

Hybride Modellversuche zum Hochwasserschutzprojekt Alpenrhein, Internationale Strecke - Versuchsserien zur eigendynamischen Entwicklung

Gabriel Zehnder und Florian Hinkelammert-Zens

Zusammenfassung

Durch das Hochwasserschutzprojekt Alpenrhein «Internationale Strecke km 65 bis km 91» (www.rhesi.org) soll die Abflusskapazität auf der Internationalen Strecke des Alpenrheins von derzeit 3'100 m³/s (ca. HQ₁₀₀) auf 4'300 m³/s (ca. HQ₃₀₀) erhöht werden. Zu diesem Zweck wird das bestehende Gerinne (Breite 50-70 m) aufgeweitet, im Mittel wird eine dynamische Gerinnebreite von ca. 210 m angestrebt.

Die Auswirkungen der projektierten Massnahmen wurden von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW) im Rahmen von mehrjährigen, hybriden Modellversuchen in zwei gegenständlichen Modellen im Massstab 1:50 untersucht. Die Ausführungen im vorliegenden Artikel befassen sich mit dem breitesten Projektabschnitt «Oberriet/Koblach», welcher einen ökologischen «Kernlebensraum» mit einer Gerinnebreite von bis zu 380 m beinhaltet. Die Aufweitung des Gerinnes soll in diesem Abschnitt eigendynamisch, d.h. mit möglichst geringem Maschineneinsatz, erfolgen. Das Ziel der Untersuchungen war, die Effizienz verschiedener maschineller Initialisierungsmassnahmen zu prüfen und deren Eignung für die Umsetzung im Hochwasserschutzprojekt zu bewerten.

In Vorversuchen wurde nachgewiesen, dass die ausschliessliche Entfernung der bestehenden Ufersicherung nicht ausreicht, um innerhalb von einigen Jahren eine sekundäre Erosion der Ufer und somit eine – beginnende – dynamische Umgestaltung der Vorländer zu erreichen.

Anschliessend wurden 6 mögliche maschinelle Initialisierungsmassnahmen chronologisch aufbauend untersucht. Nach der Umsetzung der jeweiligen Massnahme wurden diese schrittweise mit Jahresganglinien, welche jeweils 2.5 durchschnittlichen Abflussjahren (Naturmassstab) entsprechen, belastet.

In Kombination mit verschiedenen Initialisierungsgerinnten in den breiten Vorländern wurden die effizientesten Massnahmen – grosse Schüttungen, Ausleitungen aus dem Hauptgerinne sowie Uferanrisse – anschliessend in einem ganzheitlichen Initialisierungskonzept zusammengefasst. Dieses soll in Natur innerhalb einer Bauzeit von 3 Jahren umgesetzt werden können, möglichst ohne anschliessende Eingriffe ins System. Mit diesem Konzept konnte nach ca. 20 durchschnittlichen Abflussjahren flächig eine dynamische Gewässersohle mit mehreren Teilgerinnen erreicht werden.

Die Ergebnisse der Modellversuche gehen direkt in die Genehmigungsplanung ein und sind somit eine massgebende Grundlage für die erfolgreiche Umsetzung des Hochwasserschutzprojekts.

1 Hochwasserschutzprojekt «Rhesi»

Aufgrund des hohen Schadenpotentials von ca. 12 Mia. CHF (bei HQ_{300}) und der zunehmenden Instabilität der über 100-jährigen Hochwasserschutzdämme wurde das «Hochwasserschutzprojekt Alpenrhein, Internationale Strecke km 65 bis km 91» (www.rhesi.org) initiiert. Die Abflusskapazität des Alpenrheins auf der internationalen Strecke soll von derzeit $3'100 \text{ m}^3/\text{s}$ (HQ_{100}) auf $4'300 \text{ m}^3/\text{s}$ (HQ_{300}) ausgebaut werden (Mähr et al., 2021).

Diese Steigerung der Abflusskapazität soll – innerhalb der bestehenden Hochwasserschutzdämme – durch eine Vergrößerung des Abflussquerschnitts mittels Erhöhung der dynamischen Gerinnebreite erreicht werden. Ermöglicht wird dies durch die gezielte Umlagerung und somit Dynamisierung der Vorländer (Abb. 1). Neben der Erhöhung der Hochwassersicherheit soll auch eine naturnahe und ökologisch wertvolle Gestaltung des Gerinnes ermöglicht werden. Die dynamische Gerinnebreite wird von aktuell 50-70 m auf durchschnittlich mehr als 210 m erhöht. Grundsätzlich sollen die Verbreiterungen des Abflussquerschnitts eigendynamisch und mit möglichst geringem maschinellen Einsatz erreicht werden.

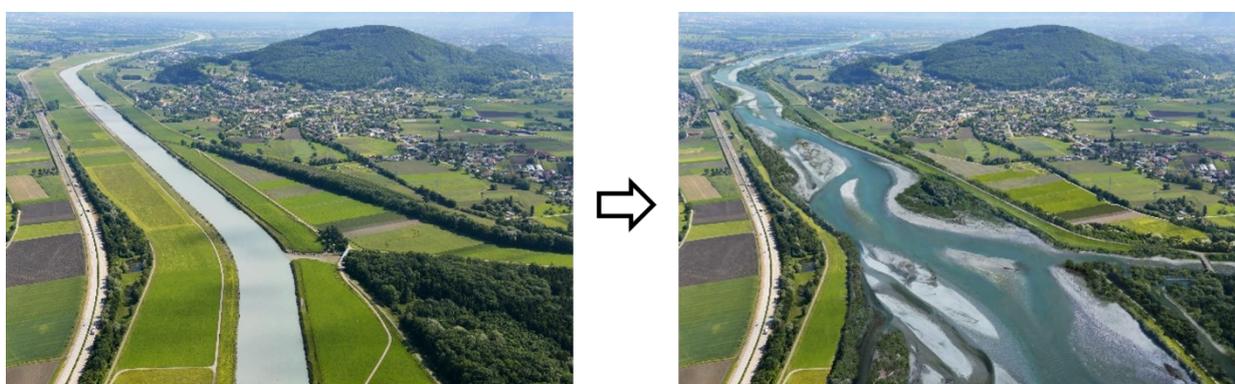


Abb. 1 Abschnitt Oberriet/Koblach: Bestand (links) und Visualisierung im Projektzustand (rechts); Quelle: www.rhesi.org

2 Auftrag der VAW

Im Auftrag der Internationalen Rheinregulierung (IRR) wurden durch die VAW in den Jahren 2018 bis 2023 zwei gegenständliche (ggst.) Modelle im Massstab 1:50 erstellt und mittels parallel durchgeführter hydronumerischer 2D-Simulationen mit der Software BASEMENT (Version v3.x) unterstützt (Hengl et al., 2021). Diese Modellversuche beinhalteten zwei charakteristische Abschnitte des Hochwasserschutzprojekts von jeweils ca. 5 km Länge (Naturmassstab).

Für die Beschreibung des zuerst untersuchten Abschnitts «Widnau/Höchst» wird auf den Beitrag der VAW zum Wasserbausymposium 2021 verwiesen (Hinkelammert-Zens et. al, 2021). Im vorliegenden Artikel werden Ergebnisse zum Abschnitt «Oberriet/Koblach» vorgestellt.

3 Gegenständliches Modell «Oberriet/Koblach»

3.1 Ziele der Modellversuche

Der Abschnitt «Oberriet/Koblach» (Rhein-km 66 bis Rhein-km 71) beinhaltet den grössten sogenannten «Kernlebensraum» des Projekts, in welchem Gerinnebreiten zwischen 240 m und 380 m erreicht werden sollen (Visualisierung siehe Abb. 1). Die Untersuchung der morphologischen Entwicklungen sowie der Dynamik der Sohlenveränderungen in diesem Modellperimeter

sind von grossem Interesse in Bezug auf die Ökologie, den Geschiebehaushalt sowie die zeitliche Umsetzbarkeit des Projekts.

Der Fokus der Modellversuche lag auf dem Übergang vom bestehenden, monotonen Mittelgerinne (Abb. 2) zu einem verzweigten, dynamischen Flusssystem. Die Modellversuche sollten zeigen, ob – nach Entfernung des Längsverbaus bzw. der Ufersicherungen – eine eigendynamische Entwicklung ohne zusätzliche, maschinelle Massnahmen erreicht werden kann. Falls dies nicht der Fall ist, sollten Massnahmen getestet werden, durch deren Einsatz die eigendynamische Umgestaltung der Vorländer möglichst effizient gefördert werden kann.



Abb. 2 Orthofoto des Projektabschnitts Oberriet/Koblach (Rhein-km 66 bis Rhein-km 71) im Bestand mit den Modellmauern in rot, Fließrichtung von links nach rechts; in der Bildmitte Einmündung der Frutz (Quelle: Schweizer Bundesamt für Landestopografie)

3.2 Modellsediment

Die Modellversuche wurden mit einer geometrisch skalierten und für den Modellbetrieb optimierten Kornverteilung durchgeführt.

Als Grundlage für die Definition des Modellsediments wurde eine Referenz-Kornverteilung definiert, welche aus (i) einer Kombination der Kornverteilung der Kiese im Vorland (s.u.), (ii) der Geschiebezufuhr von oberstrom und (iii) des Sohlenmaterials des Rheins im Bestand besteht. Die daraus resultierende Kornverteilung im Projektzustand verfügt über einen mittleren Korndurchmesser von $d_m = 2.8$ cm und ist somit deutlich feiner als das Sohlenmaterial im Bestand mit $d_m = 3.7$ cm. Für das Sohlenmaterial sowie das Kiesmaterial in den Vorländern wurde das gleiche Modellsediment verwendet.

3.3 Aufbau der Vorländer & Kiesverfügbarkeit

Bei Aufweitungprojekten mit eigendynamischer Entwicklung ist die möglichst genaue Kenntnis des Aufbaus der Vorländer eine massgebende Grundlage. Es ist zu erwarten, dass nach der maschinellen Entfernung der Grasnarbe, Feinsande und schluffiges Material relativ schnell bei kleineren Abflüssen erodiert werden. Für den Transport der Kiesanteile sind jedoch höhere Schleppkräfte notwendig, die erst bei bettbildenden Abflüssen erreicht werden. Für die Bewertung der zeitlichen Entwicklung von eigendynamischen Aufweitungen ist somit neben dem Aufbau der Vorländer auch die Auftretenshäufigkeit dieser Abflüsse von entscheidender Bedeutung.

Für das Hochwasserschutzprojekt wurden die Vorländer des Alpenrheins intensiv durch Drucksondierungen, Bohrungen sowie Baggerschürfen beprobt. Die Ergebnisse verdeutlichen die regelmässige Verlagerung des Gerinnes vor dessen Korrektur und die ehemals vorhandene

starke Dynamik des Alpenrheins. Die Lage der tiefen Kiesschichten, mit denen das Rheintal verfüllt ist, ist sehr heterogen: diese beginnen zwischen 1 und 7 (!) m unter der aktuellen Geländeoberkante.

Für die plausible Nachbildung der eigendynamischen Prozesse und deren zeitlichen Ablaufs im ggst. Modell galt es, die in Natur in den Vorländern verfügbare Kiesmenge (im Rahmen der Genauigkeiten) nachzubilden. Die tiefliegenden Rheinkiese wurden mit den gemäss den Beprobungen ermittelten Kiesschichten vollständig und Sandschichten zu 50% ergänzt.

3.4 Szenarien

Für die Untersuchung der morphologischen Fragestellungen wurde grösstenteils die Jahresganglinie 2001 (Messstation Rhein – Diepoldsau, Rietbrücke, Nr. 2473) verwendet. 2001 war ein relativ nasses Jahr mit hohen Spitzenabflüssen: HQ_1 (ca. 1'150 m³/s) wurde 2x fast erreicht, HQ_5 mit (ca. 1'800 m³/s) knapp überschritten. Der Vergleich mit mehrjährigen Aufzeichnungsreihen zeigt, dass das Abflussvolumen der Ganglinie 2001 ca. 2.5x über jenem eines durchschnittlichen Abflussjahres liegt. Somit konnten im ggst. Modell durch jeweils einen Versuch mit der Ganglinie 2001 die Prozesse, welche in 2.5 durchschnittlichen Jahren auftreten, simuliert werden.

Die Geschiebezufuhr am oberen Modellrand erfolgte in den Versuchsserien zur Dynamisierung (Phase 1 und 2, siehe Kap. 4.2 und Kap. 4.3) entsprechend der Transportkapazität nach der Formel von Wong & Parker (2006). Dadurch wurde sichergestellt, dass die Prozesse im ggst. Modell nicht aufgrund von Geschiebedefizit verlangsamt oder gehemmt werden.

4 Ergebnisse Abschnitt „Oberriet/Koblach“

Die Untersuchungen wurden in zwei Phasen durchgeführt:

- In Phase 1 wurden einzelne lokale, aufeinander aufbauende Massnahmen zur Dynamisierung des Gerinnes untersucht. Die Massnahmen wurden jeweils mit demselben Abflusszenario belastet. Nach Bewertung der Wirksamkeit wurde die nächste Massnahme getestet. Auf diese Weise wurde eine Auswahl an Massnahmen ermittelt, welche die Grundlage der nächsten Phase darstellten.
- In Phase 2 wurde ein ganzheitliches Initialisierungskonzept getestet, welches im gesamten Abschnitt innerhalb von 3 Baujahren umgesetzt werden könnte. Dieses Konzept baute auf den effektivsten Massnahmen der vorherigen Phase auf.

4.1 Vorversuche: Entfernung der Ufersicherung

In den ersten Versuchen wurde das Gerinne im Bestand ohne Ufersicherungen nachgebildet. Es konnte gezeigt werden, dass die ausschliessliche Entfernung des Längsverbaus nicht ausreicht, um das Gerinne nennenswert zu verbreitern. Primäre Seitenerosion konnte beobachtet werden; die für die eigendynamische Entwicklung wichtige Sekundärerrosion ist jedoch auch bei Versuchen mit stationären, bettbildenden Ereignissen (bordvoller Abfluss ca. HQ_3 mit 1'500 m³/s, Dauer im Naturmassstab jeweils ca. 1 Woche) nicht eingetreten. Dies zeigte eindeutig, dass zusätzliche, maschinelle Massnahmen zur Dynamisierung der Vorlandflächen nötig sind.

4.2 Phase 1: stufenweise Umsetzung von lokalen Initialisierungsmassnahmen

Abb. 3 zeigt eine Übersicht der im Modellversuch untersuchten lokalen Massnahmen zur Initialisierung und Förderung der Eigendynamik.

Bereits zu Beginn der Versuche in Phase 1 wurde im rechten, sehr breiten Vorland ein Initialisierungsgraben angelegt (Abb. 3a; Länge Natur: ca. 2 km, Sohlbreite 20 m). Im Projekt sollen durch solche Initialisierungsgräben möglichst früh die Lebensräume diversifiziert und ein ökologischer Mehrwert geschaffen werden. Des Weiteren soll dadurch die Dynamisierung der Vorländer gefördert werden.

Im Anschluss wurden im Hauptgerinne jeweils lokale Massnahmen umgesetzt, durch welche (i) die Eigendynamik mittels Abflusseinleitung in den Initialisierungsgraben und (ii) die Auflandungsprozesse im Hauptgerinne durch den Entzug von Abfluss gefördert werden sollten.

Jede Massnahme wurde jeweils zweimal mit der Jahresganglinie 2001 belastet, dies entspricht 5 durchschnittlichen Abflussjahren. Die Sohlenentwicklung wurde durch die Gegenüberstellung von Laserscan-Aufnahmen zu Versuchsbeginn und -ende (Auflösung 0.5 x 0.5 m im Naturmassstab) visualisiert.

Im Folgenden werden die Massnahmen und deren Wirksamkeit in chronologischer Reihenfolge beschrieben sowie qualitativ bewertet:

- **Kleinere Kiesschüttungen (Abb. 3b, ca. 4'000 - 8'000 m³):** Durch kleine, alternierende Schüttungen an den Ufern sollte eine Pendelbewegung der Strömung und ein verstärkter Angriff der Ufer angeregt werden. Ohne starke Sicherungsmassnahmen wurden diese Schüttungen jedoch bereits bei mittleren Abflüssen innerhalb weniger Stunden (Naturmasstab) vollständig abgetragen. Die gewünschte Lenkung der Strömung war bereits nach kurzer Zeit nicht mehr vorhanden. Schüttungen als Leitelemente am gegenüberliegenden Ufer zeigten grundsätzlich nur eine (kurzfristige, s.o.) Wirkung, wenn diese nicht deutlich über die Gerinnemitte ragten. Diese Massnahmen wurden für die weitere Projektierung nicht übernommen.
- **Grossflächige Kiesschüttungen in Gerinnemitte (Abb. 3c, ca. 25'000 m³)** führten durch die lokale Erhöhung der Sohle oberstrom zu Auf- und Rückstau. In weiterer Folge wurde die Strömung auf die Ufer umgelenkt und hat dort zu signifikanten Erosionen geführt. Die Schüttungen wurden umgelagert, erhöhten effizient die mittleren Sohlenlagen und führten zur Bildung einer strukturierten, ökologisch wertvollen Sohle. Diese Massnahme erwies sich als sehr erfolgreich. Deren Wirksamkeit kann durch lokale Sicherungsmassnahmen, beispielweise durch Holz-Pfahlwände, noch erhöht werden.
- **Ausleitung mit grosser Schüttung (Abb. 3d):** Durch die Ergänzung der grossflächigen Schüttungen in Gerinnemitte mit oberstrom angeordneten Ausleitungen wurde Wasser aus dem Hauptgerinne entnommen und in den Initialisierungsgraben im rechten Vorland geleitet. Durch den geringeren Abfluss nahm die Transportkapazität im Hauptgerinne ab, in weiterer Folge kam es dort zu Ablagerungen und der Erhöhung der mittleren Sohlenlagen. Dies führte zu einer verstärkten Ufererosion und somit zu einer Erhöhung der Dynamik. Ausleitungen ohne unterstrom angeordnete Schüttungen waren jedoch nicht wirkungsvoll; in diesen Fällen wurde am Beginn der Ausleitung Sediment abgelagert und diese somit sukzessive verschlossen.

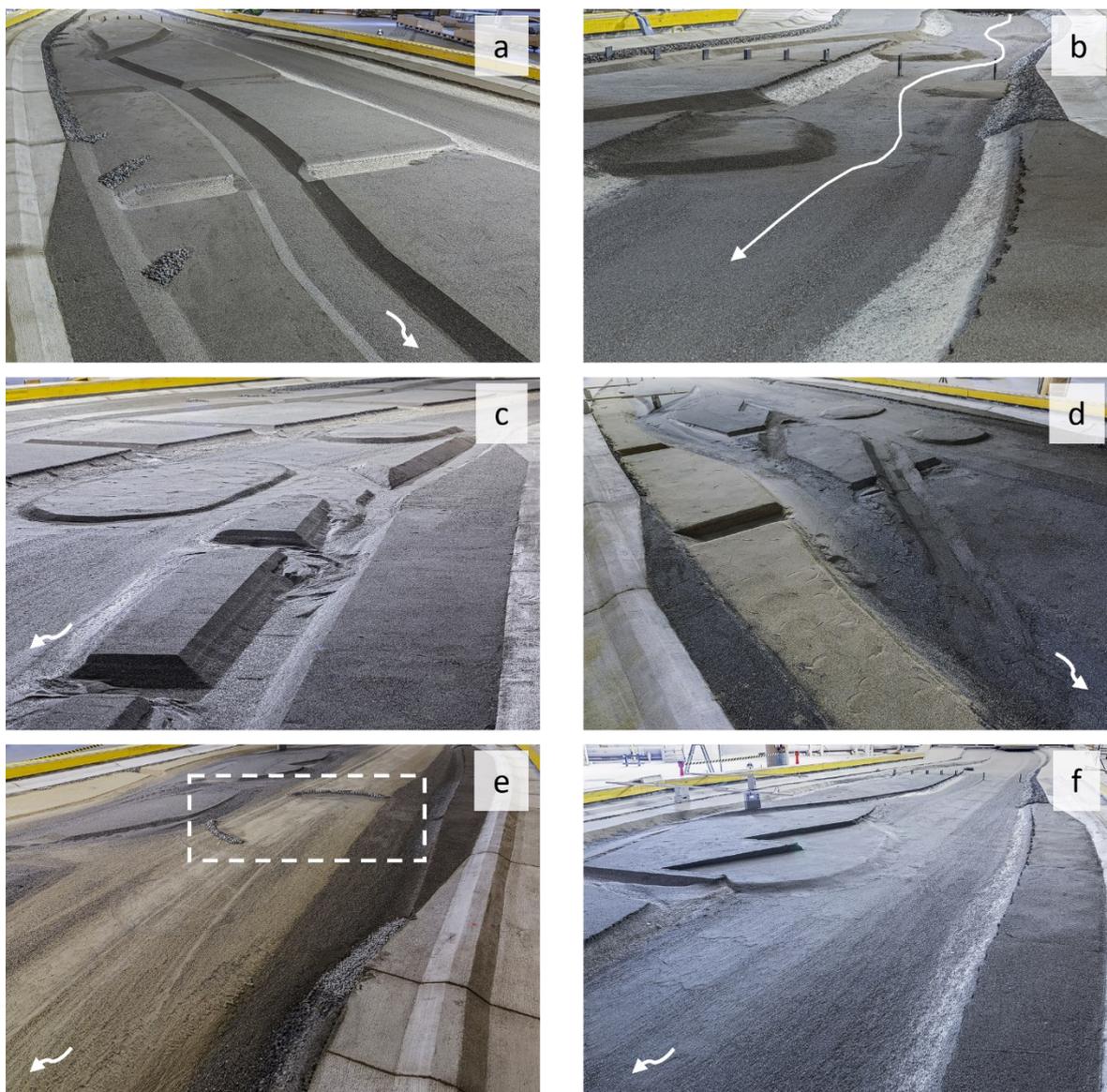


Abb. 3 Ansichten der untersuchten Initialisierungsmassnahmen (a: Initialisierungsgraben im rechten Vorland, b: kleine Schüttungen, c: grosse Schüttungen, d: grosse Schüttung mit Ausleitung, e: sichelförmige Grundschwelle (weiss strichliert), f: Uferanrisse)

- **Sichelförmige Grundschwelle (Abb. 3e):** Wie bei den grossflächigen Schüttungen konnten durch den Einbau von grossen Wasserbausteinen (ca. 1-1.5 t im Naturmassstab) in der Sohle oberstrom Auf- und Rückstauprozesse verursacht werden. Dadurch kommt es mittelfristig zu einer Erhöhung der mittleren Sohlenlagen, das Einbringen der Blöcke sowie deren eventuell notwendige spätere Entfernung sind jedoch technisch aufwändig. Für das Hochwasserschutzprojekt «Rhesi» wurde diese Massnahme nicht weiterverfolgt.
- **Uferanrisse (Abb. 3f):** Uferanrisse wurden in anderen Projekten bereits erfolgreich zur Förderung der Eigendynamik eingesetzt (Rachelly, 2021). Durch die lokale Aufweitung des Gerinnes werden Auflandungen hervorgerufen, wodurch wiederum Rückstau erzeugt und der Angriff auf die Ufer erhöht wird. Die Ergebnisse im ggst. Modell zeigen, dass diese Massnahme bei den Randbedingungen des Alpenrheins gut funktioniert, jedoch ausreichend gross dimensioniert sein muss. In geraden, kanalisierten Bereichen ohne klare Pendelbewegung sollte die Breite des Uferanrisses ca. der Gerinnebreite entsprechen, die Länge etwa 3 - 4x der Breite.

Abb. 4 zeigt eine Darstellung der Wassertiefen und Bankhöhen nach Abschluss der Versuchsreihe mit 13 Jahresganglinien 2001, welche ca. 32.5 Durchschnittsjahre (Naturmassstab) umfasste. Durch die in Phase 1 untersuchten Massnahmen konnte die Dynamik der Flusslandschaft deutlich erhöht werden: die Verteilung der Wassertiefen ist sehr heterogen und bietet eine Vielzahl an Habitaten für aquatische und terrestrische Lebewesen.

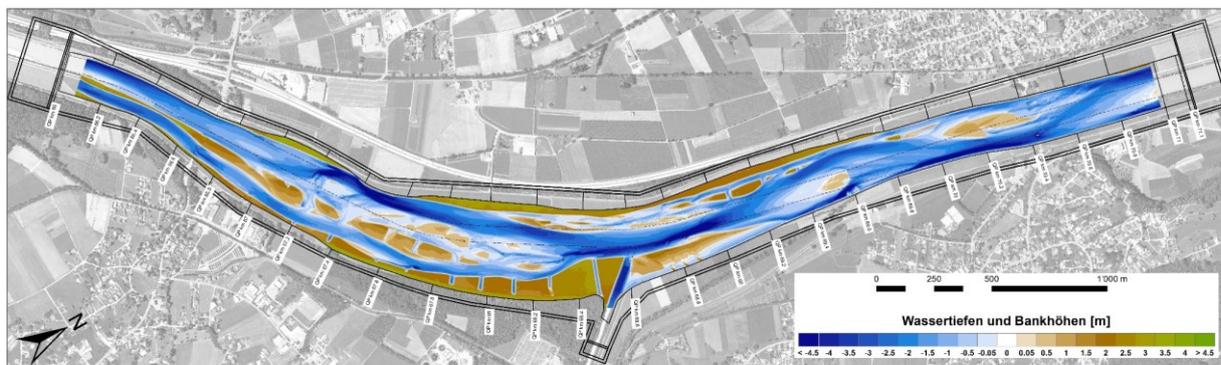


Abb. 4 Wassertiefen und Bankhöhen im ggst. Modell nach Versuchsende von Phase 1 (ca. 32.5 Durchschnittsjahre), ca. bei $700 \text{ m}^3/\text{s}$ (Fließrichtung von links nach rechts)

4.3 Phase 2: Ganzheitliches Initialisierungskonzept

Die Erkenntnisse aus Phase 1 dienen als Grundlage für die Definition eines ganzheitlichen Initialisierungskonzepts, welches im gesamten Abschnitt Oberriet/Koblach innerhalb von 3 Baujahren umgesetzt werden könnte. Im Hochwasserschutzprojekt soll nur während der anfänglichen Bauzeit maschinell in das Gerinne eingegriffen werden. Anschliessend ist vorgesehen, dass die Dynamisierung der Vorländer primär durch eigendynamische Prozesse erfolgt.

Während Phase 1 zeigte sich, dass nicht nur die Grösse der gewählten Massnahmen prozessrelevant ist, sondern auch die Berücksichtigung der Wellenlänge des Gerinnes. Die jeweiligen Initialisierungsmassnahmen müssen so angeordnet werden, dass die im Bestand vorhandene Hauptströmung ausgenutzt wird. Wichtige Indizien sind Verkippungen der Sohle im Bestandsgerinne sowie Erosionstendenzen am Ufer. Werden beispielsweise Uferanrisse fälschlicherweise in Bereichen mit Auflandungstendenzen angeordnet, sind diese praktisch wirkungslos.

Im ganzheitlichen Initialisierungskonzept (erarbeitet durch Flussbau AG) wurden als zentrale Massnahme im Hauptgerinne grossflächige Schüttungen umgesetzt (Abb. 5). Die Dotierung des Initialisierungsgrabens im rechten Vorland wurde durch zwei Ausleitungen sowie einen oberstrom angeordneten Flussteiler sichergestellt.

Der Abschnitt Oberriet/Koblach ist im Projekt in 3 Bauetappen unterteilt, welche in aufeinanderfolgenden Jahren gegen die Fließrichtung umgesetzt werden sollen. Die Etappen 2 und 3 (Abb. 5) entsprachen im Modell den Vorgaben des Projekts. In der unterstrom gelegenen Etappe 1 wurden die Massnahmen bewusst nicht entsprechend dem Initialisierungskonzept umgesetzt: in diesem Bereich wurden Prinzipversuche mit Fokus auf der Prüfung von Initialisierungsmassnahmen in geraden Fließstrecken durchgeführt. Durch die Anordnung unterstrom wurde die Entwicklung in den Etappen 2 und 3 dadurch nicht beeinflusst. Die Versuche wurden analog zu Phase 1 vorwiegend mit der Jahresganglinie 2001 durchgeführt.

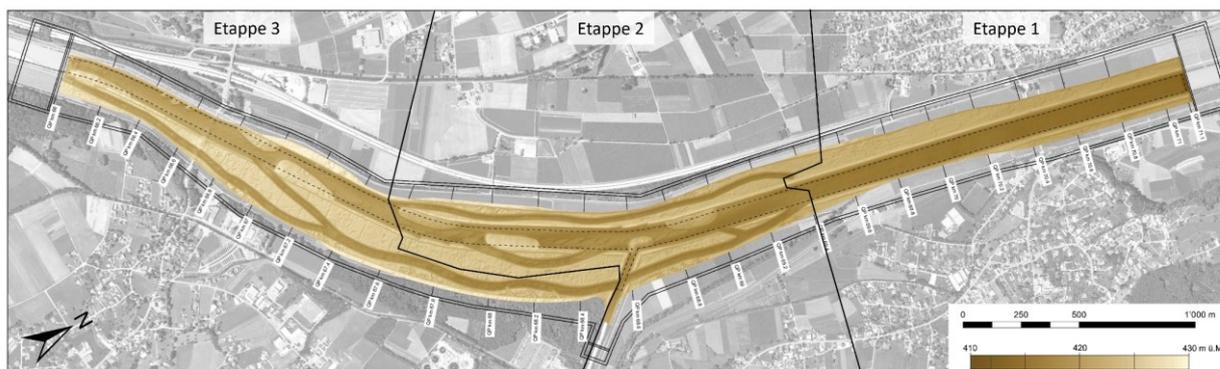


Abb. 5 Kombinierte Darstellung der Sohlenhöhen der jeweiligen Ausgangszustände pro Etappe

Die in den Etappen 2 und 3 umgesetzten Massnahmen zeigten grosse Wirkung und führten bereits innerhalb weniger Jahre (Naturmassstab) zu einer signifikanten Umgestaltung des Gerinnes mit starken Auflandungen der Sohle (Abb. 6). Die Entwicklung in der unterstrom gelegenen geraden Fließsstrecke von Etappe 1 wurde dadurch jedoch negativ beeinflusst: dort stellte sich ein Geschiebedefizit ein, wodurch – neben der Kanalwirkung mit kaum ausgeprägter Pendelbewegung – die morphologische Entwicklung gehemmt wurde. Nach Rachelly (2021) treten diese Auswirkungen ab einer Unterschreitung von ca. 60% der Geschiebe-Transportkapazität auf. Selbst nach 20 durchschnittlichen Abflussjahren konnte in der untersten Fließsstrecke (Etappe 1) keine sekundäre Erosion festgestellt werden. Das Flussbett entsprach weiterhin dem Bestand bzw. dem initialen Einbau.



Abb. 6 Abflussverhältnisse bei $120 \text{ m}^3/\text{s}$ im ggst. Modell nach 20 durchschnittlichen Abflussjahren: rechts im Bild befindet sich der Initialisierungsgraben; links im Bild ist das zu diesem Zeitpunkt noch abgetrennte Hauptgerinne zu erkennen, Blick in Fließrichtung

In weiterer Folge wurden in Etappe 1 zur Förderung der seitlichen Erosion zwei grosse Uferanrisse umgesetzt. Anschliessend wurden weitere 10 durchschnittliche Abflussjahre simuliert. Nach

diesem Zeitraum war fast im gesamten Untersuchungsgebiet eine hohe morphologische Dynamik mit sehr heterogener Verteilung der Wassertiefen vorhanden (Abb. 7). Lediglich in Etappe 1 gab es noch grössere, nicht umgestaltete Bereiche des Vorlands.

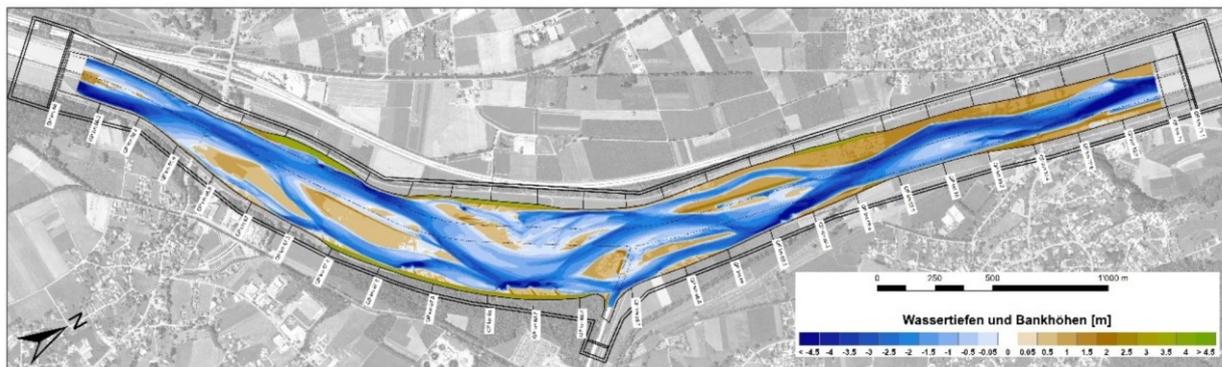


Abb. 7 Wassertiefenverteilung bei $700 \text{ m}^3/\text{s}$: Entwicklung mit ganzheitlichem Initialisierungskonzept nach rund 30 durchschnittlichen Abflussjahren

Die gebildete Sohle und deren Morphologie wurde in weiteren Versuchsreihen auf ihre Robustheit getestet:

- reduzierte Geschiebezufuhr ($2/3 = 66.7\%$ der Transportkapazität, 3x Jahresganglinie 2001)
- Hochwasserabflüsse HQ_{30} , HQ_{100} , HQ_{300} und EHQ
- Nachbildung von Vegetation auf hohen, über mehrere Jahre stabilen Kiesbänken
- Schwall/Sunk Szenarien

Während der drei Versuche mit reduzierter Geschiebezufuhr und der Jahresganglinie 2001 bildete sich in Etappe 3 und 2 aus mehreren Teilgerinnen erneut ein einzelnes Hauptgerinne mit einer Breite von ca. 60-70 m aus. Der eingetiefte Talweg konnte auch während der anschließenden Versuche mit Geschiebezufuhr entsprechend Transportkapazität (noch) nicht wieder aufgefüllt werden. Dies zeigt, dass selbst eine Reduktion der Geschiebezufuhr über wenige Jahre langfristige Auswirkungen auf die morphologische Entwicklung haben kann. Die erneute Ausbildung einer dynamischen Morphologie mit mehreren Teilgerinnen dauert deutlich länger als der Zeitraum, in welchem die Zufuhr reduziert war.

Grosse Hochwasserabflüsse führten in den Modellversuchen grundsätzlich zu einer Vereinheitlichung der Sohlenlagen bzw. einer Glättung der Morphologie. Bei anschließenden kleineren Abflüssen bzw. Normaljahren wurden wieder Eintiefungen sowie eine stärkere Strukturierung der Sohle beobachtet.

5 Ausblick

Die Ergebnisse der Versuchsserie zur eigendynamischen Entwicklung leisten einen wichtigen Beitrag zur Planung und Beurteilung der im Hochwasserschutzprojekt «Rhesi» geplanten Initialisierungsmassnahmen und fliessen direkt in die laufende Projektierung ein.

Im Rahmen des Genehmigungsprojekts wird für «Rhesi» eine Beurteilungsmatrix mit drei Umsetzungsvarianten für eigendynamische Aufweitungen in ökologischen Kernlebensräumen entwickelt werden: (i) keine Initialisierungsmassnahmen, (ii) eine «Zwischenvariante» mit möglichst

geringen maschinellen Eingriffen und (iii) eine «Maximalvariante» mit weitreichenden maschinellen Eingriffen. Ziel der «Maximalvariante» ist, die Umgestaltung des Gerinnes möglichst schnell zu erreichen. Bei der Zwischenvariante werden die maschinellen Eingriffe begrenzt, dafür wird eine längere Dauer für die Umgestaltung in Kauf genommen.

Die Maximalvariante entspricht dem in Phase 2 getesteten Initialisierungskonzept; dieses hat gezeigt, dass bei grossem maschinellen Einsatz ca. 80 % der Vorländer in 10 durchschnittlichen Abflussjahren umgestaltet werden können. Die Massnahmen der „Zwischenvariante“ werden aus den Erkenntnissen der Phasen 1 und 2 zusammengefasst, wobei der maschinelle Aufwand minimiert werden soll.

Für die weitere Planung sollen ökologische und ökonomische Faktoren in Kombination mit der zeitlichen Entwicklung der Gewässermorphologie aufzeigen, welche Umsetzungsvariante für das Hochwasserschutzprojekt den grössten Mehrwert bringt.

Die im Modellversuch gewonnen Erkenntnisse zur Wirkungsweise der untersuchten Massnahmen zur Förderung der Eigendynamik bzw. der Seitenerosion bilden auch für vergleichbare Fragestellungen in anderen Hochwasserschutz- und Renaturierungsprojekten einen grossen Mehrwert.

Literatur

- Hengl, M., Boes, R. (2021). Vernetzte hybride Modellierung wasserbaulicher und morphologischer Themen am Alpenrhein. Proc. Symposium «Wasserbau in Zeiten von Energiewende, Gewässerschutz und Klimawandel», VAW-Mitteilungen 262 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zürich:381-388
- Hinkelammert-Zens, F., Zehnder, G. (2021): Hybride Modellversuche zum Hochwasserschutzprojekt «Rhesi». Proc. Symposium «Wasserbau in Zeiten von Energiewende, Gewässerschutz und Klimawandel», VAW-Mitteilungen 262 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zürich: 303-311
- Mähr, M., Valenti, B., Schatzmann M. (2021): Hochwasserschutz Alpenrhein Internationale Strecke. Proc. Symposium «Wasserbau in Zeiten von Energiewende, Gewässerschutz und Klimawandel», VAW-Mitteilungen 262 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zürich: 313-320
- Rachelly, C. (2021): Sediment Supply Control on River Widening Morphodynamics and Refugia Availability. VAW-Mitteilungen 265 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zürich
- Wong, M., Parker, G. (2006). Re-analysis and correction of bedload relation of Meyer-Peter and Muller using their own database. Journal of Hydraulic Engineering 123(11): 1159-1168.

Anschrift der Verfasser

Gabriel Zehnder
zehnder@vaw.baug.ethz.ch

Florian Hinkelammert-Zens
hinkelammert-zens@vaw.baug.ethz.ch

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich
Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich