

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Tognacca, Stefano; Tognacca, Christian; Enea Toschini; Tamagni, Simona

Laboruntersuchung zum Stabilitätsverhalten eigendynamischer Rampen

VAW Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108448>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Tognacca, Stefano; Tognacca, Christian; Enea Toschini; Tamagni, Simona (2021):
Laboruntersuchung zum Stabilitätsverhalten eigendynamischer Rampen. In: Boes, Robert (Hg.): Wasserbau-Symposium 2021. Wasserbau in Zeiten von Energiewende, Gewässerschutz und Klimawandel. Band 2. VAW Mitteilungen 263. Zürich: ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. S. 561-569.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: CC BY 4.0



Laboruntersuchung zum Stabilitätsverhalten eigendynamischer Rampen

Laboratory analysis of the stability behavior of self-structured blockramps

Stefano Tognacca, Christian Tognacca, Enea Toschini, Simona Tamagni

Kurzfassung

Im Rahmen der Sanierung einer bestehenden klassischen Rampe am Fiume Ticino in Lodrino werden im Massstab 1:30 Laboruntersuchungen zum Stabilitätsverhalten und zur Strukturierung einer eigendynamischen Rampe durchgeführt. Zur Gewährleistung der Fischwanderung (Zielarten sind die Seeforelle und die Äsche) soll das Endgefälle der Rampe zwischen 2% und 3% liegen. Die Rampe ist für ein dreihundertjähriges Hochwasser ($HQ_{300} = 1'420 \text{ m}^3/\text{s}$) zu dimensionieren und soll sich im Überlastfall ($EHQ = 1'690 \text{ m}^3/\text{s}$) robust verhalten.

Im Labor werden unterschiedliche Einbauanordnungen mit einer progressiven Zunahme der hydraulischen Belastung getestet. Bei jedem Belastungsschritt wird beim Erreichen des stationären Zustandes und der morphologischen Ruhe (keine Geschiebebewegung) die Sohlentopographie photogrammetrisch hochaufgelöst aufgenommen. Die bei progressiver Steigerung der hydraulischen Belastung entstehenden Sohlenstrukturen werden quantitativ beschrieben und in Zusammenhang zum Stabilitätsverhalten der Rampe analysiert. Das gewonnene digitale Terrainmodell dient dazu als Basis für den Nachweis der Wanderkorridore (siehe Tognacca und Rossi, 2020).

Dieser Beitrag präsentiert den Versuchsaufbau, die ersten Resultate und die vorläufigen Schlussfolgerungen bezüglich eigendynamischer Strukturierung und Stabilitätsverhalten der untersuchten Rampe.

Abstract

As part of the renovation of an existing classic ramp at the Fiume Ticino in Lodrino, 1:30 scale laboratory tests are conducted on the stability behavior and the structuring processes of a self-structured ramp. To ensure fish migration (target species are lake trout and grayling), the final slope of the ramp should be between 2% and 3%. The ramp has to be dimensioned for a three hundred year flood discharge ($HQ_{300} = 1'420 \text{ m}^3/\text{s}$) and should be robust in case of overload ($EHQ = 1'690 \text{ m}^3/\text{s}$). For each discharge step, the topography of the river bed is rec-

ordet with high-resolution photogrammetry when the steady state and morphological rest are reached. The structure of the river bed that arises with a progressive increase in the hydraulic load must be statistically evaluated and analyzed in connection with the stability behavior of the ramp. The digital terrain model obtained serves as the basis for the verification of the migration corridors (see Tognacca and Rossi, 2020).

This article presents the test set-up as well as the first results and important conclusions regarding the behavior and limits of the investigated self-structured ramp with regard to its stability.

1 Einführung und Fragestellung

Ähnlich wie bei anderen Flüssen in der Schweiz hat sich die Sohle des Fiume Ticino im letzten Jahrhundert kontinuierlich eingetieft. Dieser Prozess ist auf die Reduktion der Gerinnebreite infolge Korrektionsarbeiten, sowie auf die durch den Bau von Geschieberückhaltebecken bedingte Verminderung der Geschiebezufuhr aus den Seitenbächen zurückzuführen. Weiter haben die Geschiebeentnahmen der 70er-Jahre die Lage enorm verschärft. Die Folgen sind unter anderem die Instabilität der Verbauungen sowie die Absenkung des Grundwasserspiegels.



Abb. 1: Die heutige kompakte Rampe in Lodrino

Um den Konsequenzen der Sohleneintiefung entgegenzuwirken, wurde anfangs der 70er-Jahre bei Lodrino (km BAFU 27.800) eine erste Rampe realisiert, welche allerdings während des Hochwassers im Jahre 1978 beschädigt wurde. Das Bauwerk wurde Mitte der 80er-Jahre durch eine, von der VAW anhand von physikalischen Modellversuchen dimensionierte, klassische kompakte Rampe (Gefälle ca. 8%) ersetzt. Die Struktur wurde in den letzten Jahrzehnten stark bean-

spricht und erlitt eine ziemlich ausgeprägte Erosion. Mehrere Blöcke wurden abtransportiert und am Rampenfuss abgelagert, was mit einer Verminderung der Rampendicke und somit der Stabilität der Rampe verbunden ist. Die Rampe erfüllt heutzutage weder die hydraulischen noch die ökologischen Kriterien. Insbesondere sind die Kriterien für die Wanderung der Äsche und der Seeforelle nicht erfüllt.

2 Die eigendynamische Rampe als optimale Lösung

Für die hydraulische und fischbiologische Sanierung der Rampe wurden im Rahmen einer Machbarkeits- und Variantenstudie Vor- und Nachteile der eigendynamischen Rampe, der unstrukturierten Blockrampe und der klassischen Blockrampe gegenübergestellt. Als Bestvariante wurde die eigendynamische Rampe gewählt, da sie a priori am besten die Projektziele erfüllt. Einerseits werden geeignete hydraulische Verhältnisse zur Gewährleistung der longitudinalen Durchgängigkeit für die Äsche und die Seeforelle (Zielarten) erreicht. Andererseits garantiert sie die Stabilisierung der Sohle und dementsprechend die Schaffung eines stabilen Fixpunkts gegen die Tiefenerosion. Zuletzt erfüllt die eigendynamische Rampe die landschaftlichen Bedürfnisse am besten. Damit die projektierte Rampe die ökologischen Anforderungen erfüllen kann, soll für die Verhältnisse in Lodrino das maximale Gefälle nach dem Strukturierungsprozess zwischen 2% und 3% liegen.

Für die empfohlene eigendynamische Rampe liegen keine klaren Bemessungsgrundlagen vor. Die Anwendung anderer Bemessungskriterien in Anlehnung an andere Situationen war mit zu grossen Unsicherheiten verbunden. Dies hat den Auftraggeber zum Entscheid geführt, angesichts der hohen Realisierungskosten und der grossen Bedeutung des Bauwerks, die effektive Machbarkeit einer eigendynamischen Blockrampe in Lodrino anhand von physikalischen Modellversuchen untersuchen zu lassen.

Im Folgenden sind die Hauptkenngrossen vom Projekt aufgelistet: Höhenunterschied $\Delta h = 4.8$ m; maximales Rampengefälle (Endgefälle) $J_R = 3\%$; minimale Rampenlänge $L_R = 160$ m; Sohlenbreite $B = 65$ m; Dimensionierungshochwasser $HQ_{300} = 1'420$ m³/s; Überlastabfluss $EHQ = 1'693$ m³/s.

3 Die Laborversuche

3.1 Zielsetzung

Die Ziele der geplanten Modellversuche zur Untersuchung des Stabilitätsverhaltens eigendynamischer Blockrampen sind die Beschreibung, die Analyse und die

Quantifizierung der Prozesse der Strukturierung bis zum Kollaps der Rampe und die Definition der hydraulischen Grenzbelastung der Struktur.

3.2 Hydraulisches Modell

Die Projektgeometrie der Rampe ist im Massstab 1:30 als Teilmodell nachgebildet (Abb. 2). Die Modellierung basiert auf dem Gesetz der Froude'schen Ähnlichkeit.

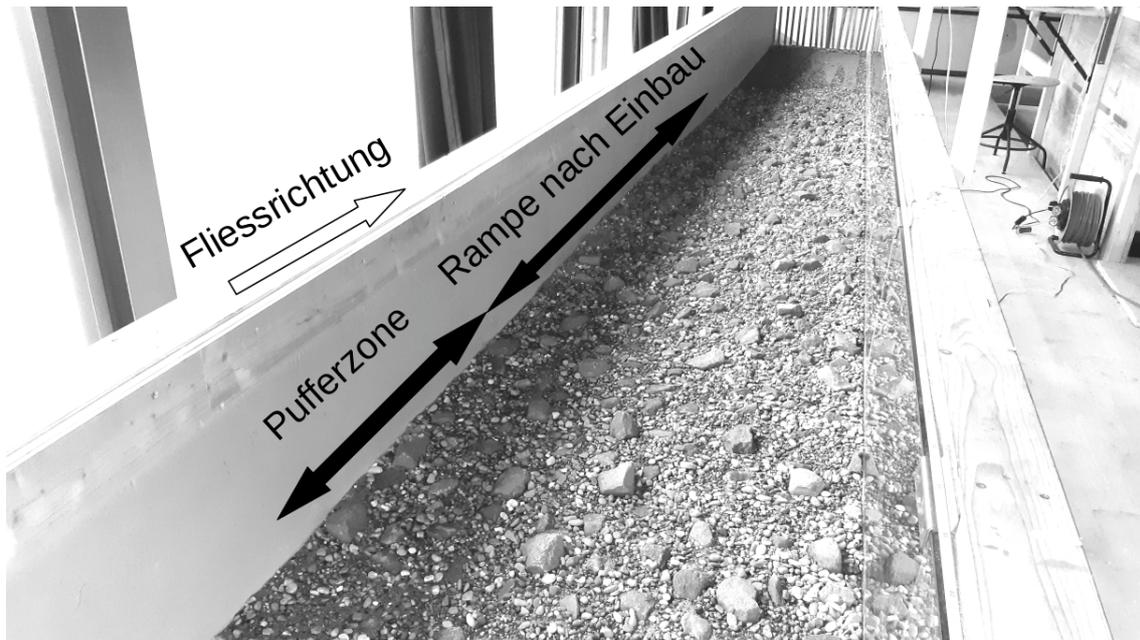


Abb. 2: Ansicht des hydraulischen Modells mit Rampenanfangsgefälle $J = 3.0\%$. Die Pufferzone soll den für den Erosionsprozess der Rampe erforderlichen Raum zur Verfügung stellen. Zur Gewährleistung einer homogenen Rampenmorphologie am Ende des Strukturierungsprozesses weist die Pufferzone die gleiche Kornzusammensetzung der Rampe auf, jedoch mit einem dem Flussabschnitt oberhalb der Rampe entsprechenden Anfangsgefälle (Abb. 5).

Die Struktur der Rampe (Grundmaterial und Blöcke) besteht aus einem Korngemisch mit festgelegter Kornzusammensetzung. In erster Näherung wird eine Kornverteilung nach Weichert *et al.* (2007) angenommen ($d_{max} = 2.0$ m, $d_{90} = 1.0$ m, $d_{50} = 0.24$ m und $d_{10} = 0.05$ m).

Die größeren Stabilisierungselemente ($d > 60$ cm) werden im physikalischen Modell durch drei charakteristische Durchmesser nachgebildet. Um eine effiziente Analyse und Quantifizierung der Prozesse zu ermöglichen, werden diese größeren Komponenten verschiedenartig gefärbt (die roten Steine entsprechen $d_{Natur} = 2.0$ m, die grünen $d_{Natur} = 1.5$ m und die blauen $d_{Natur} = 1.0$ m, s. Abb. 3).

Der Einbau der größeren Elemente erfolgt schichtenweise, mit den grösseren, roten Blöcken ganz oben und mit den kleineren, blauen Blöcken unten (vgl. Abb. 3). Diese Grundstruktur wurde in Anlehnung an die Morphologie natürlicher

Strecken definiert. Der Grundgedanke besteht darin, dass bei relativ kleinen Abflüssen die feine Matrix rasch mobilisiert werden kann und folglich die roten und zum Teil die grünen Steine als umströmtes Hindernis wirken und somit sofort zur dynamischen Strukturierung der Rampe beitragen. Mit sukzessiver Erhöhung der hydraulischen Belastung werden die groben Steine vermehrt exponiert und die Struktur der Rampe wird vielseitiger. Mit steigendem Abfluss erfolgt neben der progressiven Strukturierung der Sohle auch eine Rotationserosion mit zunehmender Abflachung des Gefälles. Bei steigendem Abfluss bildet sich gleichzeitig die für eigendynamische, natürliche Morphologien in diesem Gefällsbereich typischen Abfolgen steiler und flacher Abschnitte. Die globale Stabilität der Rampe nimmt progressiv zu.

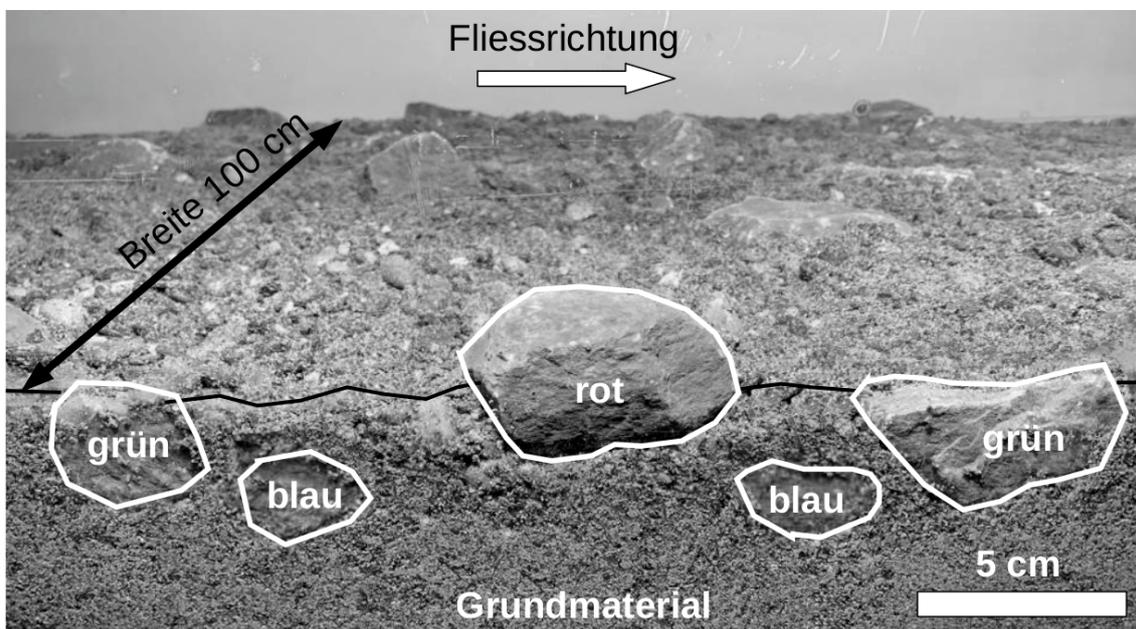


Abb. 3: Struktur der eigendynamischen Rampe mit den groben Konsolidierungselementen nach dem Einbau.

3.3 Vorgehen und Versuchsbedingungen

Die Stabilität der Rampe ist für mindestens zwei Einbaugesälle (4.5% und 3.0%) zu untersuchen. Die Belastung der Struktur erfolgt mit steigendem Abfluss zwischen HQ_2 und EHQ , wobei nach jedem Belastungsschritt die Sohle photogrammetrisch aufgenommen wird und das mittlere Gefälle erfasst wird. Zwei unterschiedliche Einbauanordnungen der Rampe werden untersucht und die für die Stabilität der Rampe relevanten Strukturierungsprozesse werden dokumentiert und analysiert.

Pro Einbauanordnung und Einbaugesälle ist die folgende Versuchsserie vorgesehen: Progressive Zunahme der hydraulischen Belastung mit steigendem Abfluss (7 Abflüsse, von HQ_2 bis EHQ je stationär und bis zur morphologischen

Ruhe, d.h. keine Geschiebewegung, visuelle Beurteilung); Ganglinienversuch mit *HQ100*; Ganglinienversuch mit *EHQ*; Zweiter Versuch mit progressiver Zunahme der hydraulischen Belastung (wieder von *HQ2* bis *EHQ*) zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit.

3.4 Erste Resultate und vorläufige Folgerungen

Bis zur Abgabe des vorliegenden Artikels wurden im Rahmen der physikalischen Untersuchung der eigendynamischen Rampe in Lodrino zwei Versuche durchgeführt. In beiden Versuchen wurde dieselbe Anordnung der groben Strukturierungselemente eingebaut. Variiert wurde dagegen das Anfangsgefälle der Rampe: beim ersten Versuch wurde ein Gefälle von 3%, beim zweiten ein Gefälle von 4.5% vorgegeben. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Resultate der Modelluntersuchung vorgestellt.

Ausgehend von der vordefinierten Einbaugeometrie erfolgt eine erste, oberflächennahe Strukturierung auf der steilen Rampe schon bei kleinen Abflüssen (< 100 m³/s = ca. *Q36*) mit der Mobilisierung der feinen Komponenten des Sohlenmaterials. Eine weitere, tiefer greifende Strukturierung der eigendynamischen Rampe mit ersten Anzeichen einer Rotationserosion erfolgt später, jeweils bei relativ häufigen Ereignissen (ca. *HQ2*). Die Sohlenentwicklung bei der progressiven Steigerung der hydraulischen Belastung ist in den folgenden Abbildungen anhand des Längensprofils und der Beziehung zwischen Abfluss und mittlerem Rampengefälle dargestellt.

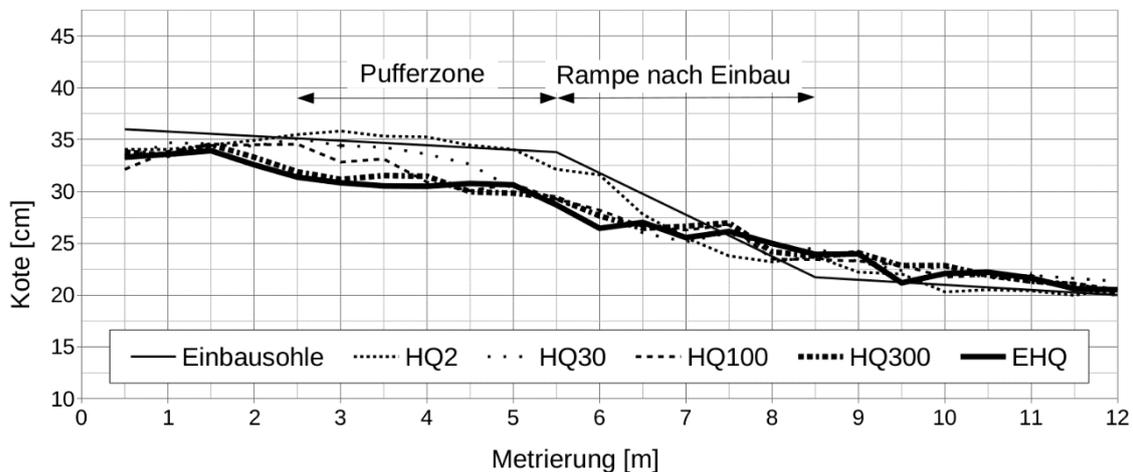


Abb. 4: Abflachung des Rampengefälles mit zunehmender hydraulischer Belastung. Durch die Rotationserosion wird die Pufferzone progressiv vom Strukturierungsprozess erfasst. Bei einem hundertjährigen Abfluss erreicht der Rampenkopf die obere Grenze der Pufferzone, während sich die Erosion bei einem dreihundertjährigen Abfluss weiter flussaufwärts erstreckt. Dargestellt ist die Situation mit einem Einbaugefälle von 4.5%.

Bei den durchgeführten Versuchen wurde auch bei maximaler hydraulischer Belastung kein Versagen der Struktur beobachtet. Bei der stufenartigen progressiven Erhöhung des Abflusses bis zum EHQ erfolgt eine graduelle Anpassung des Gefälles und Strukturierung der Morphologie, ohne dass es zu einem totalen Kollaps der Rampe kommt.

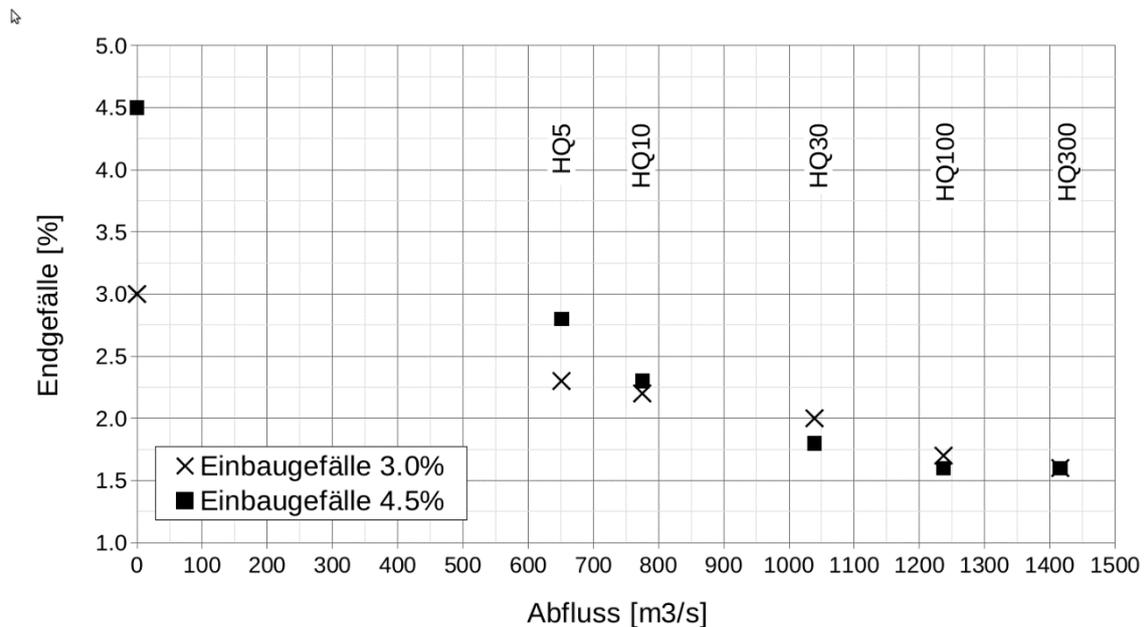


Abb. 5: Beziehung zwischen Abfluss und mittlerem Rampengefälle.

Für beide in Abb. 5 dargestellten Versuche weist die Rampe nach einer progressiven Belastung bis zu einem *HQ10* ein vergleichbares Längsgefälle auf. Dabei ist die Entwicklung der Rotationserosion im Falle eines grösseren Anfangsgefälles bedeutend schneller. Die weitere Entwicklung des Längsgefälles von *HQ10* bis zu *HQ300* erfolgt in beiden Fällen sehr ähnlich. Bei *HQ300* stellt sich in beiden Situationen ein mittleres Gefälle von 1.6% ein. Daraus lässt sich vorläufig schließen, dass das Endgefälle bei gleicher Kornzusammensetzung und Einbauanordnung der Grobkomponenten vom Einbaugesfälle unabhängig erscheint. Ob die in den zwei Fällen entstehenden Strukturen unterschiedliche Charakteristika aufweisen, werden die geplanten detaillierten Analysen der Rauheiten sowie die Untersuchung der Wandermöglichkeiten und der Habitatverhältnisse (vgl. Tognacca und Rossi, 2020) zeigen.

Die grössten/größten morphologischen Veränderungen infolge progressiver hydraulischer Belastung sind deutlich in Abb. 6 zu erkennen. Mit steigendem Abfluss kommen auch die groben Sohlenkomponenten in Bewegung. Es resultiert eine teilweise Gruppierung der groben Steine, welche zur Stabilität der Rampe beiträgt.

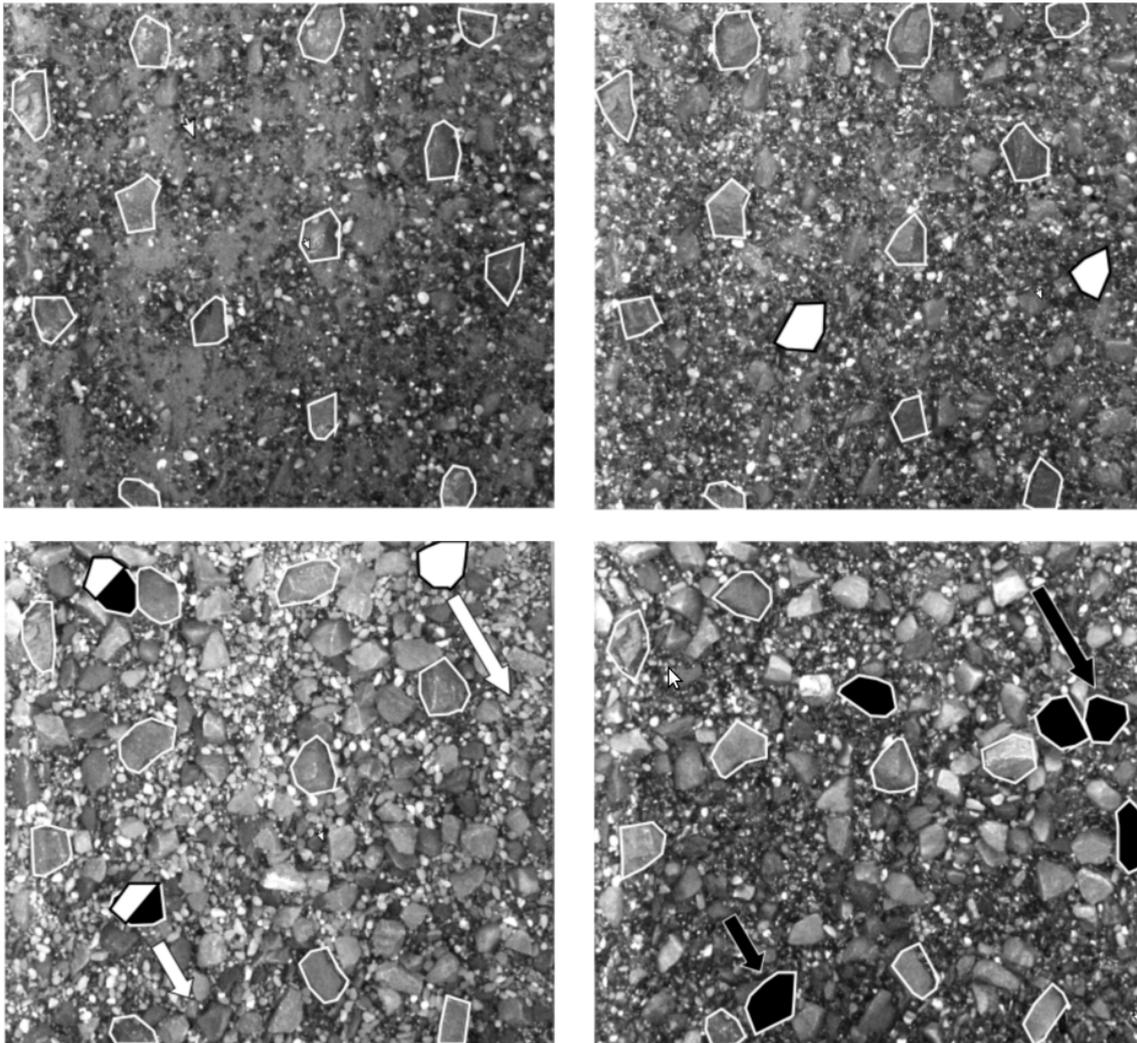


Abb. 6: Sohlenstrukturierung der Rampe mit zunehmendem Abfluss. Oben links: Situation nach Einbau; oben rechts: Morphologie nach $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$; unten links: nach HQ100 und unten rechts: nach EHQ. Die Fließrichtung ist von oben nach unten. Auf den Orthofotos sind die größeren Sohlenkomponenten (rote Steine) markiert. Die Steine, welche bei der nächsten Belastungsstufe immer noch stabil sind, sind weiss umrandet. Steine, welche bei der nächsten Belastungsstufe in Bewegung kommen, sind weiss gefärbt. Schwarz markierte Steine sind während der dargestellten Belastungsstufe an den neuen Ort transportiert und abgelagert worden. Schwarz-weiss gefärbte Steine sind während der dargestellten Belastungsstufe am neuen Ort abgelagert worden und sie werden bei der nächsten Stufe wieder mobilisiert.

In den nächsten Phasen der Analyse werden die Prozesse noch näher untersucht und die aufgestellten Hypothesen werden kritisch hinterfragt und weiterentwickelt. Die bei der stufenweisen Steigerung der hydraulischen Belastung entstehenden Strukturen werden statistisch untersucht und zusammen mit den rein geometrischen Sohleneigenschaften in Beziehung mit dem Stabilitätsverhalten der Rampe gesetzt.

4 Ausblick

Die in vorliegendem Beitrag beschriebenen Ergebnisse ermöglichen es, die ersten Hypothesen zum Stabilitätsverhalten eigendynamischer Rampen aus einer vordefinierten Einbaugeometrie mit einem Endgefälle im Bereich von maximal 3% zu formulieren.

Durch die in den nächsten Monaten vorgesehenen weiteren physikalischen Versuche sollen die Strukturierungsprozesse im Hinblick auf die Robustheit der Rampe systematisch und quantitativ analysiert werden.

Das Ziel ist dabei die Machbarkeit der eigendynamischen Rampe für die Sanierung der Blockrampe in Lodrino endgültig zu bestätigen. Die gewählte Einbauanordnung soll neben dem Erreichen der Stabilitätsanforderungen auch die Erfüllung der ökologischen Kriterien ermöglichen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Auftraggebern (Consortio Manutenzione Arginature Riviera und Ufficio dei corsi d'acqua) für die angenehme und wertvolle Zusammenarbeit und das entgegengebrachte Vertrauen.

Referenzen

Tognacca., Chr., Rossi, V. (2020). Nachweis der Wanderkorridore auf einer eigendynamischen Rampe. Wasserbausymposium 2020 in Zürich.

Weichert, R., Bezzola, G.R., Minor, H.-E. (2007). Stufen-Becken-Abfolgen als sohlstabilisierende Massnahme. Wasser Energie Luft 99(2), 161-166.

Adressen der AutorInnen

Dipl. Ing. ETH Stefano Tognacca (korrespondierender Autor)

Dr., Dipl. Ing. ETH Christian Tognacca, MSc UNIL Enea Toschini, Dr., Dipl. Ing. ETH Simona Tamagni

Laboratorium3d GmbH

Via Prada 6, CH-6710 Biasca

stefano.tognacca@laboratorium3d.ch