

HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

Journal of Applied Hydrography

10/2023

HN 126



BIM und
digitale Zwillinge



Der analoge Zwilling im digitalen Zeitalter

Gegenständliche Modellierung im wasserbaulichen Versuchswesen

Ein Artikel von JENNIFER PFROMMER und UDO PFROMMER

Das gegenständliche Modell trägt im Wasserbau seit Beginn des 20. Jahrhunderts zur Beantwortung komplexer hydraulischer und morphologischer Fragestellungen bei. Die stetig voranschreitende Entwicklung von Modellbau, Messmethoden und Messtechnik erhöht nicht nur die Qualität und Quantität der Daten, sondern verbessert auch das Prozessverständnis. Welche Maßnahmen getroffen werden müssen, um eine Modellähnlichkeit zu gewährleisten, wird hier am Beispiel des Modells der Wehranlage Wieblingen gezeigt. Trotz der Leistungsfähigkeit numerischer Modelle wird das wasserbauliche Versuchswesen auch in Zukunft seinen Beitrag zur Beantwortung hydraulischer, morphologischer und auch ökologischer Fragestellungen leisten.

gegenständliches Modell | wasserbauliches Versuchswesen | Modellähnlichkeit | Hydraulik | Messtechnik
physical model | hydraulic modeling | model similarity | hydraulics, measurement technology

Since the beginning of the 20th century the physical model has been contributing to the answering of complex hydraulic and morphological questions in water engineering. The ongoing development of model building, measurement methods and measurement technology not only increases the quality and quantity of data, but also improves process understanding. The steps that must be taken to ensure model similarity are shown here using the example of the Wieblingen weir model. Despite the opportunities of numerical models, physical modeling will continue to play a role in the future in answering hydraulic, morphological and ecological questions.

Autoren

Jennifer Pfrommer und Udo Pfrommer arbeiten bei der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe.

jennifer.pfrommer@baw.de
udo.pfrommer@baw.de

Einführung

Der digitale Zwilling hat sich zu einem wichtigen Bestandteil der BIM-Planungsmethode entwickelt. Mit einem digitalen Zwilling können sich Planende ein immaterielles Abbild von realen Objekten erstellen und in dieser virtuellen Umgebung Fragestellungen rund um das Objekt bearbeiten. Diese Arbeitsmethode wird zunehmend auch im Verkehrswasserbau eingesetzt. Darüber hinaus werden für hydraulische und morphologische Fragestellungen bei wasserbaulichen Objekten, sei es ein Gewässerbett, eine Wehranlage oder eine Schleuse, zur Strömungssimulation schon seit längerem digitale Abbilder verwendet, ohne dies »digitaler Zwilling« zu nennen. Von diesen digitalen Abbildern gibt es heute mitunter analoge Zwillinge, sogenannte gegenständliche Modelle. Bei gegenständlichen Modellen handelt es sich um maßstabsgetreue Abbildungen, die sowohl den geometrischen als auch den dynamischen Gegebenheiten folgen. Kurz gesagt: Ein analoger Zwilling auf Basis digitaler Daten.

Gegenständliche Modelle haben im wasserbaulichen Versuchswesen eine über hundertjährige

Tradition und wurden schon lange vor dem digitalen Zeitalter eingesetzt. Im Jahr 1898 wurde an der Technischen Hochschule Dresden das weltweit erste ständige Wasserbaulaboratorium für experimentelle Untersuchungen an gegenständlichen Modellen eingerichtet. 1903 folgte die erste staatliche wasserbauliche Versuchseinrichtung Deutschlands, die Preußische Versuchsanstalt für Wasser-, Erd- und Schiffbau in Berlin (VWS). Diese trieb in Zusammenarbeit mit den Universitäten die Weiterentwicklung und theoretische Grundlagenforschung der damals noch sehr jungen Disziplin der experimentellen Untersuchungen wesentlich voran.

Das gegenständliche Modell war schon zu dieser Zeit sehr aufwendig herzustellen und zu betreiben. Es sollte die Natur und die maßgeblichen physikalischen Prozesse so exakt wie möglich abbilden (Abb. 1) und es erlauben, die Strömungsgrößen anhand von Ähnlichkeitsgesetzen (Kobus 1978) in die Natur zu übertragen. Die verfügbaren Ausgangsdaten und die Möglichkeiten für den Aufbau der Modelle waren jedoch im Vergleich zu heute völlig andere. Die verwendete Messtech-

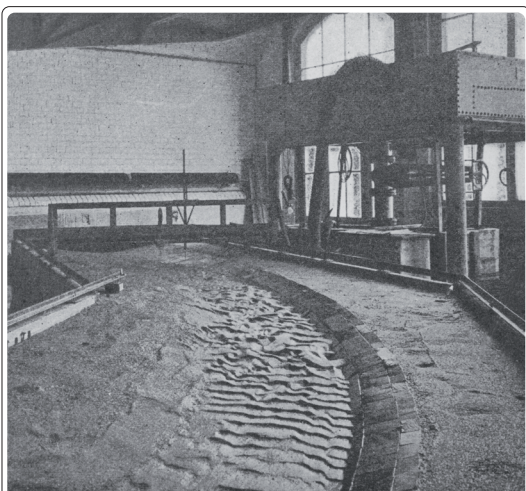


Abb. 1: Flussmodell mit beweglicher Sohle an der VWS aus dem Jahre 1914. Projekt unbekannt



Abb. 2: Modell des Eidersperrwerks mit beweglicher Sohle aus dem Jahre 1995. Hier wurde die Kolkbildung im Unterwasser des Sperrwerks untersucht

nik war noch analog und erforderte einen großen Personalaufwand. Die experimentelle Versuchstechnik verbesserte sich über die Jahre zwar stetig, aber erst Ende der 80er-Jahre, als der Computer fester Bestandteil der Arbeitswelt wurde, verbesserten sich die Möglichkeiten zur Datenerfassung entscheidend. So wurde der Betrieb komplexerer Modelle sowie die digitale automatisierte hochgenaue Erfassung von Messwerten im Modell möglich. Trotzdem wurde noch bis in die 90er-Jahre weitgehend mit analogen Hilfsmitteln gearbeitet. In [Abb. 2](#) ist im Vordergrund eine Sohle aus beweglichem Material mit Vertiefungen zu erkennen, die durch den Fließvorgang des kurz zuvor abgelassenen Wassers entstanden ist. Dahinter ist das Sperrwerk zu erkennen. Um die Konturen der Vertiefungen zu erfassen, wurden Wollfäden entlang der Höhenlinien gelegt. Anschließend wurde der Bereich von oben fotografiert und daraus wurden Höhenlinienpläne abgeleitet. So konnten die Auswirkungen auf das Gewässerbett durch bauliche Veränderungen am Sperrwerk bewertet werden. Heutzutage werden Sohlstrukturen mit einem 3D-stereoskopischen Messsystem vermessen ([Abb. 3](#)). Es entstehen hochaufgelöste digitale Geländemodelle, die selbst durch den Wasserkörper hindurch mit relativ geringem Personalaufwand aufgemessen werden können. Diese Entwicklung bis hin zum photogrammetrischen Messsystem ist nur eines von vielen Beispielen und zeigt, wie sich die Messtechnik im wasserbaulichen Versuchswesen im Laufe der Jahrzehnte weiterentwickelt hat.

Aber nicht nur die Messtechnik, sondern auch der Modellbau wurde stetig optimiert. So werden die gegenständlichen Modelle heute nicht mehr nur in der klassischen Querprofilbauweise ([Abb. 7](#)) hergestellt. Durch die Entwicklung der 3D-Druck- und CNC-Frästechnologie können heute komplexe Gewässergeometrien mit Hilfe digitaler Geländemodelle als 3D-Bauteile gefräst und zusammen-

gesetzt werden (Hentschel und Ettmer 2021). Das gegenständliche Modell wird dabei als 3D-Modell in einem CAD-System geplant und somit als digitaler Zwilling vorgehalten. Als Grundlage dienen unterschiedlichste digitale Datensätze, wie Flächenpeilungen der Flusssohle, 3D-Scans von Bauwerken, digitale Geländemodelle, Befliegungsdaten und immer häufiger auch Informationen aus den digitalen Zwillingen im BIM (z. B. beim Neubau einer Wehranlage). Auch hydraulische Informationen wie Überschwemmungsflächen, Strömungsgeschwindigkeiten, Wasserspiegelfixierungen und Pegeldata werden bereits beim Planen des Modells benötigt.

Der wichtigste Aspekt für die Planung eines Modells ist die zu beantwortende Fragestellung. So banal dies klingt, so wichtig ist es für die planenden Ingenieurinnen und Ingenieure zu wissen, welche Informationen sie später aus der Strömungssimulation gewinnen wollen. Meist entscheidet die Fragestellung schon darüber, ob die Simulation im gegenständlichen Modell, im numerischen Modell oder gar hybrid untersucht werden soll. Klassische Themen für den Bau gegenständlicher Modelle sind Fragen zur Bauwerkshydraulik, zur Morpholo-



Abb. 3: Flussmodell mit beweglicher Sohle (Abstraktion eines freifließenden mäandrierenden Flusses) aus dem Jahre 2023 mit projiziertem Raster zur 3D-photogrammetrischen Aufnahme

gie und auch zur Ökologie. Viele Fragestellungen können heute durch numerische Simulationen beantwortet werden, was oft schneller und auch kostengünstiger ist. Dennoch haben die gegenständlichen Modelle ihre Daseinsberechtigung nicht verloren, nur haben sich ihre Einsatzgebiete teilweise geändert. So leisten sie heute auch einen wertvollen Beitrag zur Weiterentwicklung der numerischen Modelle, beispielsweise indem sie zur Generierung von Daten für die Kalibrierung und Validierung numerischer Modelle verwendet werden.

Fällt die Wahl auf ein gegenständliches Modell, so ist der Platzbedarf und die vorhandene Infrastruktur entscheidend für die Konzeption. Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), die 1948 aus der VWS hervorgegangen ist, verfügt über drei Versuchshallen und zwei Pumpenhäuser für die Wasserversorgung der gegenständlichen Modelle. Die BAW ist der technisch-wissenschaftliche Dienstleister für das Bundesministerium für Digitales und Verkehr und für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes in allen verkehrswasserbaulichen Fragestellungen, die sich beim Bau, Betrieb und der Unterhaltung der Bundeswasserstraßen ergeben, und ist daher mitunter seit über 75 Jahren mit dem Bau von gegenständlichen Modellen vertraut. Mit einer Laborfläche von ca. 11400 m² verfügt sie über eines der größten Wasserbaulabore der Welt. Dies ermöglicht auch den Aufbau vergleichsweise großskaliger Flächenmodelle, wie z. B. das der Wehranlage Wieblingen am Neckar (Abb. 4), an dem im Folgenden beispielhaft der detaillierte Modellaufbau und der Betrieb gezeigt werden soll.

Das Modell Wieblingen

Die Wehranlage Wieblingen ist Bestandteil der Stauhaltung Schwabenheim/Wieblingen-Heidel-

berg, wurde zwischen 1922 bis 1925 erstellt und in den Jahren 2006 bis 2010 teilsaniert. Da die Restlebensdauer jedoch begrenzt ist, wurden verschiedene Neubauvarianten untersucht. Eine im Jahr 2012 durch das Amt für Neckar ausbau Heidelberg erstellte Machbarkeitsstudie ergab als wirtschaftlichste Variante einen Ersatzneubau etwa 20 m oberhalb des bestehenden Wehres. Zur Beantwortung der hydraulischen Fragestellungen im Hinblick auf Hochwasserabfuhr, Energieumwandlung, Schifffahrtsverhältnisse und der Wasserspiegellagen in der Altstadt von Heidelberg während der Bauphasen und für den Ersatzneubau wurde auf die bewährte Methode eines gegenständlichen Modells zurückgegriffen. Aufgrund der Fragestellung war klar, dass der Geschiebetransport keine Rolle spielt und daher eine feste Sohle im Modell ausreicht. Das Labormodell wurde gewählt, da es eine besonders gute Zugänglichkeit für die Öffentlichkeit bietet und zudem genutzt werden sollte um Daten für den parallelen Aufbau eines numerischen Modells zu gewinnen.

Modelldimensionierung und Aufbau

Die Größe des gegenständlichen Modells wird durch die Laborkapazität und die Anforderungen aus den Ähnlichkeitsbedingungen bestimmt. Um die Naturdaten auf das Modell und die Modellergebnisse auf die Natur übertragen zu können, müssen bestimmte Modellgesetze und -grenzen eingehalten werden (Kobus 1978). Das Froude'sche Modellgesetz, bei dem das Verhältnis von Schwerkraft zu Trägheitskraft in der Natur und im Modell gleich ist, wird für Modelle mit freier Wasseroberfläche verwendet. Nur so kann eine geometrisch ähnliche Nachbildung des Wasserspiegels erreicht werden. Zudem muss der Einfluss der zähen Reibung gegenüber dem Einfluss der Schwere vernachlässigbar klein sein. Dies kann dann eingehalten werden, wenn die Strömung sowohl in der Natur als auch im Modell im hydraulisch rauen Bereich liegt. Eine weitere Modellgrenze ist der Einfluss der Oberflächenspannung. Während in der Natur bei wasserbaulichen Fragestellungen der Einfluss der Oberflächenspannung vernachlässigt werden kann, ist dies im verkleinerten Modell nicht unbedingt der Fall. Eine Mindestwassertiefe von mehr als 3 cm im Modell ist erforderlich, damit Fehler aus dem Oberflächenspannungseinfluss vernachlässigbar sind. Der für die Wehranlage Wieblingen gewählte Modellmaßstab von 1:30 ermöglicht Untersuchungen bis zu einem 20-jährlichen Hochwasserereignis im Nahbereich der Wehranlage. Größere Hochwasserabflüsse sowie Fernfelduntersuchungen werden mit dem numerischen Modell abgebildet. Für die Planung des gegenständlichen Modells ist es notwendig, über eine fundierte Datenbasis zu verfügen. Im Fall der Wehranlage Wieblingen konnten die Bau-



Abb. 4: Das gegenständliche Modell der Wehranlage Wieblingen im Maßstab 1:30. Blick vom Oberwasser auf die Wehranlage. Das Modell hat eine Gesamtlänge von ca. 70 m und eine Breite von ca. 10 m

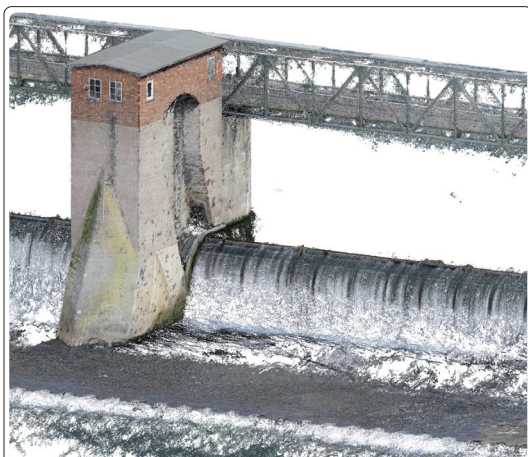


Abb. 5: Teil des 3D-Scans der Wehranlage Wieblingen (Pfeiler und überströmter Wehrverschluss)

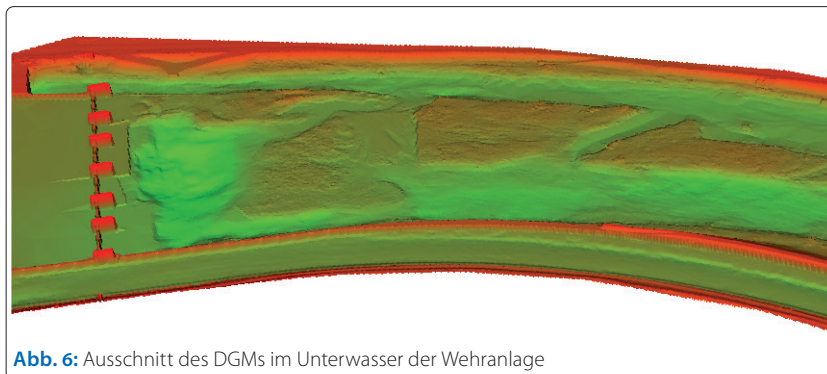


Abb. 6: Ausschnitt des DGMs im Unterwasser der Wehranlage

werke (Wehrverschlüsse, Pfeiler etc.) anhand von Bauwerksplänen sowie einem aktuellen 3D-Scan der Gesamtanlage (Abb. 5) in ein digitales 3D-Bild überführt werden. Die Vermessung des Fließgewässers erfolgte durch Querprofile in 5-m-Abständen. Dabei wurden die Befliegungsdaten sowie die Daten des Peilschiffs in einem digitalen Geländemodell (DGM) zusammengeführt (Abb. 6).

Im Nahbereich der Wehranlage Wieblingen lässt sich die Sohle in mehrere Abschnitte unterteilen: Im Oberwasser zeigt sich ein nahezu ebener Sohlverlauf, wohingegen im Unterwasser mehrere Inselgruppen die Sohlstruktur dominieren. Für die Herstellung der Modellsohle wurden Querprofile als 2D-Datensatz aus dem DGM extrahiert und für die Fertigung zur Verfügung gestellt. Der Einbau der wasserstrahlgeschnittenen Stahlprofile erfolgte auf vorgefertigten Blöcken mit präzisiertem Höhenbezug (Abb. 7). In Abb. 6 ist hinter der Wehranlage (hellgrüner Bereich) ein ausgedehnter Kolk zu erkennen, der in der Natur eine Tiefe von etwa 9 m aufweist. Um die komplexe Struktur des Kolkes geometrisch exakt abzubilden, wurde der Bereich in acht Teile von 1000 mm × 1000 mm großen Blöcken unterteilt. Mit Hilfe des 3D-Datensatzes wurden die Blöcke mit einer Kombination aus CNC-Fräs- und Betongussverfahren hergestellt

und über Stellfüße im Modell auf die vorgesehene Höhe eingebaut (Abb. 8). Für die Bauwerksteile, wie z. B. die Wehrpfeiler, wurden 3D-Datensätze aus den Bauwerksplänen und dem 3D-Scan konstruiert und für den CNC-Fräsprozess zur Verfügung gestellt (Abb. 9).

Für die Mess- und Steuerungstechnik des Modells wurden drei induktive Durchflussmesser und Plattenschieber (DN 100, 2 × DN 300) für die Abflussregelung, zwei regelbare Wehrklappen für den Neckar-Altarm und den Seitenkanal sowie 18 Wasserspiegelmessstellen, an denen der Wasserstand anhand von Ultraschall-Pegeln gemessen werden kann, eingesetzt. Eine eigens dafür programmierte Software ermöglicht es, den Modellbetrieb über einen Messrechner zu steuern und zeitgleich Modelldaten zu erfassen. Des Weiteren wurden mit Hilfe eines 2D-PTV-Verfahrens (2D



Abb. 8: Aufbau des gegenständlichen Modells Wieblingen: Einbau der Betongussblöcke im Bereich des Kolkes



Abb. 7: Aufbau des gegenständlichen Modells Wieblingen: Profilierung des Unterwassers mit Hilfe von Querprofilen



Abb. 9: Aufbau eines Modellpfeilers im gegenständlichen Modell Wieblingen

Particle Tracking Velocimetry) die Oberflächen-geschwindigkeiten vor und hinter der Wehranlage erfasst und digitalisiert.

Geometrische Ähnlichkeit im Modell Wieblingen

Nach Fertigstellung des gegenständlichen Modells wurde ein Laserscan durchgeführt, um die geometrischen Modelldaten mit den Naturdaten zu vergleichen. Dabei wurde festgestellt, dass im Bereich der Bauwerke und entlang der Böschungen große Höhendifferenzen auftreten (Abb. 10, blaue/rote Punkte). Eine Abweichung der Vertikalflächen um Bruchteile von Millimetern in der Lage führt zu großen Höhenabweichungen gegenüber den Naturdaten. Aber auch im Bereich der Inseln zeigt die Differenzendarstellung teilweise Abweichungen im Zentimeterbereich. In diesem Bereich sind im DGM engmaschige Höhenänderungen vorhanden. Eine minimale Lageverschiebung im Modell, hervorgerufen durch die vereinfachte Modellierung mit Querprofilen, führte auch hier zu größeren Abweichungen. Kritische Vertikalverschiebungen wurden im Anschluss nochmals mit einem Tachymeter überprüft und teilweise korrigiert. Die mehrheitlich grünen Punkte zeigen eine gute Übereinstimmung des gegenständlichen Modells mit den terrestrischen Daten aus der Natur. Im Ergebnis wird dem gegenständlichen Modell eine hohe geometrische Genauigkeit zugeschrieben.

Dynamische Ähnlichkeit im Modell Wieblingen

Die Kalibrierung des Modells erfolgte in mehreren Schritten. Zu Beginn wurden Wasserspiegelfixierungen aus Naturmessungen für unterschiedliche Hochwasserabflüsse mit Pegelmessungen im Modell verglichen. Hierzu wurde der bekannte Unterwasserstand eingestellt und die Wasserspiegellagen entlang des Streckenabschnittes gemessen. Diese ersten Versuche zeigten aber sehr große Wasserspiegeldifferenzen im Bereich der Unterwasserinseln. Zwar wurde die Sohle in diesem Bereich sehr detailliert nachgebildet – einen entscheidenden Einfluss auf die Hydraulik und damit



Abb. 11: Rauheitselemente im gegenständlichen Modell zur Abbildung der Vegetation im Unterwasser



Abb. 12: Rauheitselemente im gegenständlichen Modell zur Erhöhung des Wasserspiegelgefälles im Oberwasser

auf die Wasserspiegellage hat jedoch die Vegetation auf den Inseln, die je nach Hochwasserereignis durch- und überströmt wird. Diese Vegetation war im DGM aber nicht erfasst. Daher wurden unterschiedliche Rauheitselemente, wie z. B. Granitpflastersteine und Holzzylinder, in verschiedenen Besatzdichten aufgebracht. Das beste Ergebnis erzielten jedoch künstliche Bauelemente, welche aus einem 50 mm x 50 mm großen Steinwürfel bestehen und an deren Oberfläche künstliche Tannenzweige fixiert sind (Abb. 11). Durch die Bauelemente konnte der Fließwiderstand erhöht werden, und der Unterwasserstand zeigte eine gute Übereinstimmung mit den Naturdaten. Die Wasserstände oberhalb der Wehranlage wichen dagegen noch geringfügig von den Naturdaten ab. Zur Erhöhung des Wasserspiegelgefälles im Oberwasser wurden quer zur Fließrichtung 40 cm breite Riffelungen im Abstand von 40 cm eingebaut (Abb. 12). Abb. 13 zeigt die Bereiche im Modell, auf die Rauheitselemente aufgebracht wurden. Dieses Beispiel zeigt, dass die geometrische Ähnlichkeit hier zwar gegeben war, die dynamische Ähnlichkeit aber nicht. Aus diesem Grund war eine geometrische Anpassung des Modells mit Hilfe von Rauheitselementen erforderlich. Nach der erfolgreichen Kalibrierung und Validierung des Modells konnte mit den eigentlichen Modelluntersuchungen begonnen werden.

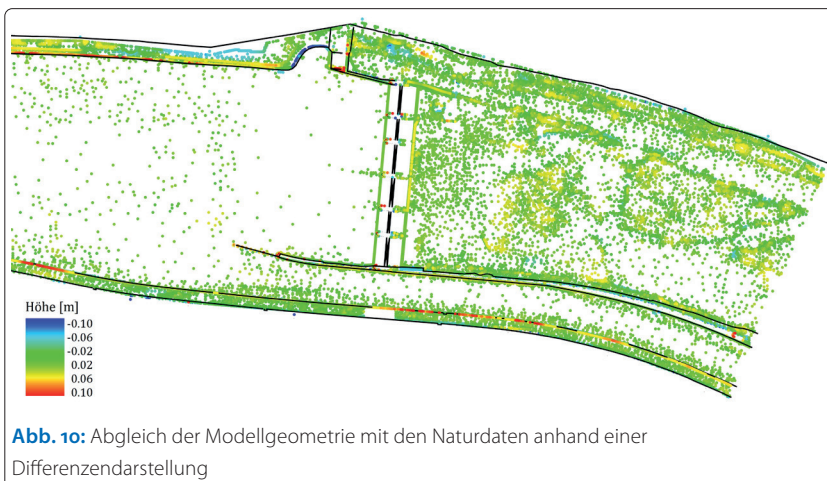


Abb. 10: Abgleich der Modellgeometrie mit den Naturdaten anhand einer Differenzendarstellung

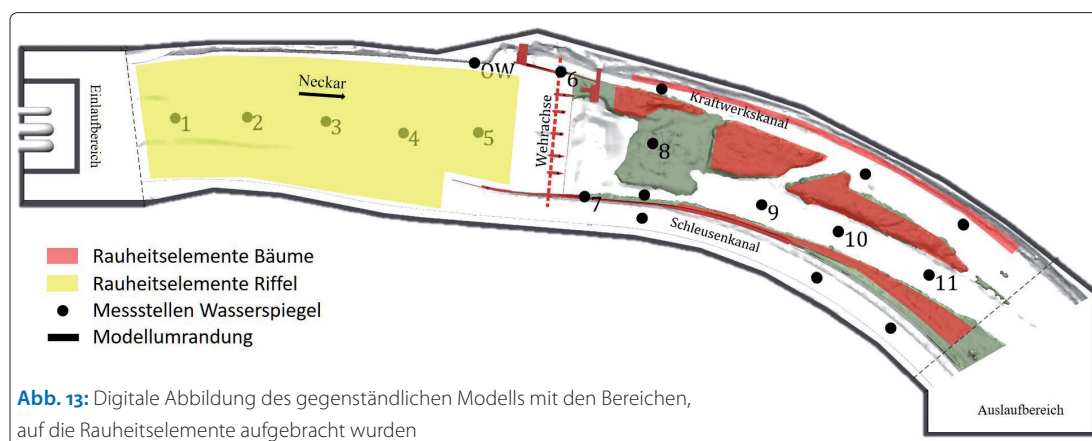


Abb. 13: Digitale Abbildung des gegenständlichen Modells mit den Bereichen, auf die Rauheitsselemente aufgebracht wurden

Die Kalibrierung des Modells setzt eine fundierte Kenntnis über das Landschaftsbild und die hydraulischen Prozesse vor Ort voraus. Eine umfassende Basis an Messdaten ist zwar in den meisten Fällen gegeben, jedoch häufig zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen und aufbereitet worden. Erste Abschätzungen zum Rauheitswiderstand können aus Vegetationsparametern getroffen werden, welche sich anhand von Vegetationsklassen (Gras, Busch, Baum) definieren lassen. Dabei ist zu beachten, dass sich das Landschaftsbild durch anthropogene und natürliche Einflüsse kontinuierlich verändert, sodass erhobene Daten oft nur eine Momentaufnahme darstellen. Der Begriff des analogen Zwillings wird im wasserbaulichen Versuchswesen daher eigentlich nicht verwendet, denn er ist nicht ganz zutreffend. Oft müssen Geometrien im gegenständlichen Modell angepasst werden, um sie mit den hydraulischen Naturdaten in Einklang zu bringen. Hier ermöglichen es die Erfahrung und das Prozessverständnis der untersuchenden Ingenieurinnen und Ingenieure, die einzelnen Puzzleteile so zusammensetzen, dass die Fragestellungen richtig beantwortet werden können.

Zukunft des analogen Zwillings

Die Genauigkeit der Modellierung, die rasante Entwicklung der Messtechnik und die immer größere Menge an verfügbaren Naturdaten erhöhen

stetig die Qualität der gegenständlichen Modelle. Diese Entwicklung zeigt sich vor allem in ausgewählten Fachliteraturen wie Kobus (1978), Grimm et al. (2007) und Muste et al. (2017). Auch das Rapid Prototyping, also die schnelle und kosteneffiziente Herstellung von Werkstücken mit Hilfe von computergesteuerten Fertigungsverfahren, trägt hier einen großen Anteil dazu bei (Pfrommer et al. 2015). Die parallele Weiterentwicklung der numerischen Modelle zeigt aber auch, dass Fragestellungen für großskalige gegenständliche Flächenmodelle wie das Modell Wieblingen mittlerweile auch numerisch untersucht werden können. Das gegenständliche Modell wird aber für bestimmte Fragestellungen weiterhin erforderlich sein, insbesondere für Prozesse, die derzeit noch nicht vollständig numerisch beschrieben werden können. Beispiele dafür sind Fragen zur Morphologie oder zu komplexen Fluid-Struktur-Interaktionen. Ein wesentlicher Schwerpunkt der gegenständlichen Modelle wird daher auch sein, Daten für die Kalibrierung und Validierung numerischer Methoden zur Verfügung zu stellen. Diese neue Art der Ausrichtung erfordert daher umso detailliertere und präzisere gegenständliche Modelle. Aus diesem Grund ist die Weiterentwicklung des wasserbaulichen Versuchswesens auch im Hinblick auf die Messtechnik heutzutage von großer Bedeutung. //

Literatur

Grimm, Eberhard; Bernhard Kemnitz; Heinz Seiter; Jürgen Sengstock; Axel Voigt (2007): Entwicklungsstand der physikalischen Modelluntersuchung von Schleusen und Wehren. https://izw.baw.de/publikationen/mitteilungsblaetter/o/BAW_Mitteilungsblatt_90.pdf
 Hentschel, Bernd; Bernd Ettmer (2021): Wasserbauliches Versuchswesen im 21. Jahrhundert. In: Wasserwirtschaft (Hg.): Wasserbau. Neue Wege im Versuchswesen. Ausgabe 5. Wiesbaden: Springer Vieweg (111. Jahrgang), S. 10–15
 Kobus, Helmut (Hg.) (1978): Wasserbauliches Versuchswesen. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft. Berlin

Muste, Marian; Dennis A. Lyn; David M. Admiraal; Robert Ettema; Vladimir Nikora; Marcelo H. Garcia (Hg.) (2017): Experimental Hydraulics: Methods, Instrumentation, Data Processing and Management, Two Volume Set. CRC Press Taylor & Francis Group
 Pfrommer, Udo; Bernd Hentschel; Thorsten Hüsener (2015): Rapid-Prototyping im wasserbaulichen Versuchswesen. https://izw.baw.de/publikationen/kolloquien/o/BAWTagungsband_Wasserbauwerke_Entwurf_Betrieb_2015-05.pdf