

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Hengl, Michael; Boes, Robert

Vernetzte hybride Modellierung wasserbaulicher und morphologischer Themen am Alpenrhein

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/20.500.11970/108427>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Hengl, Michael; Boes, Robert (2021): Vernetzte hybride Modellierung wasserbaulicher und morphologischer Themen am Alpenrhein. 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. 381-388.

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



Vernetzte hybride Modellierung wasserbaulicher und morphologischer Themen am Alpenrhein

*Cross-linked hybrid modeling of hydraulic and
morphological topics at the Alpine Rhine river*

Michael Hengl, Robert Boes

Kurzfassung

Das hier methodisch beschriebene vernetzte, hybride Modellsystem für die Beantwortung wasserbaulicher und flussmorphologischer Fragen wird für einen ca. 26 km langen Flussabschnitt des Alpenrheins dargestellt, ist aber allgemein anwendbar. Je nach konkreter Fragestellung ist das System zu vereinfachen oder um weitere Modelle für die Beantwortung spezieller Fragen zu erweitern (z.B. zur Berücksichtigung weiterer Bauwerke im System).

Von der Mündung der Ill bis zum Bodensee soll sich der Rhein zu einem morphologisch aktiven Gewässer mit Verzweigungen, dynamischen Kiesbänken und Kolken entwickeln. Die große morphologische Veränderung von heute ca. 50 bis 70 m Sohlbreite auf zukünftige Sohlbreiten von zumindest 100 m, abschnittsweise bis deutlich über 300 m, wirft viele Fragen auf, wie z.B. Begrenzung der Laufentwicklung zum Schutz der Hochwasserschutzdämme oder anderer Infrastruktur wie Grundwasserbrunnen, Kolkschutz an Brückenpfeilern und Geschiebebewirtschaftung, jeweils in Zusammenhang mit der Hydrologie. Diese Fragen sind am effizientesten mit einem System numerischer Computer-Modelle und gegenständlicher Modelle im Wasserbaulabor zu beantworten. Dazu wurde ein vernetztes Modellsystem entwickelt, das die Stärken beider Modelltypen verknüpft und gleichzeitig die jedem Modell innewohnenden Schwächen minimiert. Dies ermöglicht, die Unsicherheiten bei Prognosen für den Bau und das zukünftige morphologische Verhalten des Gewässers zu reduzieren.

Das hier vorgestellte Modellsystem ist Teil des Projekts Rhesi (Rhein - Erholung und Sicherheit) der Internationalen Rheinregulierung (IRR), das primär darauf abzielt, den Hochwasserschutz und die Ökologie im intensiv genutzten Talraum auf schweizer und österreichischer Seite zu verbessern. Daneben werden auch andere Nutzungen wie Freizeit- und Erholung deutlich aufgewertet.

Abstract

The cross-linked hybrid model system to answer hydraulic and morphological questions is described herein from a methodological perspective for a roughly 26 km long river stretch of the Alpine Rhine; it is however generally applicable. Depending on the specific problem, the system can be simplified or expanded to answer specific questions (e.g. additional structures in the system) with additional models.

From the river Ill to Lake Constance, the Rhine shall develop into a morphologically active river with branches, dynamic gravel banks and scours. The large morphological change from approx. 50 to 70 m bed width to future widths of at least 100 m, partly up to well over 300 m, raises many questions, such as limiting the stream course development to protect the flood protection dykes or other infrastructure such as groundwater wells, scour protection on bridge piers and bed load management, each in connection with hydrology. To answer these questions a system of numerical computer models and physical scale models in hydraulic engineering laboratories is judged most effective. For this purpose, a cross-linked model system was developed that combines the strengths of the two model types, while minimizing their inherent weaknesses. This enables to reduce the uncertainties in the forecasts for both the implementation phase and of the future morphological behaviour of the river.

The model system presented here is part of the project Rhesi (Rhine - Recreation and Safety) of the "Internationale Rheinregulierung (IRR)", a commission for the flood control of the Alpine Rhine river, which aims to improve flood protection and ecology in the intensively used valley on both the Swiss and Austrian sides. In addition, other uses of the river such as for leisure and recreation will be significantly improved.

1 Das Projekt

Die Internationale Strecke des Alpenrheins erstreckt sich auf ca. 29 km Länge von der Mündung der Ill bis zum Bodensee. Er weist dabei ein monotones, meist durch Mittelwuhre begrenztes Hauptgerinne und Vorländer, die nur bei Hochwasser benetzt werden, sowie außenliegende Hochwasserschutzdämme auf. Auf ca. 26 km sollen mittels großzügigen Aufweitungen des Flussbetts von heute ca. 50 bis 70 m Sohlbreite auf zukünftig abschnittsweise bis weit über 300 m Breite in erster Linie der Hochwasserschutz und die Gewässerökologie erheblich verbessert werden. Der Zielzustand ist ein morphologisch aktives Gewässer mit Verzweigungen, dynamischen Kiesbänken und Kolken. Dabei muss jedoch die freie Laufentwicklung spätestens an den Hochwasserschutzdämmen begrenzt werden. Aus der geplanten, massiven morphologischen Veränderung ergeben sich

zahlreiche wasserbauliche und flussmorphologische Fragestellungen, die sowohl für den Bau als auch für den Betrieb und vorgängig in den rechtlichen Genehmigungsverfahren auf schweizerischer und österreichischer Seite zu beantworten sind. Im Projekt gibt es zahlreiche weitere Aspekte zu beachten, wie z.B. die Einbindung der Bevölkerung in den partizipativen Planungsprozess sowie die zukünftige Erholungs- und Freizeitnutzung. Daraus leitet sich auch der Titel Rhesi (Rhein, Erholung und Sicherheit) für das Gesamtprojekt der Internationalen Rheinregulierung (IRR) ab. Weitere Details zum Projekt sind Hostmann *et al.*, (2014), Schenk *et al.*, (2014) und Mähr *et al.*, (2021) zu entnehmen.

2 Wasserbauliche und flussmorphologische Fragestellungen

Die mit dem Projekt RHESI geplante umfangreiche morphologische Veränderung des Flussbetts ist anhand des Vergleichs in Abb. 1 (links: heutiger, kanalisierter und gestreckter Verlauf, rechts: zukünftige, hohe Morphodynamik) gut zu erkennen. Gleichzeitig ist im rechten Teil der Abb. 1 auch die hohe Nutzung beidseits der Hochwasserschutzdämme sichtbar. Aus dieser intensiven Nutzung des Talraums und des damit verbundenen hohen Schadenspotentials ergibt sich die erste wesentliche Fragestellung, aus der sich weitere Detailfragen ableiten:

- Ist das neue morphologische System nachhaltig beherrschbar, um den Hochwasserschutz zu gewährleisten?



Abb. 1: Alpenrhein im Bereich der Frutzmündung heute (links) und visualisiert für Zustand nach Umsetzung Projekt (rechts) (Quelle: Planergemeinschaft Zukunft Alpenrhein, Büro Hydra)

Weitere Aspekte, die nur mit Hilfe von geeigneten Modellierungen beantwortet werden können, sind:

- Generelle morphologische Entwicklung des aufgeweiteten Flusses (Kiesbänke, Kolke, Rinnen und deren Dynamik während Hochwässern),
- Morphologie im Bereich von Verengungen- bzw. Aufweitungen (Sohlauflandungen, Kolke),

- Begrenzung der lateralen morphologischen Entwicklung an den Dämmen bzw. in zu schützenden Vorlandbereichen (z.B. an Wasserfassungen für die Trinkwasserversorgung) mittels wirtschaftlicher Sicherungsmaßnahmen,
- Kolkiefen an bestehenden Brückenpfeilern (auch infolge ungünstiger Schräganströmung) sowie wirtschaftliche Sicherungsmaßnahmen gegen unzulässige Kolke, Auswirkungen der Brückenpfeiler auf die Morphologie und den Hochwasserspiegel (Pfeilerstau, Verkläusung),
- Wirkung von Vegetationsinseln (Ansammlung bzw. Dynamisierung von Schwemmholz) auf den Hochwasserspiegel und auf Brücken,
- Verhalten des Flusses in Abschnitten mit geringer Kiesauflage über Torfschichten (Thematik Sohldurchschlag) und allfällig erforderliche Schutzmaßnahmen,
- Wasserspiegelverlauf in Krümmungen am linken und rechten Ufer für die Festlegung der Dammhöhen,
- Ausbildung einer Notentlastung (z.B. lokale Dammüberströmung) und die damit verbundenen Auswirkungen (z.B. Geschiebeablagerung),
- Mögliche eigendynamische Entwicklung der Flussaufweitung ausgehend von Initialmaßnahmen, um bauliche Eingriffe und damit sowohl Kosten als auch Umweltauswirkungen zu reduzieren,
- Verhalten des Flusses während der schrittweisen Maßnahmenumsetzung (Bauzustände).

3 Geeignete Modelle und deren Vor- und Nachteile

3.1 Numerische Modelle

Mit Bezug zu den oben angeführten Fragestellungen sind Computermodelle erforderlich, die sowohl die Wasserströmung als auch den Feststofftransport und hier insbesondere die Geschiebebewegung sowie die damit verbundenen zeitlichen und räumlichen Sohlveränderungen in einem Fließgewässer verlässlich nachbilden. Dafür in Frage kommen sowohl 2D- als auch 3D-Modelle. 1D-Modelle werden zwar für die obigen Fragestellungen als nicht geeignet angesehen, liefern aber wichtige Grundlagen für die Erstellung der detaillierteren Modelle.

Alle diese Modelle müssen an Hand von Daten kalibriert werden, um die in mathematischen Gleichungen abstrahierten physikalischen Prozesse realitätsnah wiedergeben zu können. Weiters ist das zu bearbeitende Gebiet in so genannte Elemente oder Zellen zu diskretisieren. Eine zu grobe Diskretisierung kann zu

einem falschen Ergebnis führen. Mit der Diskretisierung eng verbunden sind der Speicherbedarf (Elementzahl) und die Rechenzeit (Nachbildung des zeitabhängigen Sohlentwicklungsprozesses und des Feststofftransports). Bei 3D-Modellen steigt der Speicher- und Rechenzeitbedarf gegenüber 2D-Modellen stark an (abhängig von der vertikalen Diskretisierung).

Weiters zu beachten ist die zeitliche Diskretisierung des hydrologischen Geschehens, welche sowohl die Aussagekraft der Ergebnisse als auch die Rechenzeit beeinflusst.

3.2 Gegenständliche Modelle

Unter einem gegenständlichen Modell wird die maßstäblich verkleinerte Nachbildung eines Gewässers mittels Wasser und Feststoffen verstanden. Dieses Modell ist physisch erlebbar. Bei der Erstellung eines gegenständlichen Modells sind die so genannten Modellgesetze der Ähnlichkeitsphysik zu beachten. Um die physikalischen Prozesse verlässlich nachzubilden (hier insbesondere den Geschiebetransport und die Sohlveränderung), sind der maßstäblichen Verkleinerung Grenzen gesetzt. Beispielsweise darf das Geschiebe nur so weit verkleinert werden, dass keine kohäsiven Effekte entstehen, welche für Kiesflüsse in der Natur unbedeutend sind, in kleinmaßstäblichen Modellen aber erheblich sein können. Daraus folgt, dass gegenständliche Modelle nur so groß sein können, wie der zur Verfügung stehende Raum und die vorhandene Durchflusskapazität für die Nachbildung von Hochwasserereignissen. Weiters gilt es, jenen Modellmaßstab zu finden, der einerseits gesicherte Aussagen ermöglicht und andererseits den Modellbauaufwand möglichst gering hält. Sollen morphologische Entwicklungen über längere Zeiträume nachgebildet werden, ist der damit verbundene Aufwand für Geschiebezugabe, Geschiebeentnahme und Versuchszeiten zu beachten.

3.3 Vergleich der Vor- und Nachteile

Die Tab. 1 gibt einen Vergleich zwischen den Vor- und Nachteilen der in den vorigen Unterabschnitten angeführten Modelle. Die Bewertung ist bewusst sehr einfach geführt und verzichtet auf detailliertere Differenzierungen.

Wenn nun die Vorteile der einzelnen Modelle miteinander verknüpft werden, ergibt sich insgesamt eine bessere Aussagequalität. Dies betrifft nicht unbedingt die erhöhte Genauigkeit eines bestimmten Prognosewerts. Bei morphologischen Prozessen geht es vielmehr oft darum, vorhandene Bandbreiten in der Prognose besser abzusichern und daraus abzuleitende bauliche Maßnahmen, wie z.B. Dammhöhen und Ufersicherungen, wirtschaftlicher zu dimensionieren.

Tab. 1: Vor- und Nachteile von 2D und 3D numerischen sowie gegenständlichen Modellen mit beweglicher Sohle (gekennzeichnet mit + bzw. –)

Modellanforderung	2D	3D	Gegenständliches Modell
Änderung von Randbedingungen (Geschiebemen- gen, Korngrößen, Geometrien etc.)	+	+	–
Nachbildung großer Gewässerlängen und breiter Vorländer	+	–	–
Nachbildung langer hydrologischer Zeitreihen	+	–	–
Aufwand für die Modellkalibrierung	–	–	+
Gesicherte Güte der Modellkalibrierung bei großer Änderung von Randbedingungen (z.B. Geometrie)	–	–	+
Aussagequalität 3D Morphologie	–	+	+
Zeitaufwand für die Modellierung	+	–	–
Kosten	+	+	–
Anschaulichkeit der Ergebnisse im Rahmen des partizipativen Planungsprozesses und der Öffentlichkeitsarbeit	–	–	+

4 Vernetzte hybride Modellierung

4.1 Hybride Modellierung

In der hybriden Modellierung wird für den gleichen Gewässerabschnitt sowohl ein numerisches als auch ein gegenständliches Modell erstellt, die sich gegenseitig ergänzen. Das gegenständliche Modell liefert Informationen für die Kalibrierung des numerischen Modells. Im kalibrierten numerischen Modell können geometrische Veränderungen vorgeprüft werden, des Weiteren sind Sensitivitätsanalysen betreffend Veränderungen des Feststoffhaushalts und auch Simulationen längerer Zeiträume möglich.

4.2 Vernetzung der Modelle

Bei der Vernetzung werden unterschiedliche numerische und gegenständliche bzw. hybride Modelle so verknüpft, dass sie insgesamt eine zuverlässige Prognose unterschiedlichster Prozesse in der Natur erwarten lassen. Die Größe der einzelnen Modelle ist so gewählt, dass sie, in Verbindung mit den anderen Modellen, jeweils für die Beantwortung mehrerer Fragestellungen geeignet sind.

Für die Internationale Strecke des Alpenrheins ist aktuell folgendes System aus gegenständlichen und numerischen Modellen vorgesehen:

- Hybride Modelle des gesamten Gewässerraums für die Abschnitte Widnau-Höchst und Bereich Frutmündung (Länge der gegenständlichen Modelle jeweils ca. 5,5 km bzw. 110 m im Maßstab 1:50). Entsprechend der geplanten Umsetzung des Projekts RHESI können die beiden Modellversuche sequenziell durchgeführt werden. Die zugehörigen numerischen 2D-Modelle werden zusätzlich flussauf und flussab verlängert, um Informationen für die oberen und unteren Randbedingungen der gegenständlichen Modelle zu erhalten (Hinkelammert-Zens *et al.*, 2021).
- Gegenständliches Modell im Maßstab 1:35 für die Entwicklung eines Portfolios an Dammfuß- bzw. Ufersicherungsmaßnahmen, um die morphologische Eigendynamik seitlich zu begrenzen. Je nach lokal zu erwartender Belastung werden unterschiedliche Maßnahmen erforderlich sein.
- Hybrides Modell für die Beurteilung der an Brückenpfeilern zu erwartenden Kolkentwicklungen sowie für die Optimierung und Entwicklung von Kolkschutzmaßnahmen, bestehend aus einem gegenständlichen Modell im Maßstab 1:30 und einem numerischen 3D-Modell. Das kalibrierte 3D-Modell soll die Kolkentwicklung für die im Planungsgebiet vorhandenen unterschiedlichen Pfeilerformen kostengünstiger als das gegenständlichen Modell ermitteln. Gleichzeitig sind auch Sensitivitätsanalysen für unterschiedliche Belastungszustände und Zusammensetzungen des Geschiebes möglich.

Die Vernetzung (Verknüpfung) der Modelle ist der Abb. 3 zu entnehmen. Darüber hinaus sind in Abb. 3 noch weitere Modelle enthalten, die in Abhängigkeit vom Planungsprozess dazu genommen werden können.

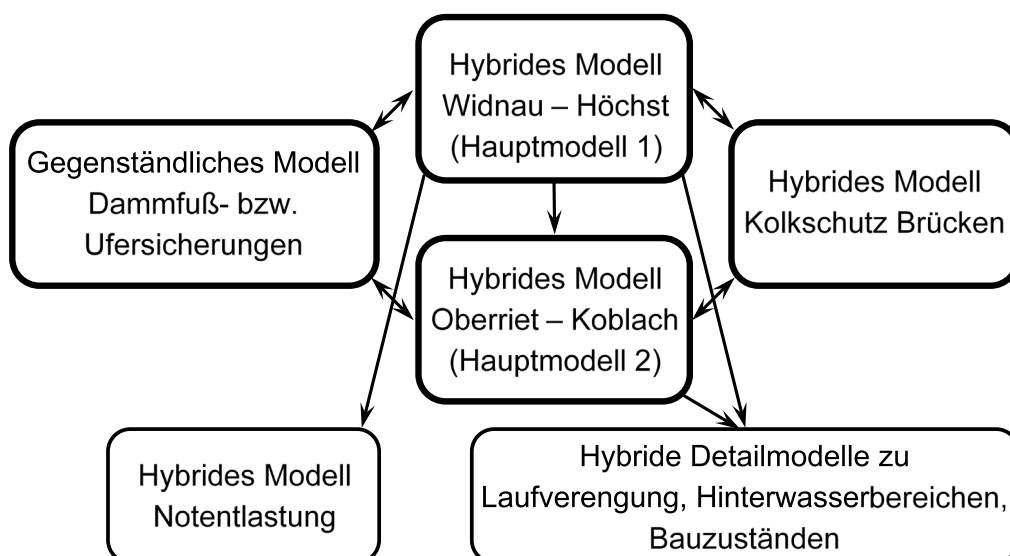


Abb. 3: Vernetztes hybrides Modellsystem (aktuelle Modelle sind fett umrandet)

5 Zusammenfassung

Für die in der Internationalen Strecke des Alpenrheins geplanten Maßnahmen zum Hochwasserschutz sowie zur Verbesserung der Ökologie und Morphologie wurde ein vernetztes System an numerischen und gegenständlichen Modellen entwickelt. Die einzelnen Modelle greifen zahnradartig ineinander und liefern damit effizient Antworten auf Fragen für die Genehmigungsverfahren in der Schweiz und in Österreich sowie für den wirtschaftlichen Bau und späteren Unterhalt.

Das hier vorgestellte vernetzte hybride Modellsystem ist allgemein anwendbar. Je nach konkreter Fragestellung ist das System zu vereinfachen oder um weitere Modelle für die Beantwortung spezieller Fragen zu erweitern (z.B. weitere Bauwerke im System).

Referenzen

- F. Hinkelammert-Zens, F., Zehnder, G., Roeber, I., Sperger, K., Weitbrecht, V., Hengl, M. (2021). Hybride Modellversuche zum Hochwasserschutzprojekt RHESI. Wasserbau-Symposium 2021, *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) Nr. 262-263*, ETH Zürich.
- Hostmann, M., Roulier, C., Paccaud, G. (2014). Raumbedarf für die natürlichen Funktionen beim Alpenrhein. *Proc. Symposium „Wasserbau und Flussbau im Alpenraum“*, VAW-Mitteilungen 227 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zürich: 399-409.
- Mähr, M., Valenti, B., Schatzmann, M. (2021). Hochwasserschutz Alpenrhein Internationale Strecke. Wasserbau-Symposium 2021, *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) Nr. 262-263*, ETH Zürich.
- Schenk, D., Schatzmann, M., Meng, A., Schälchli, U. (2014). Zukunft Alpenrhein – Definition Freibord und Überlastfall. *Proc. Symposium „Wasserbau und Flussbau im Alpenraum“*, VAW-Mitteilungen 228 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zürich: 629-641.

Adressen der Autoren

Dipl.-Ing. Dr. Michael Hengl (korrespondierender Autor)

Institut für Wasserbau und hydrometrische Prüfung,
Bundesamt für Wasserwirtschaft

A-1090 Wien, Severingasse 7

michael.hengl@baw.at

Prof. Dr. Robert Boes

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich

CH-8093 Zürich, Höggerberggring 26

boes@vaw.baug.ethz.ch