

# UNTERSUCHUNG VON EINLAUFSTRUKTUREN FÜR WASSERKRAFTANLAGEN ZUR VERRINGERUNG DER SEDIMENTATION

**Stefan Leschka, Syke**

**Sina Saremi, Hørsholm**

**Michael Detering, Werne**

**Guna Nidhi Paudyal, Delhi**

**Oliver Stoschek, Syke**

**Christian Jokiel, Köln**

## 1.1 Zusammenfassung

Wasserkraftwerke bilden durch die Ausnutzung der potentiellen Energie des Wassers eine ökologische Komponente der Energieversorgung. Für einen störungsfreien kontinuierlichen Betrieb ist die Ablagerung von Sedimenten in Stauräumen zu beachten. Sedimente können sich in den Stauräumen und im Bereich der Bauwerke ablagern und müssen dann regelmäßig entfernt werden. Um die Sedimentations- und Erosionssituation zu verbessern, besteht u.a. durch eine Optimierung der Einlaufstrukturen des Wasserkraftwerks die Möglichkeit den Sedimenttransfer durch das Kraftwerk oder andere Abflussorgane zu steuern. Dreidimensionale Strömungsmodellierung von Bauwerken (CFD) wird für diesbezügliche Fragestellungen eingesetzt. Ein derartiges validiertes Strömungsmodell ist in der Lage, detaillierte Strömungsfelder zu berechnen sowie den Transport und die Ablagerung bindiger und nicht-bindiger Sedimente abzubilden. Verschiedene Varianten von Einlaufstrukturen werden hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zur Reduzierung der Sedimentation für ein Laufwasserkraftwerk untersucht und zusammen mit betrieblichen Maßnahmen, wie z.B. dem sogenannten „tactical dredging“, bewertet.

DHI verwendet für die Beantwortung derartiger Fragestellungen eine Kombination aus zweidimensionalen und dreidimensionalen (CFD) numerischen Berechnungsmodellen. Dieser Modellansatz, dessen Kalibrierung und Validierung wird in Auszügen vorgestellt.

### 1.2 Einleitung

Den zentralen Punkt der Optimierung eines Kraftwerkes bzgl. des Sedimenteintrags bildet die Implementierung eines praktikablen Stauraum- und Wasserkraft-Management-Plans. Die in Frage kommenden Lösungen werden systematisch mit Hilfe von numerischen Modellen untersucht und in enger Zusammenarbeit mit dem Kraftwerksbetreiber bewertet und weiterentwickelt. Mögliche Lösungen können dabei

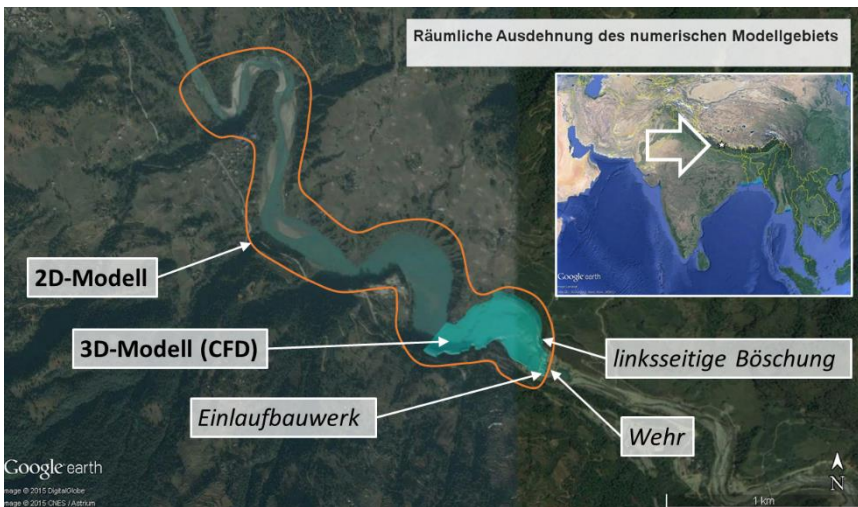
- im Sediment-Management des Stauraums (z.B. Sedimenttransfer, Baggern)
- im Sediment-Management des Einzugsgebiets (z.B. Reduzierung von Erosionsursachen)
- an der Stauanlage (z.B. Steuerung des Kraftwerksbetriebs und der Verschlüsse),
- in Kraftwerksanpassungen und strukturellen Änderungen (z.B. Einführung von Strömungsleitstrukturen),
- in der Auswahl der Bauwerkskomponenten

oder in deren Kombination liegen. Die Auswirkungen dieser Optionen, die Kosten (Investitionen und Betriebskosten), Gewinne (kurz- und langfristig) und vor allem Umweltaspekte sind dabei Bestandteil einer Optimierungsmatrix.

Als Teil einer solchen Untersuchung bieten numerische Modelle wichtige Entscheidungshilfen. Im folgenden Abschnitt wird der Modellansatz vorgestellt. Anschließend wird beispielhaft das Modellsystem der Middle Marsyangdi-Wasserkraftwerks in Nepal und seine Validierung vorgestellt, wobei das Hauptaugenmerk auf der Computational Fluid Dynamics (CFD)-Modellierung liegt.

### 1.3 Numerischer Modellansatz

Numerische Modelle werden angewendet, um das Prozessverständnis einer jeweiligen Fragestellung zu verbessern und um genauere Aussagen über den Einfluss verschiedener Faktoren auf eine spezifische Fragestellung treffen zu können. Dabei sind sowohl verschiedene Größen- (zwischen Kilometern und Millimeter) als auch Zeitskalen (zwischen Jahren und Sekunden) zu berücksichtigen. Beispielsweise ist für die Erfassung der Sedimentkonzentration am Kraftwerkeinlauf ein detailliertes Strömungsbild erforderlich. Dieser Detailgrad hat jedoch keine Relevanz für die Sedimentation in anderen Bereichen des Stauraums, die jedoch ebenfalls in geeigneter Weise abgebildet werden müssen. Der numerische Modellansatz gliedert sich daher zweckmäßigerweise in eine zwei-dimensionale (2D) und eine drei-dimensionale (3D) Komponente. Die räumliche Ausdehnung der beiden Komponenten ist in Bild 1.1 gezeigt.



**Bild 1.1:** Räumliche Ausdehnung des 2D- (orange Linie) und des 3D-Modells (blaue Fläche) (Quelle: Google Earth Pro, 2015).

Die 2D- sowie die 3D-Komponente des Modells werden im Folgenden kurz beschrieben.

### 1.3.1 2D-Modell

Das 2D/3D-Modellsystem MIKE 21/3 wird als Modellierungs-Software verwendet. Es wurde 1972 erstmals in einer wissenschaftlichen Studie eingesetzt [1] und wird seit dem kontinuierlich bei DHI weiterentwickelt. MIKE 21/3 ist in der Lage, mehrere Fluss-Kilometer abzubilden sowie langfristige Erosions-, Transport- und Sedimentationsvorgänge im Bereich von Jahrzehnten abzubilden. Es greift dabei auf Berechnungsnetze zurück, die für den jeweiligen Anwendungsfall optimiert werden können.

Das System basiert auf der numerischen Lösung der 2D inkompressiblen Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen unter Berücksichtigung der Annahmen von Boussinesq und hydrostatischer Druckverteilung. Es enthält somit Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls sowie zusätzlich Transportgleichungen für Temperatur, Salzgehalt, und Dichteunterschiede. Das Gleichungssystem wird durch das  $k$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodell geschlossen. Zudem werden 3D-Effekte wie Drall-Strömungen, wie sie in mäandrierenden Gewässern vorzufinden sind und dort das Sedimentverhalten maßgeblich beeinflussen, in parametrisierter Form berücksichtigt [2].

Bindige Sedimente werden mit Hilfe des „Mud Transport Module“ in die Berechnung einbezogen. Es können mehrere Fraktionen von Ton, Schlack und feinem Sand berücksichtigt werden. Zudem steht eine Vielzahl von Transportprozessbeschreibungen im Modell zur Verfügung. Nichtbindige Sedimente werden mit dem „Sediment Transport Module“ in der Berechnung berücksichtigt. Für Geschiebetransport und Suspensionstransport stehen z.B. die Gleichungen nach Ackers und White, Engelund und Fredsøe, van Rijn oder Yang zur Verfügung. Die Rauigkeit des Flussbettes kann statisch (z.B. durch Manning-Beiwerte) und unter dynamischer Einbeziehung von angeschwemmtem Material angesetzt werden. Die Lage des Flussbettes wird auch in diesem Modul voll dynamisch verändert [3, 4].

Für kürzere Simulationszeiträume (Tage) steht zudem eine 3D-Variante zur Verfügung, die eine hydrodynamische Druckverteilung berücksichtigt. Dadurch können auch bauwerksnahe Spülvorgänge berechnet werden.

Die Hydrodynamik des 2D-Modells wurde im Rahmen dieser Studie anhand von Wasserstandspegeln und ADCP-Messungen kalibriert und validiert. Das Sedimenttransportmodell wurde mit Hilfe von Wasserproben und Schlüsselkurven validiert.

### **1.3.2 3D-Modell (CFD)**

Für das Nahfeld des Wehrs und des Einlaufbauwerks wird ein 3D-Modell aufgebaut. DHI verwendet hierfür das Software-Paket OpenFOAM®. Es handelt sich hierbei um Open-Source-Software, die von DHI in der Forschung und Entwicklung von Berechnungswerkzeugen sowie in kommerziellen Projekten angewandt wird. Es löst die 3D-Navier-Stokes-Gleichungen auf strukturierten und unstrukturierten Berechnungsgittern. Eine Vielzahl von Turbulenzmodellen steht zur Verfügung. Verschiedene Flüssigkeitsphasen, variierende Temperaturen und Schwebstoff-Konzentrationen können berechnet werden, die ihrerseits Auswirkungen auf die Turbulenz haben.

Ein Vorteil von OpenFOAM liegt in der großen Nutzergemeinschaft und der offenen Programmstruktur, die es jedem Anwender ermöglicht, die Software weiterzuentwickeln und an projekt-spezifische Erfordernisse anzupassen. Eine dieser Weiterentwicklungen ist das Sediment-Modul von DHI. Es ermittelt Referenz-Konzentrationen an der Sohle entsprechend den berechneten Sohlschubspannungen und ordnet sie dem Bett zu. Dabei wird auf die empirische Beschreibung nach [5] zurückgegriffen. Beispielhaft ist im folgenden Abschnitt das 3D-Modellsystem eines Wasserkraftwerks beschrieben.

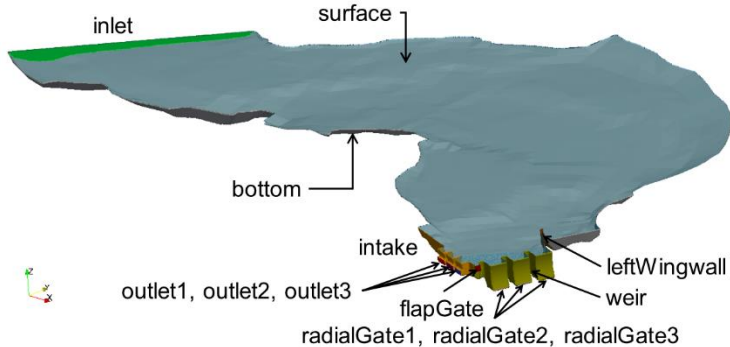
## **1.4 CFD-Modell für das Middle-Marsyangdi-Wasserkraftwerk, Nepal**

Das Middle-Marsyangdi-Wasserkraftwerk (MMHEP) wurde von Fichtner Joint Venture (FJV) im Auftrag der Nepal Electricity Authority (NEA) 2009 fertig gestellt. Es handelt sich um ein Laufwasserkraftwerk, dass mit zwei senkrecht angeordneten 38-MW-Francis-Turbinen ausgestattet ist. Die Netto-Fallhöhe beträgt 96,5 m. Das Kraftwerk befindet sich im Lamjung-Distrikt, 140 km westlich der Hauptstadt Katmandu (siehe Bild 1.1).

Während Hochwasserereignissen wurden an der linksseitigen Uferböschung oberhalb des Wehres starke Erosionen verzeichnet. Zudem wurden hohe Sedimentationsraten im Stauraum festgestellt, besonders während der Regenzeit. Die führte zu einer starken Reduzierung des Stauvolumens und zu Erosions- und Abnutzungerscheinungen an einigen Komponenten des Kraftwerks [6].

Um die Lebensdauer des Kraftwerks zu erhöhen, wurden DHI, DB Sediments und die Fachhochschule Köln von NEA mit finanzieller Unterstützung

der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) beauftragt, Maßnahmen zum Schutz der linksseitigen Böschung, zur Verringerung der Sedimentation und zur Verbesserung des Stauraum-Managements mit Hilfe von numerischer Modellierung zu untersuchen. Das CFD-Modellgebiet sowie die Lage der Randbedingungen sind in Bild 1.2 dargestellt.



**Bild 1.2:** CFD-Modellgebiet mit Lage der Randbedingungen.

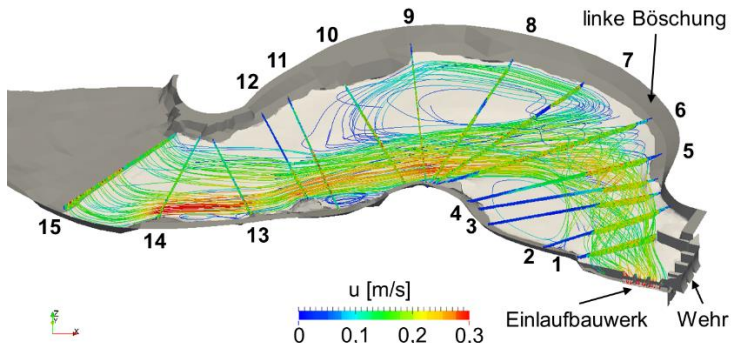
Das dargestellte Modellgebiet weist Zellgrößen zwischen 5 m und 0,03 m im Nahbereich der Bauwerke und des Flussbetts auf. Zur Berücksichtigung der kleinskaligen Wirbel wurde das  $k-\Omega$ -SST-Turbulenzmodell herangezogen, wobei im Bereich der Grenzschichten das Geschwindigkeitsprofil mit Hilfe von Wandfunktionen bestimmt wurde. In Folgenden sind auszugsweise die Ergebnisse der hydrodynamischen Kalibrierung sowie der morphologischen Validierung des Modells beschrieben.

### 1.4.1 Kalibrierung des hydrodynamischen Modells

Für die Kalibrierung des hydrodynamischen Modells standen ADCP-Messungen an insgesamt 15 Flussquerschnitten im CFD-Modellgebiet zur Verfügung. Die Messungen wurden vor der Regenzeit im April 2013 während einer 5 Tage dauernden Kampagne durchgeführt. In diesem Zeitraum variierten die ermittelten Durchflüsse zwischen 32 und 49  $\text{m}^3/\text{s}$ . Die örtlichen ADCP-Messungen wurden auf ein Raster mit einer horizontalen Auflösung von 1 m und einer vertikalen Auflösung von 0,2 m interpoliert. Der Wasserstand schwankte zwischen 624,95 und 625,35 m [7]. Die Höhenangaben

sind sämtlich auf das Datum „Nepal Nagerkot“ bezogen. Die Höhe des Flussbetts im Stauraum von 608 m zugrunde gelegt schwankte der Wasserstand während der Messungen um 2 %, der Durchfluss um 40 %. Für die Kalibrierung des Modellsystems wurde ein Durchfluss von 44 m<sup>3</sup>/s und ein Wasserstand von 625,1 m angesetzt, da die ADCP-Messungen diese Werte in zwei Flussquerschnitten aufwiesen. Ein Querschnitt fiel mit der Lage der Eingangsrandbedingung „inlet“ zusammen (siehe Bild 1.2).

Zunächst wurde ein qualitativer Vergleich der gemessenen und simulierten Strömungsbilder durchgeführt. Er ist in Bild 1.3 gezeigt.



**Bild 1.3:** Gemessene Geschwindigkeiten (in Querschnitten) und berechnete Geschwindigkeiten (in Stromlinien) im Stauraum.

Es ist zu beachten, dass alle Wehrtore bei den hier betrachteten Durchflüssen geschlossen sind. Die berechneten Stromlinien, bei Querschnitt 15 beginnend, weisen höhere Geschwindigkeiten an der rechtseitigen Böschung zwischen den Querschnitten 9 und 15 auf. Die Hauptströmung folgt nicht der mäandrierenden Flussachse, sondern ist direkt auf die linksseitige Böschung bei den Querschnitten 5 und 6 gerichtet. Zwischen den Querschnitten 6 und 7 spaltet sich die Hauptströmung in einen linksseitigen Wirbel und eine Strömung in Richtung des Einlaufbauwerks auf. Dies führt zwischen den Querschnitten 7 und 11 zu Strömungen an der linken Böschung entgegen der Hauptströmungsrichtung. Die dem Einlaufbauwerk zugewandte Strömung wird durch die Flügelwand links des Wehres von der linken Böschung abgehalten. Die gemessenen Geschwindigkeiten ergeben zusammen mit die berechneten Stromlinien ein einheitliches Strömungsbild. Es ist eine sehr gute

qualitative Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Geschwindigkeitsfelder zu verzeichnen.

Querschnitt 5, dessen ADCP-Messungen den gleichen Durchfluss ergaben wie die Messungen in Querschnitt 15, wurde für einen quantitativen Vergleich mit den Modellergebnissen herangezogen. Die Lage des Querschnitts im Stauraum kann Bild 1.3 entnommen werden. Gemessene und berechnete maximale Geschwindigkeiten sind in Tab. 1.1 gegenübergestellt.

**Tab. 1.1: Vergleich der gemessenen und simulierten max. Geschwindigkeiten und Durchflüsse.**

	Messung	Simulation
max. Geschwindigkeit Wasseroberfläche	0,31 m/s	0,27 m/s
max. Geschwindigkeit Sohle	0,33 m/s	0,27 m/s
Durchfluss	44 m <sup>3</sup> /s	44 m <sup>3</sup> /s

Die höchste gemessene Geschwindigkeit wurde in einer Tiefe von 4,7 m bei einer Querschnittskordinate von  $L = 57,3$  m dokumentiert, die an der Wasseroberfläche bei  $L = 50$  m. In diesen Bereichen des Querschnitts wurden die höchsten Geschwindigkeiten auch durch das CFD-Modell ermittelt. Die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten maximalen Geschwindigkeiten betragen an der Wasseroberfläche 13 %, nahe der Sohle 18 %, was einer guten Übereinstimmung mit den Messungen entspricht.

### **1.4.2 Validierung des morphologischen Modells**

Die morphologische Komponente des CFD-Modells wurde mit einer vergrößerten vertikalen Auflösung von bis zu  $0,5 \cdot 10^{-3}$  m aufgebaut. Es wurde mit Hilfe von Labormessungen in einem Kreislaufsystem mit offenem Kanal validiert. Der Kanal ist 16,8 m lang und 0,6 m breit. Messdaten wurden in der Kanalmitte in einem Abstand von 13 m vom Einlass aufgenommen. Sedi-



mente wurden dem Kreislauf alle 4 Stunden zugeführt. Die Experimente wurden beendet, sobald sich ein gesättigter Zustand ausgebildet hatte. Dieser Zustand entspricht dem in natürlichen Flussläufen. Die Strömungsgeschwindigkeit betrug ca. 0,7 m/s, was Froude-Zahlen  $Fr < 1$  und damit unterkritische Fließzustände zur Folge hatte. Für zusätzliche Details wird auf [8] verwiesen.

Der Transport von in Suspension befindlichen Sedimenten wird durch die Rouse-Zahl

$$P = \frac{U_s}{\beta \kappa U_*} \quad (1)$$

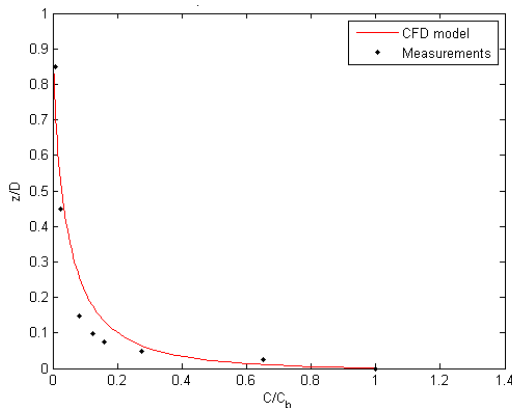
$U_s$  : Sinkgeschwindigkeit [m s<sup>-1</sup>]

$U_*$  : Schubgeschwindigkeit [m s<sup>-1</sup>]

$\kappa$  : von Kàrmàn - Konstante[-]

$\beta$  : empirischer Parameter

charakterisiert. Gemessene und berechnete Konzentrationsprofile von in Suspension befindlichen Sedimenten sind in Bild 1.4 dargestellt. Die Konzentrationen  $C$  wurden mit der Referenzkonzentration  $C_b$  normalisiert, die vertikale Position  $z$  mit der Wassertiefe  $D$ .



**Bild 1.4:** Vergleich gemessener und berechneter Konzentrationsprofile.

Gute Ergebnisse wurden bei Verwendung von  $\beta = 0.5$  erzielt, was nur geringfügig höher ist als der gemessene Wert von  $\beta = 0.432$ . Daher kann von einer guten Eignung des CFD-Modells ausgegangen werden, die hydrodynamischen und die morphologischen Transportprozesse darzustellen und als Entscheidungshilfe für die Optimierungsmatrix zu dienen.

## 1.5 Weiteres Vorgehen

Im Weiteren werden Simulationen verschiedener Anpassungen der Strömungssituation und deren Wirkungen auf den Sedimenttransport durchgeführt und die Wirksamkeit mechanischer Umlagerungen im Stauraum („tactical dredging“), Anpassungen an den Kraftwerks- und Wehranlagen sowie die Notwendigkeit eines kontinuierlichen Sedimenttransfers untersucht.

## 1.6 Literatur- und Quellennachweis

[1] M.B. Abbott, A. Damsgaard, G.S. Rodenhuis, System 21, „Jupiter“ (A Design System for two-dimensional nearly-horizontal flows), 1972.

[2] DHI, Mike 21 & Mike 3 Flow Model FM-Hydrodynamic and Transport Module-Scientific Documentation, 2014.

[3] DHI, Mike 21 & Mike 3 Flow Model FM-Mud Transport Module-Scientific Documentation, 2014.

[4] DHI, Mike 21 ST-Non-Cohesive Sediment Transport Module User Guide, 2014.

[5] J. Fredsøe, F. Engelund, Bed concentration of suspended material, Progress Report Nr. 39, Inst. Hydromechanics and Hydraulic Eng., Technical University of Denmark, 1976.

[6] NEA, Tender for Consultancy Services for Numerical Modelling for Middle Marsyangdi Hydroelectric Plant, Nepal, 2014.

[7] Hydro Lab, Bathymetric survey, velocity measurement and gauge stations calibration of the reservoir of the Middle Marsyangdi Hydroelectric Plant, Final Report, 2014.

[8] M. Cellino, W.H. Graf, Sediment-Laden Flow in Open-Channels under Noncapacity and Capacity Conditions, J. Hydraul. Eng. 125, 455-462 (1999).