Elemente beinhaltet und iv) dass das System ein gutmütiges und vorhersehbares Verhalten aufweist. Letzteres ist beispielsweise bei Systemen mit Mittelinsel aufgrund von unvorhersehbaren Erosionsprozessen sowie bei Systemen mit Werkbrücken aufgrund des Risikos von unkontrollierten Holzverklausungen nicht gegeben.

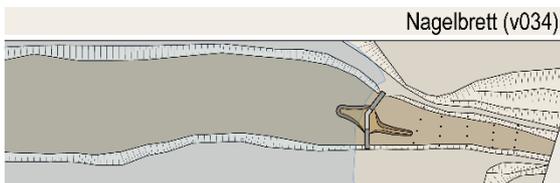
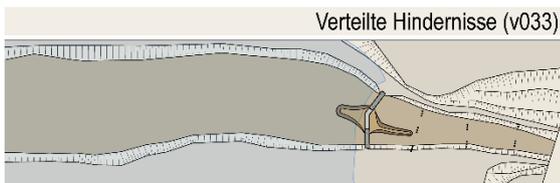
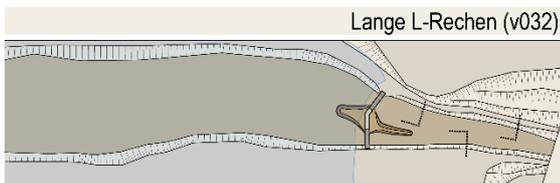
Innerhalb Auengebiet mit Mittelinsel



Innerhalb Auengebiet ohne Mittelinsel



Ausserhalb Auengebiet



Teilweise im Auengebiet

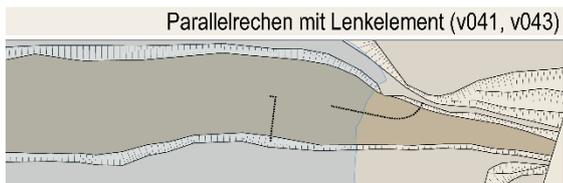
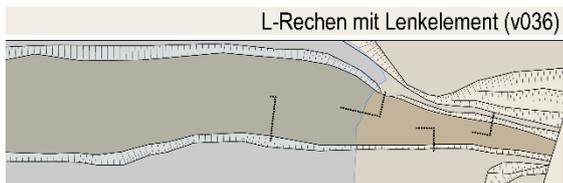


Abb. 2 Skizzen der untersuchten Varianten von Schwemmholzrückhaltesystemen eingeteilt nach ihrer Position bezüglich des Auengebiets (blaue Fläche). Die Variante Parallelrechen mit Lenkelement stellt die Bestvariante dar. Die Fließrichtung ist in allen Teilabbildungen von links nach rechts.

3.2 Systemoptimierung

Anschließend an das Variantenstudium wurde der Parallelrechen mit Lenkelement optimiert. In der Systemoptimierung wurde der lichte Stababstand (2 m, 3.5 m, 5 m) sowie der Grundriss respektive die Länge des Parallelrechens variiert. Für das Lenkelement wurden verschiedene Bauweisen (Rechenbauweise, Sohlenerhöhung, Buhne) getestet sowie dessen Länge und Abstand zum ersten Rechenstab variiert.

Die Optimierungen führten schließlich zu einem Parallelrechen mit einer Länge von 115 m bei einem lichten Stababstand von 3.5 m entlang des geraden Rechenabschnitts und einem lichten Stababstand von 2.5 m entlang des gekrümmten Rechenabschnitts („Basiskonfiguration“). Als Lenkelement wurde eine Buhne eingesetzt, deren Oberkante so hoch liegt, dass diese nicht überströmt wird. Durch diese Buhne wird sichergestellt, dass die Strömung unabhängig der momentanen Morphologie in den Rechen gelenkt wird.

Aufgrund der durchgeführten Systemoptimierungen verbesserte sich der Schwemmholzurückhalt leicht. So wurde mit der Basiskonfiguration ein Schwemmholzurückhalt im Bereich von 60 – 70% erreicht.

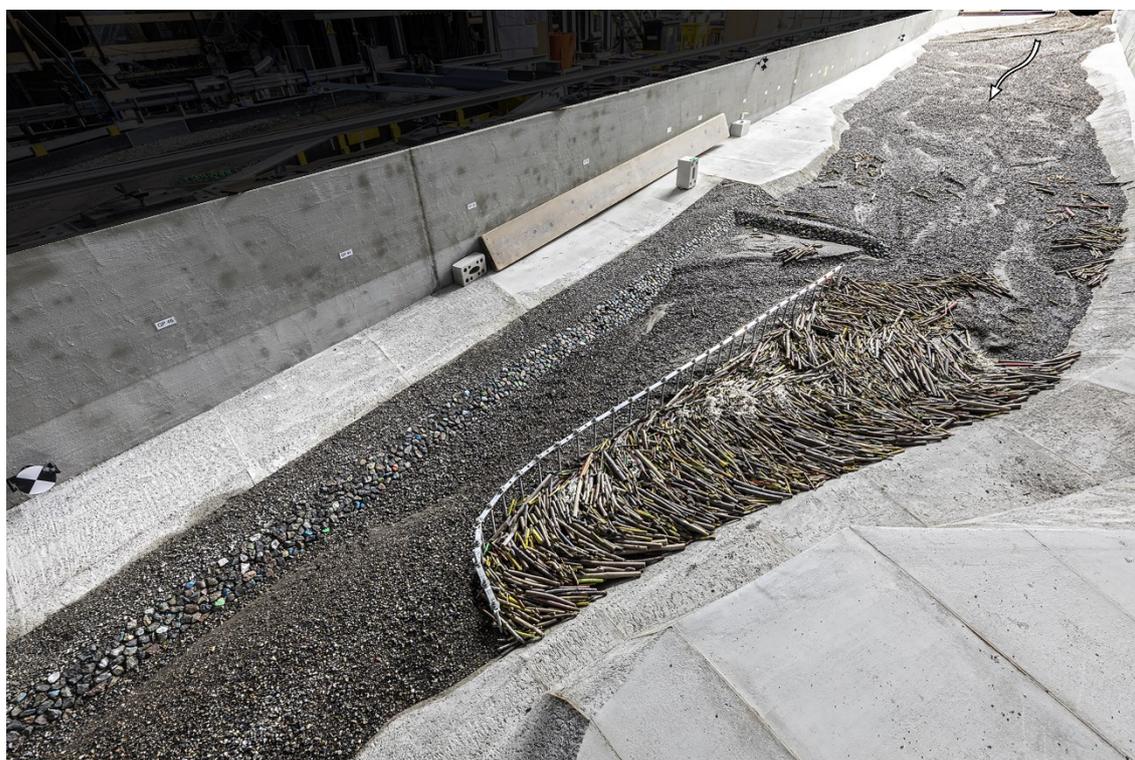


Abb. 3 Basiskonfiguration des Schwemmholzurückhaltesystems nach einem Ganglinienversuch HQ_{100} (Versuch v059). Oberstrom des Rechens liegt auf der orografisch rechten Seite das Lenkelement (unüberströmbare Buhne), welches die Strömung und somit das Holz in den Rückhalterraum lenkt.

3.3 Systemüberprüfung

Das Systemverhalten der Basiskonfiguration wurde in verschiedenen Ganglinienversuchen überprüft, darunter dreimal HQ_{100} (Abb. 4 links) und zweimal EHQ ($= 1.5 \times HQ_{100}$). In den Ganglinienversuchen HQ_{100} ($Q_{\text{Spitze}} = 140 \text{ m}^3/\text{s}$) wurden 27% (Versuch v056), 57% (v057) respektive 65% (v059) des zugegebenen Schwemmholzes zurückgehalten. Der erste Versuch (v056) mit ledig-

lich 27% Rückhalt zeigte auf, dass ein stark vorbelastetes System (nach zwei Ganglinienversuchen HQ_5 ohne Bewirtschaftung) die Systemfunktionalität deutlich beeinträchtigen kann. In diesem Versuch führten Geschiebeablagerungen am oberen Rechenende zu einer teilweisen Umlenkung der Strömung am Rechen vorbei. Mit einer verbesserten Bewirtschaftung (Einbau einer Schüttung zwischen Buhne und erstem Rechenstab) konnte die Umlenkung der Strömung in den nachfolgenden Versuchen immer vermieden werden. Es resultierte der hohe Schwemmholzurückhalt von 57% respektive 65% (Abb. 5).

Im Weiteren zeigten die Versuche bei HQ_{100} , dass der Rechen kurz vor Abflussspitze bereits vollständig mit Holz gefüllt war. Sämtliches Holz, das zu diesem Zeitpunkt zum Rechen transportiert wurde, wurde entlang des abgelagerten Holzes am Rechen vorbei in die Dorfstrecke geleitet. Dieser Prozess ist ungünstig, weil gerade bei Abflussspitze das Freibord an den Brücken in der Dorfstrecke am kleinsten und die Gefahr von Verklausungen somit am größten ist. Mit einer Verlängerung des Rechens könnte dies verhindert werden (Abschnitt 3.4).

Während der Ganglinienversuche HQ_{100} wurde der Geschiebeaustrag aus dem Modell kontinuierlich erfasst. Die Messungen (Abb. 4 rechts) des Geschiebeaustrags während der Versuche v056, v057 und v059 zeigten, dass während der Abflussspitze die Sollwerte von $Q_S = 370 - 560 \text{ kg/s}$ erreicht wurden. Folglich können unzulässige Erosionen in der Dorfstrecke unterstrom des Schwemmholzurückhaltesystems bei diesem Szenario ausgeschlossen werden.

In den Ganglinienversuchen EHQ ($Q_{\text{Spitze}} = 210 \text{ m}^3/\text{s}$) wurden 77% respektive 88% des zugegebenen Schwemmholzes zurückgehalten. Das zugegebene Schwemmholzvolumen entsprach $V_H = 4'000 \text{ fm}^3$, analog zu den Ganglinienversuchen HQ_{100} . Im Vergleich zu den Ganglinienversuchen bei HQ_{100} wurden also 10 – 15% mehr Schwemmholz zurückgehalten. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass bei größeren Abflüssen ein höherer Strömungsdruck auf die Verklausung herrscht und die Verklausung dadurch stärker zusammengedrückt und höher aufgeschichtet wird. Entsprechend grössere Ablagerungsmächtigkeiten des Schwemmholzes im Parallelrechen wurden bei Versuchsende EHQ beobachtet. Aufgrund der größeren Ablagerungsmächtigkeiten und des damit einhergehenden größeren, spezifischen Holzurückhalts war bei EHQ der Rechen zum Zeitpunkt der Abflussspitze noch nicht gefüllt. Somit zeigte der Parallelrechen bei EHQ ein robusteres Systemverhalten als bei HQ_{100} .

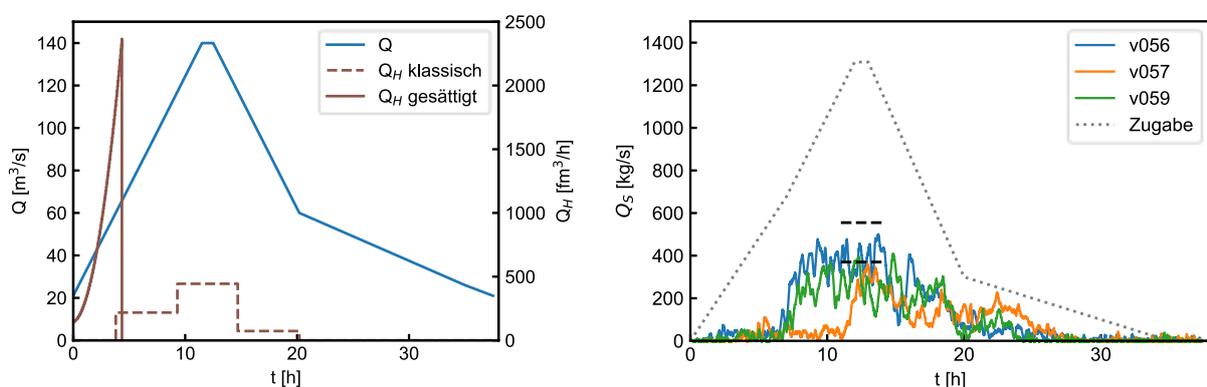


Abb. 4 Abfluss- und Schwemmholzganglinien bei HQ_{100} (links) sowie gemessener Geschiebeaustrag für drei Ganglinienversuche HQ_{100} (v056, v057, v059; rechts). In der rechten Grafik markieren die schwarz strichlierten Linien den Bereich des erwünschten Geschiebeaustrags während der Abflussspitze.



Abb. 5 Holzablagerungen und morphologische Strukturen im Modell nach einem Ganglinienversuch HQ_{100} (v059). Im Parallelrechen wurden 65% ($2'600 \text{ fm}^3$) des zugegebenen Schwemmholzes zurückgehalten.

3.4 Sensitivität Schwemmholtzganglinie und Rechenlänge

In den Ganglinienversuchen zur Sensitivität der Schwemmholtzganglinie und der Rechenlänge wurde bei HQ_{100} untersucht, inwiefern der Schwemmholtzrückhalt auf eine veränderte Schwemmholtzganglinie respektive einen verlängerten Rechen reagiert. Insbesondere war von Interesse, ob der Parallelrechen unter diesen Umständen zum Zeitpunkt der Abflussspitze wieder vollständig gefüllt ist oder ob noch Schwemmholtz zurückgehalten werden kann.

Aus den bisherigen Ganglinienversuchen war bekannt, dass die Ablagerungsmächtigkeit des Holzes im Rechen bei kleinen Abflüssen geringer ist als bei großen Abflüssen. Entsprechend ist es für das Rückhaltesystem ungünstig, wenn viel Holz bei kleinen Abflüssen anfällt. Aus diesem Grund wurde die ursprünglich angewandte Schwemmholtzganglinie („ Q_H klassisch“ in Abb. 4 links) angepasst. Das Holz wurde neu gleich zu Beginn der Ganglinie zugegeben, also bei den kleinsten Abflüssen der Ganglinie („ Q_H gesättigt“ in Abb. 4 links). Dabei wurde jeweils so viel Holz ins Modell gegeben, wie gerade noch vom Fluss transportiert werden konnte („gesättigter“ Schwemmholtztransport). Dieses Szenario ist bewusst sehr konservativ gewählt. Es soll die Grenzen des Rückhaltesystems aufzeigen.

In Abb. 6 ist der Zustand des Rechens am Ende der Schwemmholtzzugabe und bei Versuchsende abgebildet. Für beide Rechenvarianten (Basisconfiguration mit $L_R = 115 \text{ m}$ und verlängerter Rechen mit $L_R = 175 \text{ m}$) konnte beobachtet werden, dass sich das Schwemmholtz mit geringer Mächtigkeit ablagert und eine Verklausung bildet, die weit über den ersten Rechenstab nach oberstrom zurückreichte (Abb. 6a und 6c). Insbesondere bei der Basisvariante $L_R = 115 \text{ m}$ nahm der Schwemmholtzteppich große Ausmaße an und bedeckte oberstrom der Buhne die gesamte Flussbreite (Abb. 6a).

Im weiteren Verlauf der Ganglinienversuche konnten bei beiden Rechenvarianten zwei Prozesse beobachtet werden. Einerseits wurde das Schwemmholtz bei steigenden Abflüssen in den Rechen geschoben. Und andererseits wurden immer wieder Pakete von Schwemmholtz aus dem Teppich mobilisiert, bis sich die Strömung einen Weg zwischen Bühnenkopf und erstem Rechenstab freigespült hatte (Abb. 6b und 6d). Die Remobilisierung von Schwemmholtzpaketen birgt ein gewisses Risiko für die Hochwassersicherheit in der nachfolgenden Dorfstrecke, denn bei hohen Abflüssen steigt die Gefahr von Verklausungen an den Brücken.



Abb. 6 Holzurückhalt während der Ganglinienversuche HQ_{100} bei gesättigter Schwemmholzganglinie („ Q_H gesättigt“ in Abb. 4 links). a) Basiskonfiguration ($L_R = 115$ m) am Ende der Schwemmholzzugabe, b) Basiskonfiguration bei Versuchsende, c) verlängerter Rechen ($L_R = 175$ m) am Ende der Schwemmholzzugabe und d) verlängerter Rechen bei Versuchsende.

Die Versuche mit dem verlängerten Rechen (Abb. 6c und 6d) machten deutlich, dass diese Konfiguration einen erhöhten Schwemmholzurückhalt aufweist im Vergleich zur Basiskonfiguration. Folglich sind größere Schwemmholzvolumen nötig, um den verlängerten Rechen zu überlasten. Sobald aber genügend große Volumina auftreten, sind die Prozesse vergleichbar mit denjenigen in der Basiskonfiguration. Das bedeutet auch, dass durch eine Verlängerung des Parallelrechens die Remobilisierung von Schwemmholzpaketen nicht vermieden werden kann, sondern nur die Eintretenshäufigkeit verringert wird.

4 Schlussfolgerung

In einem breiten Variantenstudium wurde nach einem Schwemmholzurückhaltesystem gesucht, das die Anforderungen hinsichtlich Schwemmholzurückhalt, Geschiebehaushalt, Auengebiet und Geschiebebewirtschaftung möglichst gut erfüllt. Als Bestvariante wurde ein Parallelrechen mit Buhne als Lenkelement identifiziert. Dieser weist folgende Merkmale auf:

- **Schwemmholzurückhalt:** Der Parallelrechen mit Lenkelement ($L_R = 115$ m) hält 55 – 65% der erwarteten Schwemmholzmenge zurück. Dieser Wert liegt am oberen Ende des Zielbereichs von 30 – 60%. Mit einer Verlängerung des Rechens um 30 m auf $L_R = 145$ m kann der Rückhalt auf ca. 95% gesteigert werden. Ein Rechen mit $L_R = 145$ m wurde im Modell zwar nicht untersucht, jedoch kann sein Rückhalt anhand der Versuche mit $L_R = 115$ m und $L_R = 175$ m abgeschätzt werden.
- **Auengebiet:** Der Parallelrechen mit Lenkelement steht teilweise im Auengebiet von nationaler Bedeutung. Im Vergleich zu allen anderen untersuchten Varianten beeinträchtigt dieses Bauwerk das Auengebiet vergleichsweise wenig und erfüllt trotzdem die Anforderungen an den Schwemmholzurückhalt. Systeme komplett außerhalb des Auengebiets erfüllen diese Anforderungen nicht. Außerdem kann mit dem projektierten System die bestehende Mittelinsel entfernt werden, die deutlich weiter ins Auengebiet ragt als das projektierte System.
- **Geschiebehaushalt:** Der Geschiebeaustrag erreichte bei HQ_{100} die erforderlichen Werte, um Erosionen in der Dorfstrecke unterstrom des Rückhaltesystems zu vermeiden. Durch gezielte Geschiebebewirtschaftung (Entnahme und Schüttung) kann in Zukunft die Transportrate zusätzlich positiv beeinflusst werden.
- **Geschiebebewirtschaftung:** Um die Funktion des Rückhaltesystems nach Hochwasserereignissen aufrecht zu erhalten bzw. wiederherzustellen, sind gewisse Bewirtschaftungsmaßnahmen zwingend notwendig. Da am Standort Grassi aber bereits im aktuellen Zustand Geschiebeentnahmen durchgeführt werden, ist mit keinem Zusatzaufwand aufgrund des Rückhaltesystems zu rechnen.
- **Überlastfall gesättigter Holztransport:** Neben den beschriebenen Systemanforderungen wurde auch das Verhalten bei Überlast untersucht. Dazu wurde das Schwemmholz als gesättigter Schwemmholztransport zu Beginn der Ganglinie zugegeben, also möglichst ungünstig für das Rückhaltesystem. Die Versuche zeigten, dass bei Überlast, unabhängig von der gewählten Rechenlänge, mit einer Remobilisierung von Schwemmholzpaketen gerechnet werden muss. Dies ist ungünstig hinsichtlich der Verklausungsgefahr an den Brücken der Dorfstrecke. Jedoch ist auch im Ist-Zustand bereits mit Schwemmholzpaketen zu rechnen (aufgrund von Schwemmholzeinträgen durch Rutschungen und Seitenerosionen; aber auch aufgrund von unkontrollierter Remobilisierung von Verklausungen an den bestehenden Werkbrücken). Folglich wird dieses Risiko nicht grösser als im Ist-Zustand eingeschätzt.

- *Überlastfall Extremhochwasser*: Bei extremen Abflüssen (EHQ) konnten die größten Schwemmholzurückhalte erzielt werden. Durch den erhöhten Strömungsdruck bei extremen Abflüssen wird das Schwemmholz dichter und mächtiger zusammengedrückt, sodass auf gleicher Grundfläche mehr Holz zurückgehalten werden kann. Dieser Prozess verdeutlicht die Robustheit des Systems.

Literatur

HZP (2017). Wasserbauplan Hochwasserschutz Engstlige Frutigen. Technischer Bericht. Projekt Nr. 692 /2863. Hunziker, Zarn & Partner (HZP), Ramu Ingenieure AG. 20.04.2017

Anschrift der Verfasser

Andris Wyss

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich
Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich
wyss@vaw.baug.ethz.ch

Florian Hinkelammert-Zens

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich
Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich
hinkelammert-zens@vaw.baug.ethz.ch

Michael Auchli

Hunziker, Zarn & Partner AG
Schachenallee 29, CH-5000 Aarau
michael.auchli@hzp.ch

Jana Hess

Flussbau AG SAH
Schwarztorstrasse 7, CH-3007 Bern
jana.hess@flussbau.ch

Rolf Künzi

Flussbau AG SAH
Schwarztorstrasse 7, CH-3007 Bern
rolf.kuenzi@flussbau.ch

Dr. Volker Weitbrecht

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich
Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich
weitbrecht@vaw.baug.ethz.ch