

Hybride Untersuchung zur Hydraulik und Morphodynamik an einem Laufwasserkraftwerk – Methodik und erste Ergebnisse

Fabian Popp und Stephan Theobald

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden die methodische Vorgehensweise sowie erste Ergebnisse der hybriden Untersuchung von Verlandungsprozessen im Einlauf des Laufwasserkraftwerks Rheinfelden vorgestellt. Die übergeordneten Transportprozesse in der Stauhaltung werden abgeschätzt und eine bathymetrisch erfasste Anlandung am Kraftwerkseinlauf wird mithilfe verschiedener Modellverfahren nachgebildet. Aufbauend werden potentielle Maßnahmen zur Reduzierung der Verlandungstendenz der Einlaufplatte identifiziert und analysiert. Für die Untersuchungen kommen ein 2D- und ein 3D-hydrodynamisch-numerisches (HN)-Modell im Naturmaßstab sowie ein maßstäblich verkleinertes gegenständliches Modell in der Wasserbauhalle zum Einsatz. Dieses Labormodell wird zusätzlich in einem weiteren 3D-HN-Modell nachgebildet. Das 2D-HN-Modell umfasst die gesamte Stauhaltung und hat die Abschätzung der übergeordneten morphodynamischen Prozesse zum Ziel. Das Labormodell und die 3D-HN-Modelle bilden den Nahbereich der Stauanlage ab und dienen der Untersuchung der durch dreidimensionale Strömungseffekte dominierten Verlandung der Einlaufplatte. Die Komplexität der abzubildenden Prozesse macht einen eng verzahnten Einsatz der verschiedenen Modellverfahren unerlässlich.

Mithilfe des 2D-HN-Modells wurde ein rund 30 bis 40 Prozent der Gewässerbreite umfassender Längsstreifen entlang des Innenufers der gekrümmten Stauhaltung als bevorzugter Geschiebetransportweg identifiziert. Dieser zeigt sich im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse weitestgehend unabhängig von verschiedenen Korndurchmessern, Transportansätzen und Abflussverhältnissen. Es liegen keine Naturmessdaten zur Menge und Verteilung des Sedimenttransports in der Stauhaltung vor. Die mit dem 2D-HN-Modell abgeschätzten Werte dienen daher als Eingangsgrößen für das Labormodell und das 3D-HN-Modell. Um die weiteren Einstellungen und Vorgaben für das Labormodell (z.B. Modellgranulat) und das 3D-HN-Modell (z.B. Berechnungsnetz, Transportansatz und zugehörige Parameter) zu definieren, wurden umfangreiche Untersuchungen zur Nachbildung eines ausgewählten Naturzustandes durchgeführt. Beide Modelle zeigen bei der Nachbildung der Verlandung mit den erarbeiteten Parametern gute Ergebnisse. Der Anlandungskörper wird hinsichtlich Lage, Form und Größe gut abgebildet. Auch die Anlandungsvolumina stimmen mit einer Abweichung von weniger als fünf Prozent zwischen der Natur und den beiden Modellen gut überein.

1 Hintergrund und Einführung

Im Jahr 2010 wurde am Hochrhein bei Basel nach einer siebenjährigen Bauzeit das neu errichtete Laufwasserkraftwerk Rheinfelden in Betrieb genommen. Dieses ersetzt im Zuge der Neukonzessionierung des Kraftwerksstandorts das an dieser Stelle über nahezu 100 Jahre betriebene alte Laufwasserkraftwerk. Mit einer Ausbauwassermenge von $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ und einer installierten elektrischen Leistung von 100 MW gehört das neue Kraftwerk zu einem der größten Laufwasserkraftwerke Deutschlands. Die vier Kaplanrohrturbinen erzeugen jährlich rund 600 Mio. kWh Strom. Im Zuge des Neubaus wurde das Maschinenhaus auf der linksrheinischen Seite am Schweizer Ufer errichtet. Das angrenzende Stauwehr verläuft auf der gleichen Bauwerksachse bis zum deutschen Ufer (siehe Abb. 1). (Energiedienst Holding AG 2011)

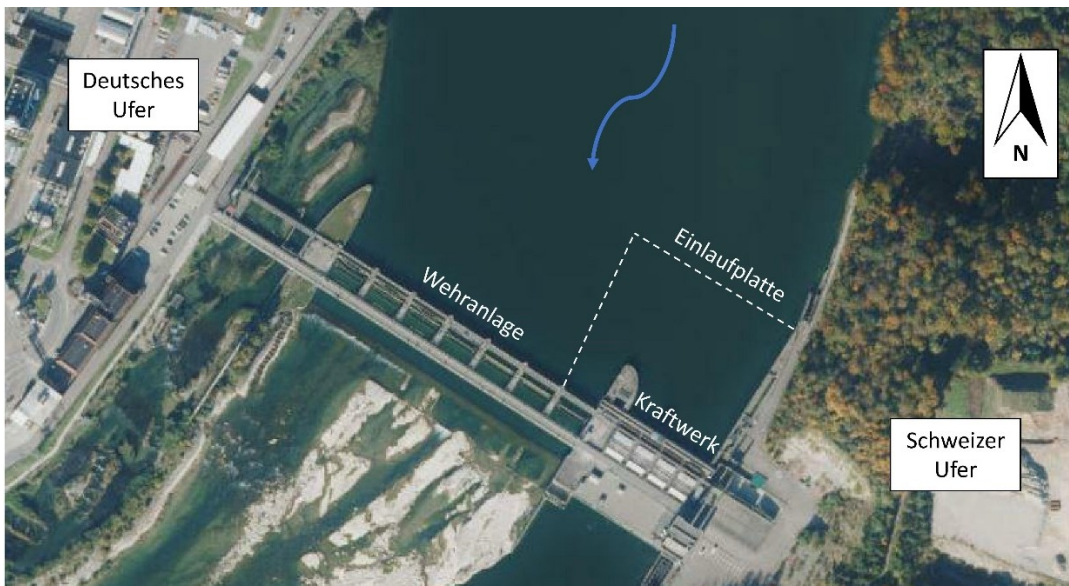


Abb. 1 Luftbild der Stauanlage Rheinfelden (Hintergrundbild: LUBW (2022), bearbeitet)

Kurz nach der Inbetriebnahme des neu errichteten Kraftwerks wurde im Juli 2013 bei einer Echolotvermessung im Anschluss an ein Hochwasserereignis eine größere Verlandung aus Sand auf der Einlaufplatte des Krafthauses festgestellt (siehe Abb. 2). Regelmäßige Kontrollen der Einlaufplatte zeigten bis in das Jahr 2017 keine größeren Änderungen dieser Anlandung. Bei einer Vermessung nach dem Juli-Hochwasser 2021 (Juli-HW 2021) wurde wieder eine starke Zunahme der Verlandung deutlich. Während des Hochwasserereignisses reichte die Verlandung zeitweise bis in den Bereich des Kraftwerksrechens.

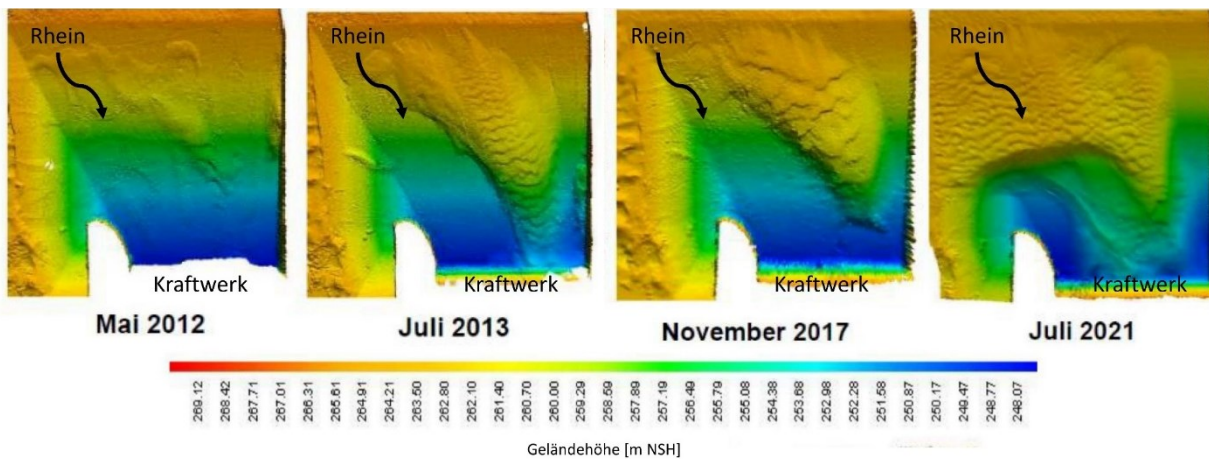


Abb. 2 Echolotvermessungen der Einlaufplatte zwischen dem Kraftwerksneubau und dem Juli-HW 2021 (IngenieurTeam Geo GmbH (2021), bearbeitet)

Vor diesem Hintergrund finden am Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kassel Untersuchungen zu den Ursachen und Auswirkungen der großflächigen Anlandung sowie zu potentiellen Verbesserungsmaßnahmen zur zukünftigen Reduzierung von Anlandungen auf der Einlaufplatte des Kraftwerks Rheinfelden statt. Dabei wird ein hybrider Untersuchungsansatz verfolgt, der den Einsatz von 2D- und 3D-HN-Modellen sowie eines gegenständlichen Modells vereint. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt zunächst auf der Nachbildung der Anlandung. Darauf aufbauend finden weiterführende Untersuchungen zur Analyse möglicher Verbesserungsmaßnahmen statt. Die besondere Herausforderung liegt dabei auf der möglichst guten Abbildung der komplexen morphodynamischen Prozesse, bei der die zur Verfügung stehenden

Modellverfahren an ihre Einsatzgrenzen stoßen. Wie häufig bei praktischen morphodynamischen Fragestellungen steht zudem nur ein begrenzter Umfang an Eingangsdaten zur Verfügung. Die Vorgabe sinnvoller Annahmen sowie der eng verzahnte Einsatz verschiedener Modellverfahren ist aus den zuvor genannten Gründen unerlässlich.

2 Methodik und Modelle

2.1 Untersuchungskonzept

Das grundlegende Untersuchungskonzept und die vorgesehene Modellverzahnung sind schematisch in Abb. 3 dargestellt. Die Untersuchungen finden in zwei Maßstäben statt. Einerseits wird das Untersuchungsgebiet mit einem 2D-HN-Modell und einem 3D-HN-Modell im Naturmaßstab nachgebildet. Gleichzeitig finden Untersuchungen an einem gegenständlichen Modell statt. Hierfür kommt ein nicht überhöhtes Froude-Modell im Maßstab 1:50 zum Einsatz. Zusätzlich wird das Labormodell in einem weiteren numerischen Modell mit dem gleichen 3D-HN-Verfahren wie der Naturmaßstab simuliert. Dieser Arbeitsschritt wird nicht direkt für das Projekt benötigt, sondern dient dem vertiefenden Verständnis und der Analyse des eingesetzten numerischen Verfahrens bezüglich der grundlegenden Fragestellung.

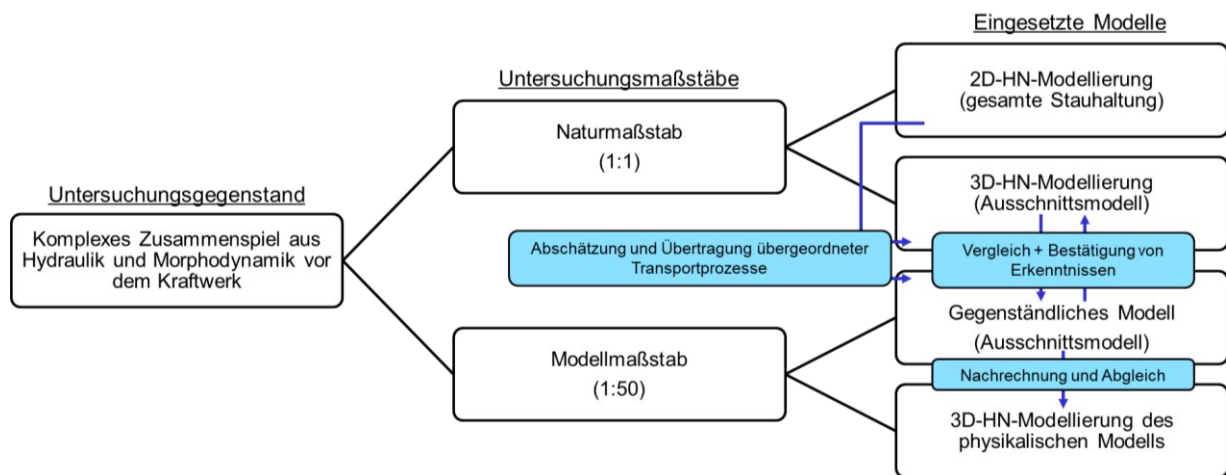


Abb. 3 Schematische Darstellung des Untersuchungskonzepts

Die großräumige 2D-HN-Modellierung erlaubt unter Einhaltung vertretbarer Rechenzeiten die Abschätzung der übergeordneten Transportprozesse im Untersuchungsgebiet. Dabei ist aufgrund der überschaubaren Rechenzeit die Abbildung der gesamten Stauhaltung sowie eine breitgestreute Sensitivitätsanalyse hinsichtlich verschiedener Parameter möglich. Die zur Verteilung des Geschiebetransports an Referenzquerschnitten gewonnenen Erkenntnisse werden dann auf das Labormodell und das naturmaßstäbliche 3D-HN-Modell übertragen. Dank dieser Vorgehensweise ist es möglich, diese beiden Modelle räumlich auf die Stauanlage und einen angrenzenden Oberwasserabschnitt von einigen 100 m zu begrenzen. Erst dadurch resultieren für das gegenständliche Modell realisierbare Flächenabmessungen und für das rechenaufwendige 3D-HN-Modell mit gekoppelter Sedimenttransportmodellierung praktikable Rechenzeiten bei ausreichend feiner Diskretisierung. Die 2D-HN-Modellierung lässt aufgrund der verfahrensbedingten Tiefenmittelung der Hydraulik keine verlässlichen Aussagen bezüglich der morphodynamischen Prozesse in Bauwerksnähe und somit bezüglich der Anlandung auf der Einlaufplatte zu. Hierfür ist wiederum der Einsatz des Labormodells und des naturmaßstäblichen 3D-HN-Modells unerlässlich, deren Ergebnisse durch einen Vergleich untereinander zusätzlich plausibilisiert werden. Der kombinierte Einsatz der Verfahren ermöglicht es, die Stärken der jeweiligen Modellansätze zu bündeln und gleichzeitig verfahrensbedingte Einschränkungen auszugleichen. Tab. 1 gibt einen

Überblick über die wesentlichen Untersuchungsanforderungen und die jeweilige Eignung der eingesetzten Modellverfahren.

Tab. 1 Untersuchungsanforderungen und Eignung der jeweiligen Modellverfahren

Anforderung	2D-HN-Modell	3D-HN-Modell	Labormodell
Nachbildung der großräumigen Stauhaltung (→ übergeordnete morphodynamische Prozesse)	+	- (Rechenzeit)	- (Maßstab)
Nachbildung der bauwerksnahen Morphodynamik (→ Verhalten der Anlandung auf Einlaufplatte)	- (Tiefenmittelung)	+	+
Nachbildung instationärer Hydraulik (→ HW-Ganglinien, Abflussumlagerungen etc.)	+	(+)	-

2.2 2D-HN-Modell

Für die hydraulische und morphodynamische 2D-Modellierung der Stauhaltung kommt die nicht kommerzielle Software BASEMENT zum Einsatz. Der implementierte Solver BASEplane löst die 2D-Flachwassergleichungen mittels Finite-Volumen-Methode. (Vetsch et al., 2022) Hierfür wird die untersuchte Stauhaltung durch ein unstrukturiertes Dreiecksgitter anhand von mehr als 90.000 Berechnungsknoten diskretisiert. Das Modell wurde mithilfe verschiedener Wasserspiegelfixierungen unter Vorgabe geeigneter Stricklerbeiwerte kalibriert.

Für die Modellierung des Geschiebetransports stehen in BASEMENT verschiedene empirische Transportansätze zur Verfügung. Hierzu zählen die Ansätze nach Meyer-Peter und Müller, Engelund-Hansen und Van Rijn, mit denen anhand der vorgegebenen Korneigenschaften sowie der berechneten Strömungsparameter der Transport entlang der Hauptströmungsrichtung ermittelt wird. In Ergänzung hierzu stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung, die einer Korrektur der Transportrichtung aufgrund von Einflussfaktoren wie lokalen lateralen Sohlgefällen oder topographiebedingten Krümmungseffekten dienen. (Vetsch et al., 2022)

Das 2D-HN-Modell wird im Zuge stationärer und instationärer Simulationen für die Abschätzung der übergeordneten morphodynamischen Prozesse innerhalb des Untersuchungsgebiets eingesetzt. Da wiederholte Vermessungen der Stauhaltung nahezu keine Veränderungen der Sohle außerhalb der Einlaufplatte gezeigt haben, wird für die Sedimentmodellierung eine feste Modellsohle vorgegeben. Das transportierte Material wird am oberen Ende der Stauhaltung in das Modell eingetragen. Zu den ausgewerteten Parametern zählt der mittlere breitenspezifische Geschiebetransport, über den einerseits übergeordnete Transportwege innerhalb der Stauhaltung identifiziert und andererseits die Verteilung des Geschiebetransports im Gewässerquerschnitt abgeschätzt werden können. Die Aussagekraft der Ergebnisse wurde im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse für verschiedene Transportansätze, Korneigenschaften und hydraulische Randbedingungen geprüft. Die Erkenntnisse hinsichtlich der Transportmenge und -verteilung werden in Referenzquerschnitten als Eingangsgröße sowohl auf das Labormodell als auch auf das naturmaßstäbliche 3D-HN-Modell übertragen.

2.3 3D-HN-Modelle

Die dreidimensionale Modellierung des Untersuchungsgebiets wird mit der kommerziellen Software FLOW-3D des Herstellers Flow Science (2019) durchgeführt. Die verwendete Software ist in der wasserbaulichen Forschung weit verbreitet und hat sich bei der Modellierung verschiedenster hydraulischer Fragestellungen (z.B. Kostić und Theobald 2021a, Chauhan et al. 2022,

Kammerer et al. 2021) bewährt. Auch im Bereich der Morphodynamik findet FLOW-3D zunehmend Anwendung (z.B. Kostić und Theobald 2021b, Samma et al. 2020, Fox 2019). Für die Modellierung des Sedimenttransports stehen mit den Formeln nach Meyer-Peter und Müller, Nielsen und Van Rijn drei empirische Transportansätze zur Verfügung.

Sowohl das 3D-HN-Modell im Naturmaßstab als auch das 3D-HN-Modell des Labormodells dienen der Untersuchung der hydraulischen und morphodynamischen Prozesse im Nahbereich der Stauanlage. Aufgrund der stark dreidimensionalen Strömungseffekte in diesem Bereich ist der Einsatz eines dreidimensionalen Modellansatzes unbedingt notwendig. Für die Modellierung mit FLOW-3D wird das Untersuchungsgebiet mithilfe eines strukturierten Rechteckgitters diskretisiert. Hierbei spielt eine geeignete Diskretisierung für die belastbare Modellierung eine entscheidende Rolle. Eine Verfeinerung der Diskretisierung führt zu präziseren Ergebnissen. Gleichzeitig steigt aufgrund der exponentiell zunehmenden Anzahl an Rechenzellen sowie der Abnahme des Rechenzeitschritts die Rechenzeit deutlich an. Um für die vorliegenden Untersuchungen einen geeigneten Kompromiss aus Rechenzeit und Netzauflösung zu ermöglichen, wurde bei der 3D-HN-Modellierung deshalb je eine Modellgruppe bestehend aus einem grob diskretisierten Gesamtmodell (GM) und zwei zunehmend feiner diskretisierten und gleichzeitig kleinräumigeren Detailmodellen 1 (DM1) und 2 (DM2) verwendet (siehe Abb. 4).

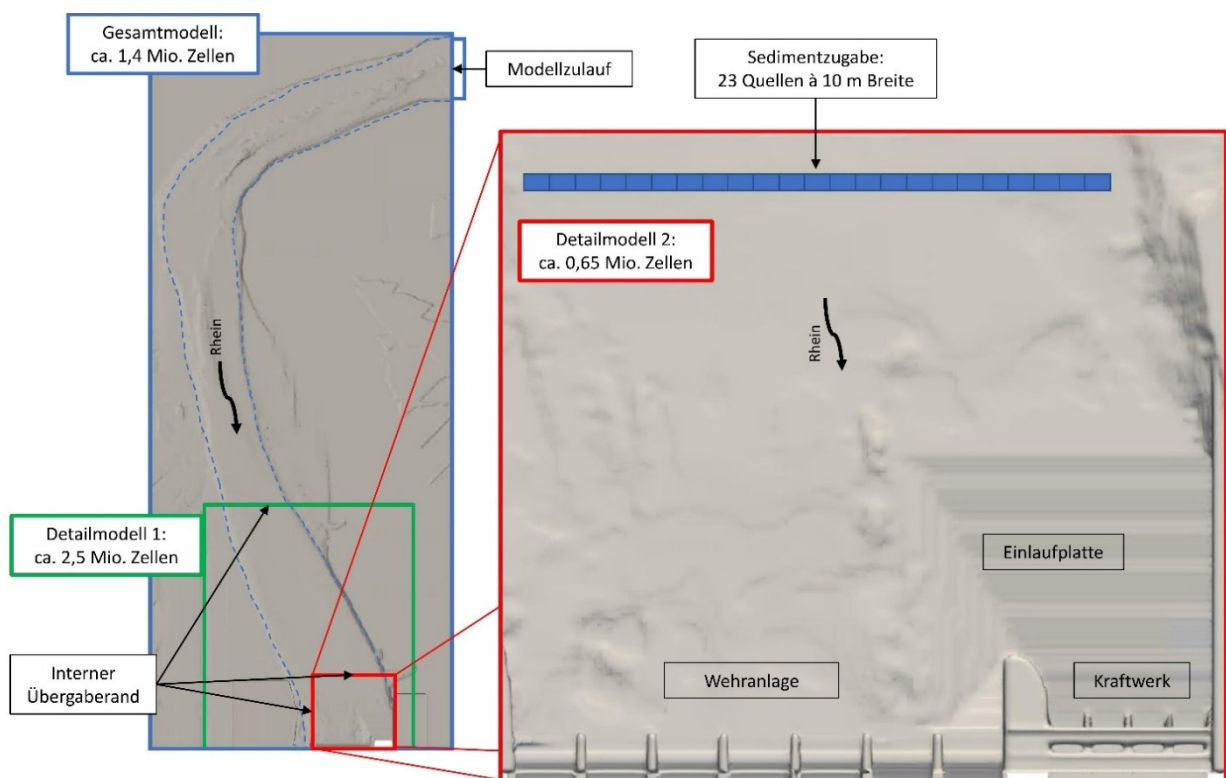


Abb. 4 Modellgruppe für die 3D-HN-Modellierung des Untersuchungsgebiets

Für jedes Modell einer Modellgruppe findet eine eigenständige Berechnung statt. Die Anströmung der Detailmodelle wird mit den jeweils übergeordneten, großräumigeren Modellen ermittelt und an den Modellgrenzen (interne Übergaberänder) in Form von Wassertiefen und Geschwindigkeiten übergeben. Die beiden gröber diskretisierten Modelle (GM und DM1) dienen somit ausschließlich der Ermittlung möglichst realistischer Anströmungsbedingungen an der oberen Modellgrenze sowie Anfangsbedingungen für das DM2. Die eigentliche Sedimentmodellierung findet ausschließlich im kleinräumigen DM2 statt und startet mit einer festen Sohle und geräumter

Einlaufplatte. Die Sedimentzugabe orientiert sich hinsichtlich transportierter Menge und Verteilung an den Ergebnissen der 2D-HN-Modellierung. Für eine möglichst präzise Nachbildung der morphodynamischen Prozesse wurde das Berechnungsgitter im sohlennahen Bereich von DM2 durch zusätzliche Berechnungsebenen verfeinert. Die Eignung des Modells zur Nachbildung der Anlandung auf der Einlaufplatte und die dafür notwendigen Einstellungen werden anhand eines Vergleichs mit einem Naturereignis ermittelt.

2.4 Gegenständliches Modell

Parallel zur 3D-HN-Modellierung kommt ein nicht überhöhtes Froude-Modell im Maßstab 1:50 zum Einsatz. Das Modell mit einer Länge von rund 18 m und einer Breite von rund 10 m umfasst die Stauanlage sowie einen etwa 450 m langen Abschnitt des Oberwassers. Die Teilkomponenten von Krafthaus und Wehranlage sind mittels 3D-Druck-Elementen detailgetreu nachgebildet. Der Gewässerlauf wurde aus lageorientierten Querprofilen entsprechend der Natursohle als feste Modellsohle modelliert, die Einlaufplatte wurde wie in den numerischen Modellen ohne Anlandungskörper abgebildet. Mit dem Modell können Abflussereignisse bis zu einem HQ_{40} ($Q_{\text{Natur}} \approx 4000 \text{ m}^3/\text{s}$) nachgefahren werden. Die Beaufschlagung der Stauanlage kann je Wehrfeld und Turbine variiert werden. Ein Überblick über das Modell gibt Abb. 5.

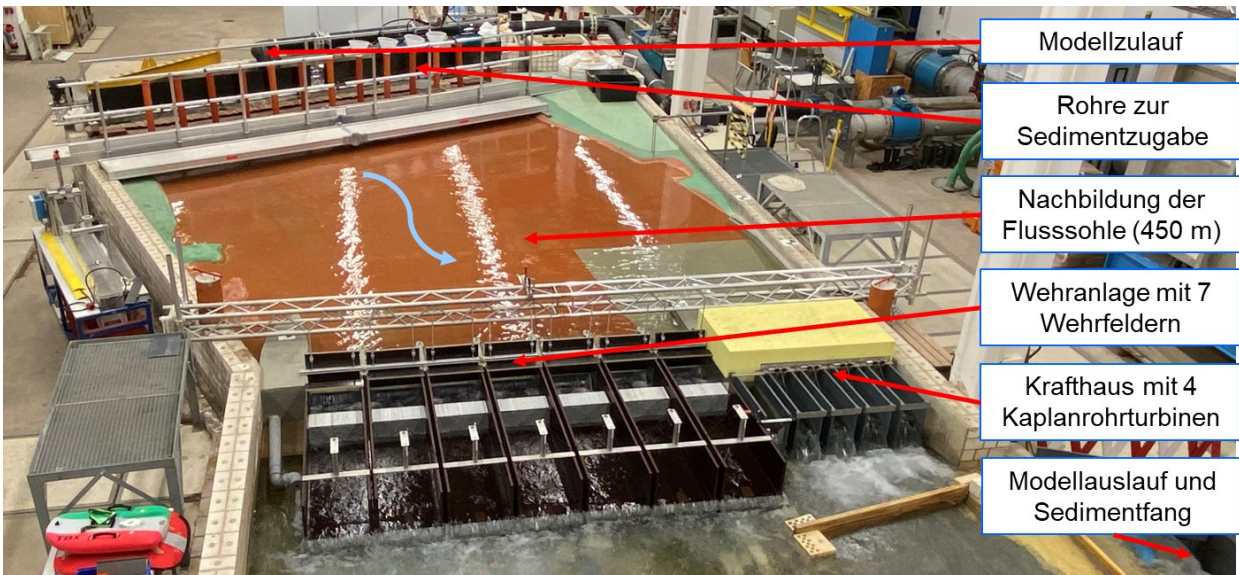


Abb. 5 Gesamtansicht des gegenständlichen Modells (Blick vom unteren Modellrand)

Zur Erfassung der Strömungsverhältnisse sowie der morphodynamischen Prozesse verfügt das gegenständliche Modell über eine umfangreiche messtechnische Ausstattung. Hierzu zählen neun Ultraschallabstandssensoren (UAS) zur Erfassung der Wasserstände, ein magnetisch-induktives Durchflussmessgerät (MID), eine Akustik-Doppler Sonde (ADV) zur Erfassung von Fließgeschwindigkeiten sowie ein etwa 5 m über dem Modell montierter Laserscanner zur Vermessung der Modellsohle, wobei eine Vermessung sowohl im trockenen Zustand als auch im laufenden Modellbetrieb möglich ist. Die Entwicklung der Modellsohle wird zusätzlich in kurzen zeitlichen Abständen mithilfe einer neben dem Scanner installierten Kamera erfasst.

Die Eigenschaften des Natursediments wurden anhand von zehn Proben aus der Anlandung nach dem Juli-HW 2021 bestimmt. Alle Proben zeigen eine sehr ähnliche Sieblinie im Bereich von Mittelsand mit einem mittleren Korndurchmesser von $d_m \approx 0,3 \text{ mm}$. Die Verwendung eines maßstäblich skalierten Naturmaterials ist für die Laborversuche aufgrund des feinen Ausgangsmaterials somit nicht möglich. Im Modell wird die Anlandung auf der Einlaufplatte daher mittels

Kunststoffgranulat nachgebildet. Hierfür wurde die Eignung verschiedener Granulate untersucht. Neben den Korneigenschaften lag der Fokus dabei auf der Nachbildung der Anlandung des Juli-HW 2021. Für die Untersuchungen wurde ein Polystyrol-Granulat mit einem mittleren Korndurchmesser von $d_m \approx 2,1 \text{ mm}$ und einer Dichte von $\rho_K \approx 1055 \text{ kg/m}^3$ gewählt.

3 Ergebnisse

3.1 Abschätzung der großräumigen Transportprozesse mittels 2D-HN-Modell

Für die Untersuchung der großräumigen Transportprozesse in der Stauhaltung kommt das in Abschnitt 2.2 erläuterte 2D-HN-Modell zum Einsatz. Aus den Ergebnissen werden die Verteilung des Geschiebetransports über den Gewässerquerschnitt sowie die transportierte Menge an Sediment als Eingangsdaten für das 3D-HN-Modell und das Labormodell abgeschätzt. Abb. 6 zeigt im linken Teilbild den breitenspezifischen Geschiebetransport in der Stauhaltung mittels Farbskala als Momentaufnahme während der Hochwasserspitze aus der instationären 2D-HN-Simulation des Juli-HW 2021 (Engelund-Hansen, $d_m = 0,3 \text{ mm}$, $t = 5 \text{ d}$). Es wird deutlich, dass der Transport größtenteils in der Schweizer Flusshälfte stattfindet. Im rechten Teilbild ist der über den Simulationszeitraum gemittelte breitenspezifische Transport am eingezeichneten Referenzquerschnitt für verschiedene Untersuchungsszenarien graphisch abgetragen. Unabhängig vom untersuchten Szenario findet der Hauptteil des Geschiebetransports in einem 30 bis 40 Prozent der Gewässerbreite umfassenden Abschnitt zwischen 50 m und 175 m vom Schweizer Ufer entfernt statt. Die Gegenüberstellung der zehnfach überhöhten Darstellung für den Ausbaudurchfluss mit den Graphen für die verschiedenen Hochwasserereignisse zeigt, dass auch die Verteilung des Transports über die Gewässerbreite zwischen den verschiedenen Szenarien nur wenig variiert. Diese grundsätzlichen Aussagen wurden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse unter Variation der in Tab. 2 aufgeführten Parameter geprüft und bestätigt.

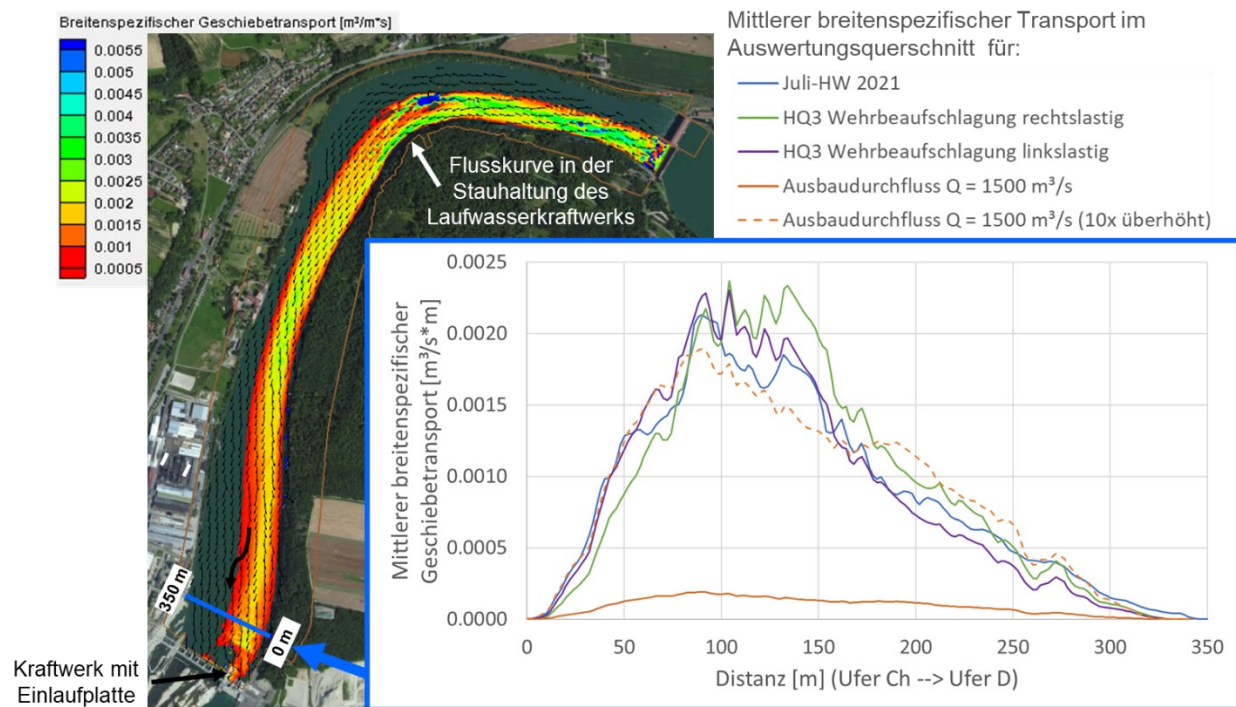


Abb. 6 Simulierter Geschiebetransport in der Stauhaltung (Luftbild: Esri World Imagery)
Links: Momentaufnahme aus der Simulation des Juli-HW 2021
Rechts: Mittlerer Transport im Referenzquerschnitt für verschiedene Abflusszenarien

Tab. 2 Variierte Parameter bei der Sensitivitätsanalyse für das 2D-HN-Modell

Parameter	Szenarien
1. Sedimentzugabeort	linke Flusshälfte, rechte Flusshälfte, gesamte Flussbreite
2. Beaufschlagung der Stauanlage	Wehrbeaufschlagung links- und rechtslastig sowie ausgeglichen, Kraftwerk voll- und teilgeöffnet
3. Mittlere Korngröße d_m	$d_m = 0,3 \text{ mm} - 2 \text{ mm}$
4. Rheinabfluss	$Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ (Ausbaudurchfluss) – $Q = 3500 \text{ m}^3/\text{s}$ (HQ10)
5. Transportansatz	Meyer-Peter und Müller, Engelund-Hansen

Anders als die Verteilung des Transports über den Gewässerquerschnitt ändert sich die transportierte Sedimentmenge in Abhängigkeit des gewählten Transportansatzes teils deutlich. Für die weiterführenden Untersuchungen im Labormodell und im 3D-HN-Modell wird die zugegebene Sedimentmenge daher in Vergleichsuntersuchungen in einem gewissen Spektrum (z.B. $\pm 30 \%$) variiert. In beiden Fällen wird zunächst eine Sedimentmenge im oberen Bereich des mit dem 2D-HN-Modell ermittelten Spektrums angesetzt, um so die Simulationszeiten und Versuchszeiten möglichst kurz zu halten.

3.2 Hybride Nachbildung eines ausgewählten Naturzustandes

Um die jeweils notwendigen Einstellungen und Vorgaben für die beiden Ausschnittsmodelle (Labormodell: z.B. Modellgranulat, 3D-HN-Modell: z.B. Berechnungsnetz, Transportansatz und zugehörige Parameter) zu definieren, wird zunächst ein ausgewählter Naturzustand nachgebildet. Hierfür wurde das gut dokumentierte Juli-HW 2021 gewählt, für das Aufzeichnungen über die Hydraulik sowie die Form und Beschaffenheit der Ablagerung auf der Einlaufplatte vorliegen. Da die Nachbildung einer instationären HW-Ganglinie insbesondere im Labormodell nicht praktikabel ist, wurde die Hydraulik des Hochwassers hinsichtlich Gesamtabfluss und Durchfluss je Bauwerkskomponente in stationäre Abflüsse überführt. Die Sedimentzugabe orientiert sich in Menge und Verteilung an den Ergebnissen der zugehörigen 2D-HN-Modellierung.

Die mit den Modellen erzeugten Anlandungen im Bereich der Einlaufplatte sind in Abb. 7 der zugehörigen Echolotvermessung in einer einheitlichen Farbskala gegenübergestellt. Die Anlandung aus dem Labormodell wurde zu diesem Zweck mit dem Laserscanner erfasst und auf den Naturmaßstab skaliert. Für das Labormodell kam das bereits unter 2.4 beschriebene Polystyrol-Granulat zum Einsatz. Die dargestellte Anlandung im 3D-HN-Modell resultiert für den Transportansatz nach Nielsen zusammen mit dem RNG-Turbulenzmodell nach einem Simulationszeitraum von fünf Tagen. Es wird deutlich, dass beide Modelle mit den genannten Einstellungen in der Lage sind, die in der Natur aufgetretene Anlandung nachzubilden. Die drei abgebildeten Anlandungen stimmen in Lage, Form und Größe gut überein. In allen drei Teilabbildungen fallen gleichermaßen die folgenden drei markanten Merkmale auf:

1. Vor dem Trennpfeiler zwischen Kraftwerk und Wehr verbleibt ein großflächiger Bereich ohne Ablagerung.
2. Vor der linken Krafthaushälfte tritt eine Sedimentzunge auf, deren Ausläufer sich bis in den direkten Einlaufbereich der Turbinen erstreckt.
3. An der linken Ufermauer verbleibt ein rund 10 – 20 m breiter Streifen ohne Sedimentablagerung.

Auch das Ablagerungsvolumen stimmt für die Echolotvermessung mit rund 21.300 m³, die 3D-HN-Simulation mit rund 22.300 m³ und das Labormodell mit rund 22.200 m³ (skaliert) gut überein.

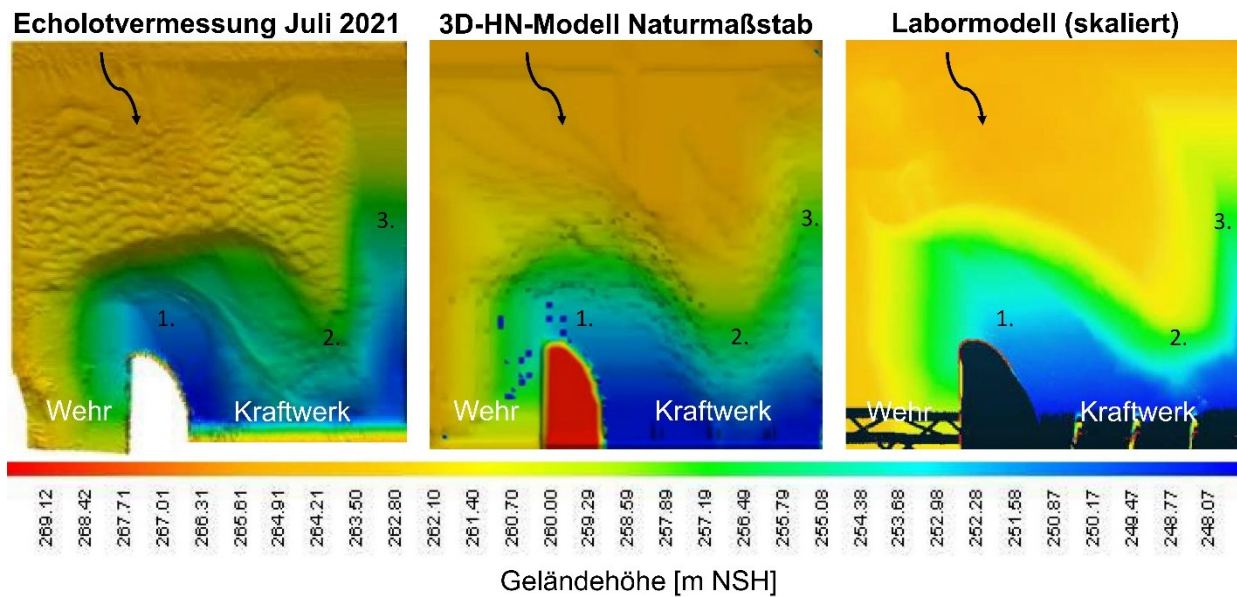


Abb. 7 Anlandung auf der Einlaufplatte des Kraftwerks (Echolotvermessung (links): Ingenieur-Team Geo GmbH (2021), bearbeitet)

4 Fazit und Ausblick

Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die methodische Vorgehensweise sowie erste Ergebnisse der hybriden Untersuchung von Verlandungsprozessen im Einlaufbereich des Laufwasserkraftwerks Rheinfelden. Die Komplexität der abzubildenden Prozesse macht einen eng verzahnten Einsatz verschiedener Modellverfahren unerlässlich.

Die Verteilung des Geschiebetransports über den Gewässerquerschnitt kann mittels 2D-HN-Modell plausibel abgeschätzt werden. Anders als die Verteilung ändert sich die Transportmenge in Abhängigkeit des gewählten Transportansatzes teils deutlich. Für die Menge an transportiertem Sediment ist daher nur eine Abschätzung möglich. Für die weiterführenden Untersuchungen wird deshalb zunächst eine Sedimentmenge im oberen Ergebnisspektrum angesetzt, um so kurze Versuchs- und Simulationszeiten zu ermöglichen.

Sowohl mit dem 3D-HN-Modell als auch mit dem Labormodell gelingt die Nachbildung der nach dem Juli-HW 2021 erfassten Sedimentation der Einlaufplatte sehr gut. Die Anlandungen stimmen in Lage, Form und Größe gut überein. Auch die zugehörigen Anlandungsvolumina weichen nur geringfügig voneinander ab.

Die bisherigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich die angewandte Methodik gut eignet, um übergeordnete Transportprozesse in der Stauhaltung abzuschätzen sowie Aussagen bezüglich der Anlandungslage, -form und -größe zu ermitteln. Aussagen bezüglich der Dauer der zugehörigen Prozesse sind aufgrund der Unsicherheiten hinsichtlich der Menge an transportiertem Sediment bisher jedoch nur begrenzt möglich.

Aktuell finden mit dem erarbeiteten Modellkonzept Untersuchungen zu potentiellen betrieblichen Maßnahmen zur Verbesserung der Anlandungssituation im Einlaufbereich des Kraftwerks statt, die zu einem späteren Zeitpunkt dargestellt werden.

Dank

Das in diesem Beitrag beschriebene Forschungsprojekt wird durch die Energiedienst Holding AG unterstützt und finanziert, wofür an dieser Stelle ausdrücklich gedankt sei. Unser besonderer Dank gilt zudem allen Beteiligten der Energiedienst Holding AG für die gute und konstruktive Zusammenarbeit. Die Verantwortung für die dargestellten Inhalte liegt bei den Autoren.

Literatur

Chauhan, V.; Chavan, R.; Singhal, G. D. (2022): Numerical Modeling for Optimization of the Aspect Ratio of Submerged Vanes for the Purpose of Sediment Deflection in Rivers. In: 9th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures (9th ISHS).

Energiedienst Holding AG (2011): Energie für die Zukunft. Das neue Wasserkraftwerk Rheinfelden. Verfügbar unter <https://www.energiedienst.de>. [03.04.2023].

Flow Science Inc. (Hrsg.) (2019): FLOW-3D v12.0 User Manual.

Fox, B. (2019): CFD Analysis of Local Scour at Bridge Piers.

Kammerer, S.; Vetsch, D.; Kriewitz, R. (2021): 3D Simulationen zur Fischdurchgängigkeit am Flusskraftwerk Bannwil. In: Boes, Robert (Hg.): Wasserbau-Symposium 2021. Wasserbau in Zeiten von Energiewende, Gewässerschutz und Klimawandel. Band 1. VAW Mitteilungen 262. Zürich: ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. S. 155 - 163.

Kostić, T.; Theobald, S. (2021a): 3-D-hydrodynamisch-numerische Analyse der Strömungsverhältnisse in Verzweigungsgerinnen. In: WasserWirtschaft 111, Heft 12, S. 36 - 42.

Kostić, T.; Theobald, S. (2021b): Simulation des Geschiebetransports in Verzweigungsgerinnen mit 3-D-Morphodynamik. In: WasserWirtschaft 111, Heft 12, S. 43 - 49.

Samma, H.; Khosrojerdi, A.; Rostam-Abadi, M.; Mehraein, M.; Cataño-Lopera, Y. (2020): Numerical simulation of scour and flow field over movable bed induced by a submerged wall jet. Journal of Hydroinformatics; 22 (2). S. 385 – 401.

Vetsch, D.; Siviglia, A.; Bürgler, M.; Caponi, F.; Ehrbar, D.; Facchini, M.; Faeh, R.; Farshi, D.; Gerber, M.; Gerke, E.; Kammerer, S.; Koch, A.; Mueller, R.; Peter, S.; Rousselot, P.; Vanzo, D.; Veprek, R.; Volz, C.; Vonwiller, L.; Weberndorfer, M. (2022): System Manuals of BASEMENT, Version 2.8.2. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW). ETH Zurich. Verfügbar unter <http://www.basement.ethz.ch>. [14.02.2023].

Anschrift der Verfasser

Fabian Popp, M. Sc.

Univ. Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald

Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Universität Kassel

Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel

f.popp@uni-kassel.de

s.theobald@uni-kassel.de