

# Modellversuch zur Untersuchung des Nachkolkbereichs einer Sohlrampe im Stauraum des KW Stegenwald

*Manuel Pirker, Josef Schneider und Gerald Zenz*

## Zusammenfassung

Das sich derzeit in der Genehmigungsphase befindende Laufkraftwerk Stegenwald der VERBUND Hydro Power GmbH an der Salzach wird seit 2019 im Wasserbaulabor der TU Graz begleitend zur Planung als physikalisches Modell untersucht. Aus den durchgeführten Untersuchungen erfolgte die Entwicklung einer strömungs- und sedimentlenkenden Sohlrampe. Der orographisch rechte, stromab gelegene Nachkolkbereich dieser Rampe soll nun bei der Hochwasserabfuhr bzw. Staulegung im Stauraum weiter untersucht werden. Hierfür sollen instationäre Hochwasserlastfälle inklusive Geschiebetransport im physikalischen Modell simuliert werden.

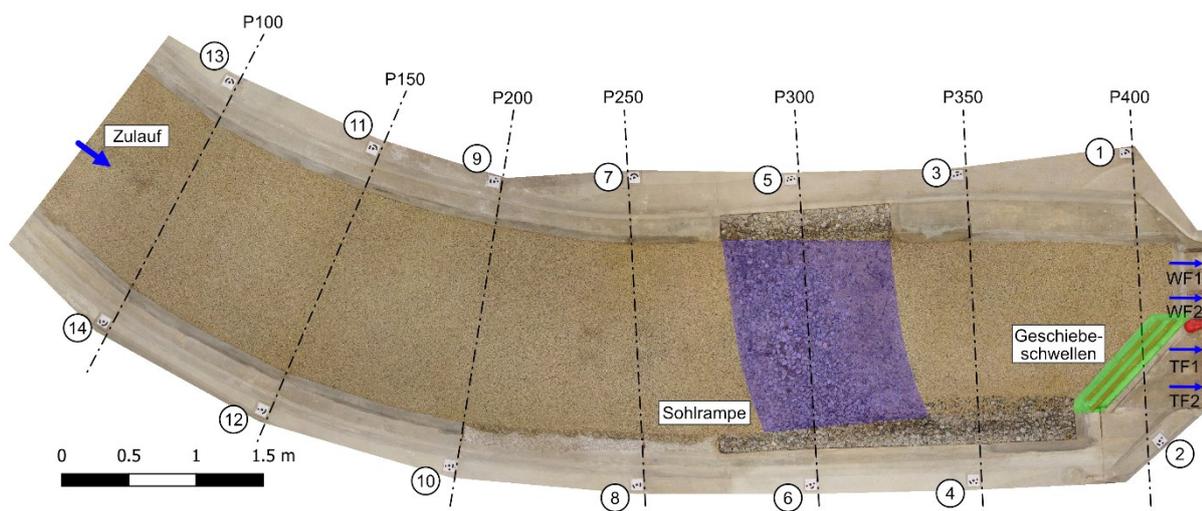
Dieser Beitrag befasst sich unter anderem mit den Herausforderungen für die Umrüstung der hydraulischen Anlagen, der Ergänzung einer Geschiebezugabe mit zentraler Steuerung sowie deren Kalibrierung.

Letztlich erfolgten Untersuchungen des Nachkolkbereichs mittels Fotogrammetrie zur Bestimmung der Kubaturänderungen und zur Herleitung der Oberflächenrauheit der im Stauraum entstehenden Ablagerungen.

## 1 Einleitung

Das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft begleitet seit 2019 die Planung des Laufkraftwerks Stegenwald mit einem Modellversuch im Maßstab 1:40. Das Laufkraftwerk mit einem Ausbaudurchfluss von 203 m<sup>3</sup>/s und einer Rohfallhöhe von ca. 8 m bildet das vorläufig letzte der Salzach-Kraftwerkskette Schwarzach-Werfen und ist Unterlieger des Kraftwerks Werfen-Pfarrwerfen (Zenz et al. 2022). Nach Abschluss des Modellversuchs, welcher sich bereits mit dem Ablagerungsverhalten von Geschiebe im Unter- und Oberwasser sowie an den Turbineneinläufen auf fester Sohle befasste (Schneider et al. 2022a; Schneider et al. 2022b), erfolgte eine Neubeauftragung zur Untersuchung der im Oberwasser situierten Rampe. Diese Untersuchungen erforderten den Umbau auf eine bewegliche Sohle mit festen Böschungen sowie die instationäre Steuerung des Durchflusses und der Geschiebezugabe. Abb. 1 zeigt eine Übersicht des Modellaufbaus.

Dieser Beitrag befasst sich unter anderem mit den Herausforderungen für die Umrüstung der hydraulischen Anlagen, der Ergänzung einer Geschiebezugabe mit zentraler Steuerung sowie deren Kalibrierung. Letztlich erfolgten die Untersuchungen des Nachkolkbereichs mittels Fotogrammetrie zur Bestimmung der Kubaturänderungen und zur Herleitung der Oberflächenrauheit im Stauraum.



**Abb. 1** Übersicht des Modells Oberwasser der Wehranlage mit Querprofilen (P100-P400) und den Referenzpunkten für die Fotogrammetrie (1-14).

## 2 Umbau einer stationären Anlage für den instationäre Betrieb

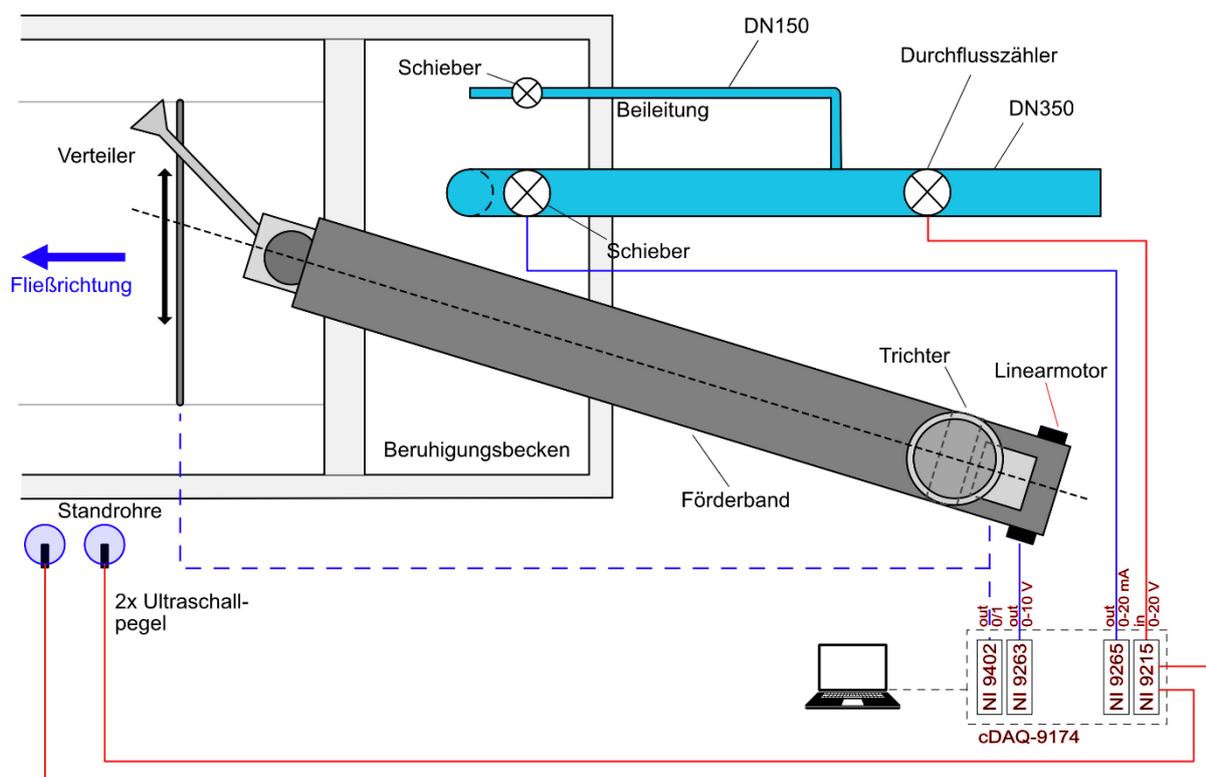
Die ursprünglichen hydraulischen Versuche am KW Stegenwald wurden ausschließlich mit stationärem Abfluss durchgeführt. Für die Geschiebemodellierung im Modellversuch war jedoch nicht nur eine zeitabhängige Steuerung des Zuflusses erforderlich, sondern auch eine kontrollierte Zugabe von Modellgeschiebe. Zu diesem Zweck wurde der Zulauf mit einem luftdruckregulierten Kugelschieber und einem induktiven Durchflusszähler ausgestattet, der analog gesteuert wurde. Die Steuerung des Kugelschiebers erfolgte in Abhängigkeit des momentanen Durchflusses und nicht durch eine vorherige Kalibrierung. Dadurch konnte das Modell unabhängig von anderen Versuchen im Labor betrieben werden. Für die Geschiebezugabe in das Durchlaufmodell wurde ein spannungsgesteuertes Förderband entwickelt, das eine lineare Steuerung der Volumenzugabe pro Zeitintervall ermöglichte. Vor jeder Versuchsdurchführung wurde eine Kalibrierung auf die Schüttdichte des verwendeten Materials durchgeführt, um die notwendige Massenzugabe zu erhalten. Abb. 2 bietet einen Überblick über die einzelnen Steuerungs- und Zugabekomponenten.

Die Auslesung des Durchflusszählers erfolgte über ein NI-9215 Spannungseingangsmodul. Der Durchfluss wurde über einen Zeitraum von 10 Sekunden gemittelt und durch Anwendung eines Kalibrierfaktors von gemessenen Volt in Liter pro Sekunde umgerechnet. Die erforderliche Öffnungsweite des Schiebers wurde kontinuierlich angepasst, um den Durchfluss auf dem Zielwert zu halten. Diese wurde abhängig von den vorgegebenen und den aktuellen Werten der Durchflüsse und Öffnungsweiten für den kommenden Durchfluss berechnet. Da die Öffnungsweite direkt proportional zur angelegten Stromstärke ist, kann diese direkt substituiert werden. Das verwendete Modul NI-9265 erlaubt Ausgaben von 0 mA (geschlossen) bis 20 mA (voll geöffnet).

Der Linear-Motor, der das Förderband antrieb, wurde durch ein NI-9263 Spannungsausgabemodul betrieben, das einen Bereich von 0 bis 10 Volt unterstützte. Allerdings reichte das aufgebraachte Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen nicht aus, um das Förderband zu bewegen, weshalb für geringe Zugaberaten (kleiner als 0,8 kg/min) ein getakteter Betrieb notwendig war. Hierbei wurde das Förderband für 10 Sekunden bei niedrigster Geschwindigkeit bewegt, gefolgt von einer Pause, um im Mittel die entsprechende Zugaberate zu erhalten. Die Bandgeschwindigkeit wurde auf den Massendurchsatz der Zugabe kalibriert, da die Schüttdichte des Materials in Ab-

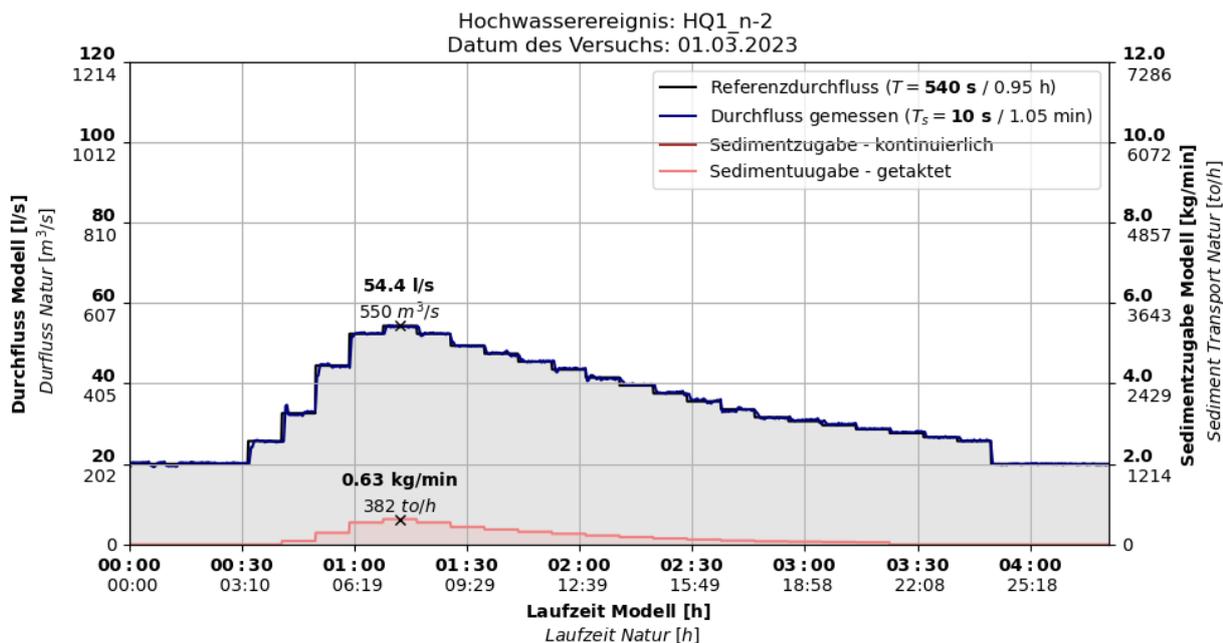
hängigkeit der Feuchte variierte (bis zu 25% Massenunterschied zwischen Feuchtdichte und Trockendichte). Da eine eigene Trocknung des Zugabematerials aufgrund der hohen Mengen und des fehlenden Equipments im Labor nicht möglich war, erfolgte die Kalibrierung durch die Ermittlung der linearen Beziehung zwischen der Volt-Ausgabe und dem Massendurchsatz für eine bestimmte Zeiteinheit. Nachdem diese Beziehung ermittelt wurde, wurde das Förderband für 15 Minuten betrieben, und die tatsächlich durchgesetzte Masse wurde mit der aus der Kalibrierung ermittelten Masse verglichen. Wenn die Abweichung weniger als 5% betrug, wurde die Kalibrierung als gültig erachtet, und der Versuch konnte beginnen. Die gesamte zugegebene Masse wurde während des Versuchs dokumentiert, und die daraus errechneten Abweichungen lagen unter 6,5% der gesamten zugegebenen Masse.

Neben der Steuerung des Förderbands wurde auch die Steuerung des Verteilers umgesetzt. Dieser soll eine gleichmäßige Verteilung des Materials über die gesamte Gerinnebreite sicherstellen. Zusätzlich erfolgt die Steuerung der Vibration des Einfülltrichters in Abhängigkeit vom Betrieb des Förderbands über einen mit einem NI-9402 Digitalausgabemodul gesteuerten Relay-Schalter. Die Vibrationen am Trichter verhindern das Blockieren des Auswurfs und führen zu einer gleichmäßigeren Verdichtung des eingefüllten Materials.



**Abb. 2** Schema der instationären Steuerung des Durchflusses und der Sedimentzugabe

Die einzelnen Komponenten wurden zentral über die NI-DAQmx Python-API von National Instruments simultan gesteuert. Dadurch war es auch möglich, die Randbedingungen während des Versuchs kontinuierlich zu überwachen. Neben dem Durchfluss wurden auch vier Pegelstände gemessen. Die Pegelstände in den Profilachsen 150 und 250 wurden durch den Einsatz von zwei Standrohren mit Ultraschallsensoren erfasst. Zusätzlich wurden Stangen der Fafnir-GmbH am Wehrfeld 1 (WF1) und Turbinenfeld 2 (TF2) installiert, um weitere Pegelstände zu messen. In Abb. 3 ist die Dokumentation des Durchflusses und der Sedimentzugabe eines einjährigen Hochwasserereignisses für den Betriebsfall „Stauhaltung n-2“ dargestellt.



**Abb. 3** Monitoring der Randbedingungen eines Modellversuchs bei einem einjährigem Hochwasserereignis

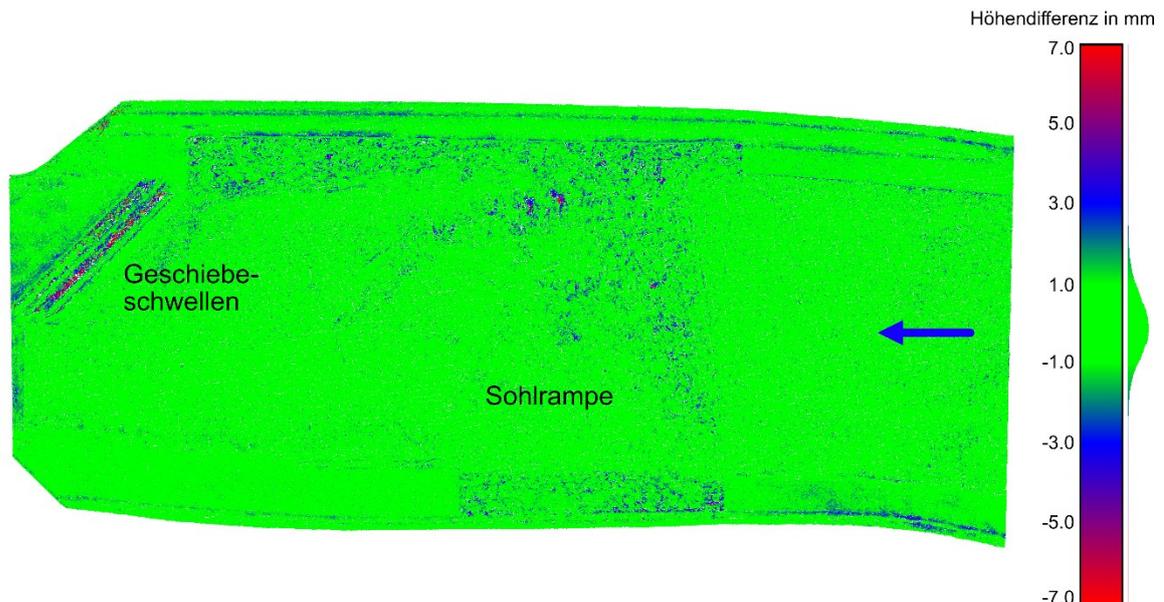
### 3 Fotogrammetrie zur Versuchsdokumentation

Fotogrammetrie ermöglicht den Erhalt von 3D Information aus 2D Bildern. Die einfachste Form wäre eine Stereoskopie, bei der aus zwei stationären Blickwinkeln Passpunkte ermittelt und über den Schnittpunkt des Blickstrahls deren Position im 3D Raum errechnet wird. Im Gegensatz zu fix stationierten Kamerapositionen benötigt die Structure-from-Motion (SfM) Technologie keine festen Positionen und kann ein 3D-Modell aus einer Vielzahl sich überlappender Bilder ableiten. Die Anwendung von SfM zur Aufnahme von physikalischen Modellen hat sich in den letzten Jahren verbessert, da es mittlerweile eine Vielzahl von einfach anwendbaren Software-Tools für die Prozessierung gibt. Darüber hinaus sind die Kosten im Vergleich zu Laserscanaufnahmen erheblich geringer, während dennoch ausreichende Genauigkeiten erreicht werden können.

Für die Dokumentation der Sohländerung wurden zuerst Bilder einer Nikon D7200 auf Stativ mit einer Auflösung von 6000 x 4000 Pixel verwendet, in weiterer Folge auch eine Unmanned Arial Vehicle (UAV) vom Typ DJI Mavic Mini mit einer Auflösung 4000 x 3000 Pixel. Trotz der reduzierten Auflösung, konnte mit der UAV eine höhere Qualität des erstellten Digitalem Geländemodell (DGM) erreicht werden. Dies lässt sich dadurch erklären, dass mit der Handkamera die Bilder nur seitlich auf das Modell aufgenommen werden konnten, nicht jedoch direkt von oben, was zu eher flachen Schnitten zwischen den einzelnen Aufnahmen führte.

Zusätzlich wurden 14 Ziele entlang des Oberlaufs des Modells (siehe Abb. 1) als Ground Control Points (GCP) installiert und mittels einer Laserscanaufnahme durch einen Leica RTC360 vermessen. Diese Ziele wurden dann während der SfM-Prozessierung automatisch detektiert und in die Berechnung der Punktwolke miteinbezogen um die Verzerrungen zu reduzieren. Der mittlere Fehler an den GCPs lag bei 2-3 mm und somit nahe der Messgenauigkeit des RTC360 von 1,9 mm auf 10 m Entfernung. Die SfM-Prozessierung erfolgte mittels der Agisoft Software MetaShape Professional.

Ein Vergleich mit einer Laserscanaufnahme des gesamten Modellbereichs ergab ein Gauß-normal-verteiltes Fehlerbild mit einer mittleren Abweichung in der Höhe für den Oberwasserbereich von unter 1 mm und einer Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMS) von 0,96 mm. Die Auswertung der beiden Punktwolken erfolgte auf einem 4 mm Raster mit der Freeware CloudCompare. Abb. 4 zeigt, dass die größten Fehler im Bereich der Ufersicherung und der Rampe auftreten, wo es durch die größeren Korndurchmesser der Rampenschichtung zu Abschattungen kommt. Fehlerhaft erfasst wurden die Geschiebeschwellen der beiden rechtsufrigen Turbineneinlässe, wo es aufgrund der gewählten Stationierung des RTC360 ebenfalls zu einer Abschattung kam.



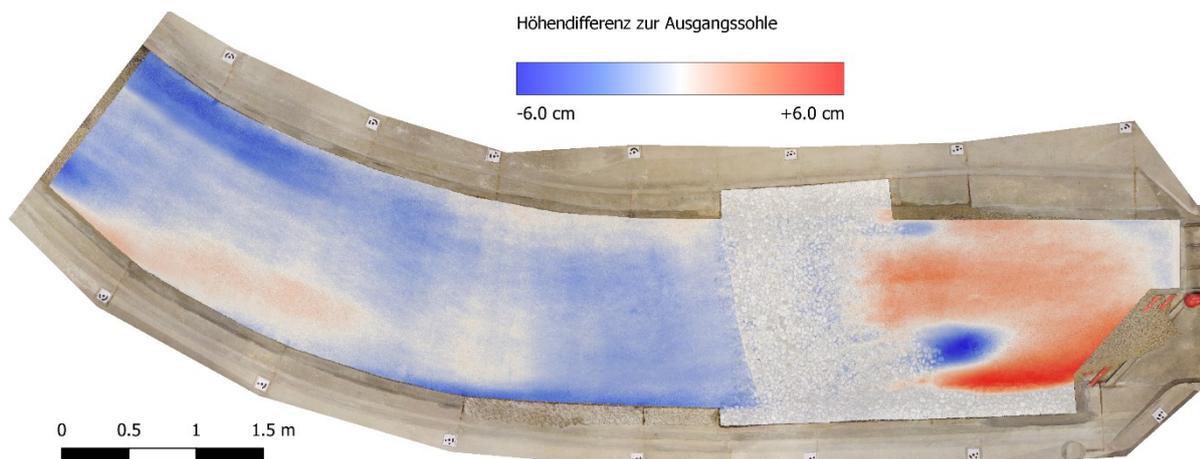
**Abb. 4** Höhendifferenzen zwischen Fotogrammetrie aus mehreren UAV Aufnahmen und Laserscan durch den Leica RTC360

### 3.1 Ermittlung der deplatzierten Volumina

Vor und nach jedem Modelldurchlauf wurden UAV-Befliegungen durchgeführt. Aus den fotogrammetrischen Punktwolken wurden DGM unterschiedlicher Auflösungen abgeleitet. Die Berechnung der deplatzierten Volumina im Stauraum und Oberwasser erfolgte in 2.5 D anhand der DGMs mit einer Auflösung von 5 mm. Ein Vergleich der ausgetragenen und angelandeten Volumina für die verschiedenen Bestreitensfälle ist in Tab. 1 zusammengefasst. Über die Höhendifferenzen zwischen den Aufnahmen vor und nach Versuchsdurchführung (siehe Abb. 5) lassen sich Anlandungen sowie Kolke und Eintiefungen erkennen.

**Tab. 1** Volumenbilanz für Hochwasserereignis HQ1 bei unterschiedlicher Betriebsführung

Volumen in dm <sup>3</sup>	Angelandet	Ausgetragen	Bilanz
<i>Im Stauraum</i>			
HQ1(n-0)	+44,1	-7,7	+36,4
HQ1(n-2)	+64,4	-4,7	+64,6
<i>Oberwasserseitig der Rampe</i>			
HQ1(n-0)	+3,5	-84,9	-81,4
HQ1(n-2)	+2,5	-57,5	-55,1

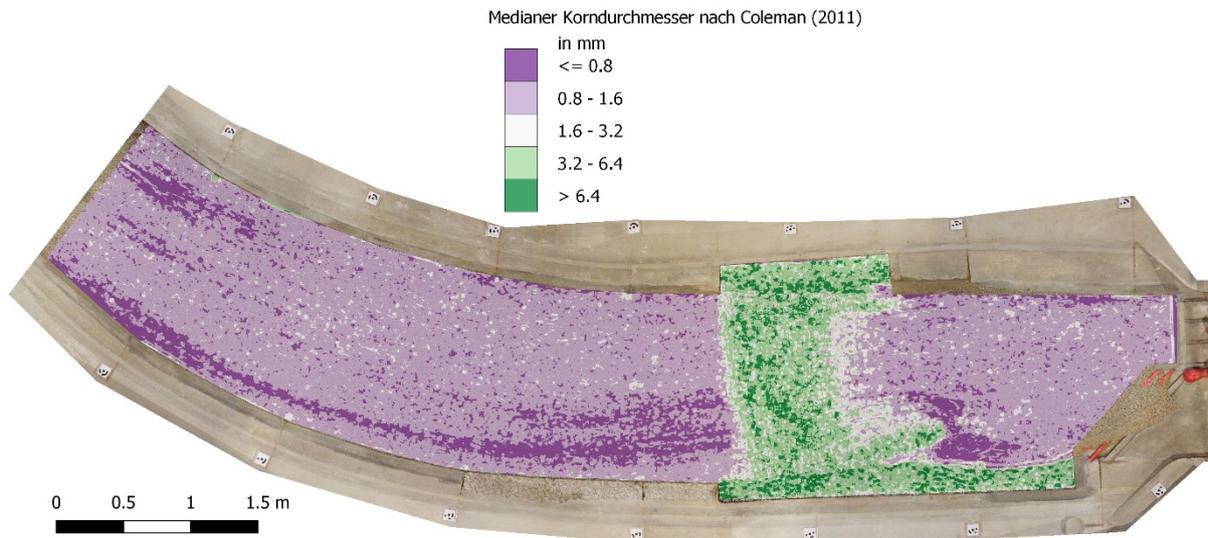


**Abb. 5** Höhendifferenzen zwischen der eben eingebauten Modellsohle und nach HQ1(n-0). Das Volumen des über die Sohlschwellen eingetragenen Geschiebes wurde getrennt ermittelt

### 3.2 Ermittlung der Oberflächenrauheit

Die bildbasierte Auswertung eines Orthofotos zur Ermittlung einer Kornverteilung der Deckschicht, wurde bereits vielfach erfolgreich im Labor und auch in der Natur angewandt (Lang et al 2020; Heritage und Milan 2009). Grundsätzlich lassen sich bildbasierte Auswertungen in drei Methoden unterteilen: (i) Verwendung der Bilddaten um direkt auf eine Verteilung zu schließen (statistische Kornverteilung), (ii) Umrandungen der Einzelkörner zu detektieren um daraus deren Durchmesser zu ermitteln (individuelle Kornverteilung), (iii) die Erkennung charakteristischer Kennwerte einer Verteilung wie  $D_{50}$  oder  $D_{84}$ . Wu (2021) listet einen Überblick der gängigen Methoden. Aus der Kornverteilung der Deckschicht im Modell lassen sich charakteristische Kennwerte ableiten, die Rückschlüsse auf das hydraulische Verhalten an den untersuchten Stellen erlauben. Ein wichtiger Kennwert ist dabei der mediane Korndurchmesser  $D_{50}$  von welchem u.a. der Strickler-Beiwert (u.a. Strickler 1923; Henderson 1967; Julien 2002), die äquivalente Sandrauheit (u.a. Mertens 1995; DVWK 1990), oder im Zusammenhang mit dem hydraulischen Radius, der Darcy-Weisbach Reibungskoeffizient (u.a. Griffiths 1981; Limerinos 1970; Phillips und Ingersol 1998) ermittelt werden kann.

Um die flächige Verteilung der Oberflächenrauheit sowie deren Änderung während der Versuche zu dokumentieren, wurde die lokale Standardabweichung der Höhe  $\sigma_z$  als äquivalent zur effektiven Rauheitshöhe ermittelt (Gomez, 1993; Nikora et al., 1998; Heritage und Milan 2009).  $\sigma_z$  entspricht hierbei der Standardabweichung der Höhendifferenzen je Pixel einer 100x100 Pixel großen Kachel von der gemittelten Ebene aus 33 Messpunkten. Die Auswertung erfolgte auf dem photogrammetrischen DGM mit einer Auflösung von 0,5 mm. Basierend auf der Untersuchung von Coleman et al. (2011) wurde zur Abschätzung des medianen Korndurchmessers die lineare Beziehung  $D_{50} = 2,18 \cdot \sigma_z$  herangezogen, die dort aus Labor- und Feldversuchen ermittelt wurde. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass diese Beziehung für Kiese mit  $D = 2 \div 20 \text{ mm}$  hergeleitet wurde und der  $D_{50}$  des Modellsands genau auf der unteren Grenze von 2 mm liegt.

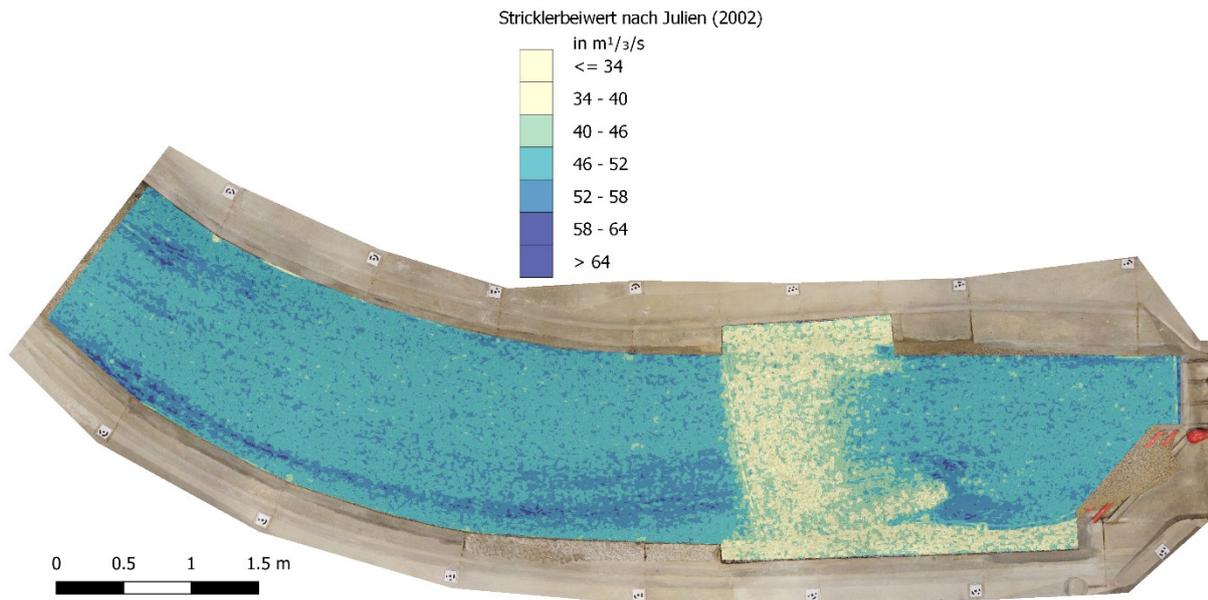


**Abb. 6** Medianer Korndurchmesser  $D_{50}$  im Modell nach HQ1(n-0) ermittelt aus der zweifachen lokalen Standardabweichung der Höhe  $2,18 \cdot \sigma_z$  aus dem fotogrammetrischen DGM.

Um diesen Ablauf auf Modellebene zu validieren, wurde der Stricklerbeiwert über die Verlusthöhe zwischen Profil 250 und 150 bestimmt. Dieser ergibt sich nach dem simulierten Hochwasserereignis HQ1(n-0) zu  $47,4 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  und nach dem Ereignis HQ1(n-2) zu  $46,3 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Zum Vergleich wurde der Stricklerbeiwert aus verschiedenen Ansätzen der Potenzgleichung (Strickler 1923; Julien 2002; Milhous 2015) aus dem zuvor abgeschätzten  $D_{50}$  ermittelt. Stricklers empirische Formel ist auf geschiebeführende Gebirgsflüsse bezogen, während sich die von Milhous angeführte Beziehung für Korndurchmesser unter 4 mm aus Daten von Leopold und Wolman (1956) zu Flüssen und Bächen in Nordamerika hergeleitet wurde. Juliens angegebene Beziehung gilt für Abflüsse im hydraulisch rauen Bereich und korreliert am besten mit den im Modell berechneten Werten (siehe Tab. 2). Diese Werte wurden auch in der Dokumentation des Modellversuchs für den Auftraggeber verwendet. Abb. 7 zeigt das Endresultat dieser Auswertung.

**Tab. 2** Durch verschiedene Ansätze aus dem medianen Korndurchmesser  $D_{50}$  ermittelte Stricklerbeiwerte im Modell zwischen den Profilen P150 und P250.

		<b>Ausgangszustand</b> $\text{m}^{1/3}/\text{s}$	<b>HQ1(n-0)</b> $\text{m}^{1/3}/\text{s}$	<b>HQ1(n-2)</b> $\text{m}^{1/3}/\text{s}$
Strickler (1923)	<i>Min.</i>	53,2	55,0	52,6
	<b>Mw.</b>	<b>74,7</b>	<b>67,3</b>	<b>66,2</b>
	<i>Max.</i>	90,5	92,6	82,1
Julien (2002)	<i>Min.</i>	40,6	42,0	40,2
	<b>Mw.</b>	<b>56,1</b>	<b>50,5</b>	<b>49,6</b>
	<i>Max.</i>	69,2	70,8	62,8
Milhous (2015)	<i>Min.</i>	60,0	35,8	39,2
	<b>Mw.</b>	<b>42,3</b>	<b>45,9</b>	<b>46,4</b>
	<i>Max.</i>	54,8	53,7	55,3



**Abb. 7** Stricklerbeiwerte nach Julien (2002) im Modell nach HQ1(n-0) basierend auf den medianen Korndurchmesser  $D_{50}$  ermittelt aus dem photogrammetrischen DGM.

#### 4 Fazit

Dieser Beitrag beschreibt einen Modellversuch zur Untersuchung des Nachkolkbereichs einer Sohlrampe im Stauraum des Laufkraftwerks Stegenwald an der Salzach. Das Ziel der Untersuchungen war die Entwicklung einer strömungs- und sedimentlenkenden Sohlrampe sowie die Untersuchung des Nachkolkbereichs mittels instationärer Hochwasserlastfälle und Geschiebetransport. Das Modell musste für den instationären Betrieb umgebaut werden, und es wurden Herausforderungen bei der Ergänzung einer Geschiebezugabe mit zentraler Steuerung sowie deren Kalibrierung behandelt. Schließlich erfolgten Untersuchungen des Nachkolkbereichs mittels SfM zur Bestimmung der Kubaturänderungen und zur Ableitung Oberflächenrauheit der im Stauraum entstehenden Ablagerungen. Die beschriebenen Ergebnisse sollen bei der Planung des Laufkraftwerks Stegenwald berücksichtigt werden.

## Literatur

- DVWK (1990). Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten. DVWK-Schriften, Heft 92, Paul Parey Verlag, Hamburg, Berlin.
- Griffiths, G. A. (1981). Flow resistance in coarse gravel bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 107(7), 899–918.
- Gomez, B. (1993). Roughness of stable, armored gravel beds. *Water Resources Research* 29, 3631-3642.
- Milhous, R.T. (2015) On grain roughness in rivers and streams. *Hydrology Days 2015*.
- Julien, P. Y. (2002). *River Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press UK.
- Lang, N. et al (2020). GRAINet: Mapping grain size distributions in river beds from UAV images with convolutional neural networks, *Hydrology and Earth System Science*.
- Limerinos, J.T. (1970). Determination of the Manning Coefficient from Measured Bed Roughness in Natural Channels. *Studies of Flow in Alluvial Channels*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1898-B.
- Leopold, L.B.; Wolman, M.G (1957). *River Channel Patterns: Braided, Meandering, and Straight*. Geological Survey Professional Paper 282-B. US Geological Survey. Washington, DC.
- Mertens, W. (1995). Grundlagen der hydraulischen und sedimentologischen Berechnungen für den naturnahen Gewässerausbau. DVWK-Fachtagung 'Maßnahmen zur naturnahen Gewässerstabilisierung', Kurzfassung der Vorträge, Uni Bw München-Neubiberg.
- Nikora, V.I.; Goring, D.G.; Biggs, B.J.F. (1998). On gravel-bed roughness characterization. *Water Resources Research* 34. 517-527
- Phillips, J.V.; Ingersoll, T.L. (1998). Verification of roughness coefficients for selected natural and constructed stream channels in Arizona. U.S. Geological Survey Professional Paper 1584.
- Schneider, J.; Pikel, F.G.; Badura, H. (2021a). Physical model tests of a new run-of-hydro power plant with some special features, *Proceedings of the 39th IAHR World Congress, Granada, Spanien*.
- Schneider, J.; Pikel, F.G.; Badura, H. (2022b). Untersuchungen am physikalischen Modell zur Optimierung des neu zu errichtenden Kraftwerkes Stegenwald. 21. Wasserbau - Symposium, Wasserbau - krisenfest und zukunftsweisend, Wallgau, Deutschland.
- Strickler, A. (1923): Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. *Mitt. Amt für Wasserwirtschaft*, Nr. 16, Bern.
- Zenz, G.; Schneider, J.; Pikel, F.G.; Lazar, F. (2022). *Hydraulischer Modellversuch Kraftwerk Stegenwald, unveröffentlichter Endbericht.*, Graz, Österreich.

## **Anschrift der Verfasser**

Dipl.-Ing. Manuel Pirker, BSc.  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz  
Stremayrgasse 10/II, A-8010 Graz  
manuel.pirker@tugraz.at

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat.techn. Josef Schneider  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz  
Stremayrgasse 10/II, A-8010 Graz  
schneider@tugraz.at

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Zenz  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz  
Stremayrgasse 10/II, A-8010 Graz  
gerald.zenz@tugraz.at