

Roman Gabl, Stefan Achleitner, Andreas Sendlhofer, Thomas Höckner, Max Schmitter und Markus Aufleger

# Optimierter Einsatz und Kombination von 3-D-Numerik und physikalischer Modellierung

Für die hydraulische Dimensionierung von Wasserbauwerken können vereinfachte Bemessungsansätze, numerische Berechnungsverfahren und skalierte Laborversuche verwendet werden. Die theoretischen und erfahrungsbasierten Ansätze liefern für einfache Anwendungen durchaus sehr gute und ausreichende Ergebnisse. Im Regelfall ist aber eine erweiterte numerische oder physikalische Modellierung notwendig, um gesicherte Aussagen zu erhalten. Die vorliegende Arbeit zeigt anhand der Adaptierung der Hochwasserentlastung Enzingerboden der ÖBB-Infrastruktur AG wie die beiden Ansätze miteinander verschränkt werden können und somit einen optimierten Formfindungsprozess unterstützt wird.

## 1 Einleitung

### 1.1 Untersuchungsgegenstand

Der aktuelle wasserbauliche Planungsbedarf erstreckt sich von Neubauten bis hin zu Erweiterungen von bestehenden Kraftwerksgruppen [1]. Zusätzlich besteht aber auch weiterhin der Bedarf, dass bestehende Anlagen überprüft und bei veränderten Randbedingungen angepasst werden. Ein solches Beispiel ist die Hochwasserentlastungsanlage des Ausgleichsbeckens Enzingerboden. Dieses Becken gehört zur Kraftwerksgruppe Stubachtal (Hohe Tauern, Salzburg), welche von der ÖBB-Infrastruktur AG für die Erzeugung von 16,7-Hz-Bahnstrom eingesetzt wird. Diese Kraftwerksgruppe besteht aus den Kraftwerken Enzingerboden, Schneiderau und Uttendorf. Gesamthaft besitzt und betreibt die ÖBB-Infrastruktur AG zehn Wasserkraftwerke in Österreich.

Auf Grund von Behördenvorschriften hat die ÖBB-Infrastruktur AG die Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Wasserbau, mit einer Studie beauftragt, alle fünf Talsperren der Werksgruppe Stubachtal mit einem Gesamtvolumen von 78 Mio. m<sup>3</sup> entsprechend dem Leitfaden zum Nachweis der Hochwassersicherheit von Talsperren des österreichischen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft zu überprüfen. Im Zuge dessen hat sich her-

ausgestellt, dass die Hochwasserentlastungsanlage im Ausgleichsbecken Enzingerboden als einziges Bauwerk keine ausreichende Leistungsfähigkeit für die Abfuhr des Hochwassers aufweist. Mit Hilfe von numerischen Berechnungen und einem Labormodell wurde der Umbau geplant sowie der Nachweis der Leistungsfähigkeit der neuen Geometrie erbracht. Das Untersuchungskonzept und die daraus gezogenen Schlüsse für ver-

gleichbare Projekte sind Hauptbestandteil dieses Beitrages. Der Umbau wird 2013 fertiggestellt.

Die Hochwasserentlastung des Speichers Enzingerboden erfolgt über einen seitlichen Überfall, der über einen Sammelkanal und eine Schussstrecke die Ableitung des Hochwassers ermöglicht (**Bild 1**). Durch den Zugang zum Grundablass ist der Wehrrücken zweigeteilt. Das Bauwerk ist orographisch rechts von der



**Bild 1:** Foto der Hochwasserentlastungsanlage Ausgleichsbecken Enzingerboden – vor der Umbaumaßnahme

Betonschwergewichtsmauer angeordnet. Die zwei Brücken, welche den Sammelkanal überspannen, wurden komplett neu errichtet und waren somit für die Bearbeitung nicht relevant. Ausgehend von einer bestehenden Geometrie wurde mit Hilfe von 3-D-numerischen Berechnungen festgestellt, dass die bisherige Kapazität der Anlage ca.  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  beträgt. Die aktualisierten Ansätze für die Abflüsse ergeben eine notwendige Leistungsfähigkeit der Hochwasserentlastungsanlage von  $170,5 \text{ m}^3/\text{s}$  für das Bemessungshochwasser (BHQ) und  $211 \text{ m}^3/\text{s}$  für das Sicherheits-hochwasser (SHQ). Dies entspricht mehr als nur einer Verdoppelung der bisherigen Leistungsfähigkeit.

## 1.2 Konzept der Untersuchung

Gemeinsam mit dem Auftraggeber ÖBB-Infrastruktur AG wurde eine schrittweise Bearbeitung der Ertüchtigung der Anlage vereinbart:

- 3-D-numerische Voruntersuchung und
  - Nachweis und zusätzliche Optimierung mit Hilfe eines physikalischen Modelles.
- Aufbauend auf eine Ermittlung des limitierenden Faktors für die Leistungsfähigkeit wurden mehrere Geometrievariationen untersucht. In diesem Fall konnten die Vorteile der 3-D-Numerik voll ausgeschöpft sowie unterschiedlichste Varianten einfach und schnell getestet werden. Insgesamt wurden vier Varianten untersucht, die sowohl nach deren Abflussverhalten im Beckenbereich als auch in der Schussrinne im Unterlauf bewertet wur-

den. Parallel zum Behördenverfahren wurde für zusätzliche Optimierungen und die Validierung der numerischen Ergebnisse ein physikalischer Modellversuch im Labor aufgebaut. Der Aufwand für die Erstellung des Labormodelles konnte durch die Erkenntnisse der Numerik maßgeblich reduziert werden. Die zu untersuchenden Fragestellungen wurden ebenfalls konkretisiert und der Umbauaufwand deutlich verringert. Die im Labor ermittelten weiteren Optimierungen konnten im wasserrechtlichen Verfahren aufgegriffen werden und führten zu einem sehr wirtschaftlichen Ergebnis.

## 2 Numerische Berechnungen

### 2.1 Allgemein

Für die 3-D-numerische Berechnung wurde die kommerzielle Software FLOW-3D [2] verwendet. Diese Software hat sich am Arbeitsbereich Wasserbau in Forschung und Lehre bewährt. Sie hat deutliche Stärken bei der Berechnung von freien Wasseroberflächen. Für die Berechnung wurde ein Rechenetz aus sechs rechteckigen Blöcken erstellt, wobei ein Block als Quelleblock (Anströmung von unten, Vorgabe des Abflusses) dient und zwei große Blöcke den restlichen Berechnungsbereich umschließen. Die weiteren drei Blöcke werden innerhalb der anderen Blöcke definiert, um die Geometrie besser auflösen zu können. Eine Besonderheit der Software FLOW-3D ist es, dass nicht die

ursprünglich importierte Geometrie der Berechnung zu Grunde liegt, sondern eine vom Programm erstellte Berechnungsgeometrie (FAVORized geometry [2]). Diese ist vom Berechnungsnetz abhängig. Im Zuge der Qualitätssicherung ist somit noch vor dem Nachweis der Netzunabhängigkeit der Berechnungsergebnisse sicherzustellen, dass die Geometrie in der entsprechenden Detailauflösung berücksichtigt wird. In Summe wurden ca. 4 Mio. Zellen benötigt, wobei aber nur ca. 50 % davon aktiv in die Berechnung eingehen. Die restlichen Zellen liegen innerhalb des Geländes.

Der untersuchte Bereich umfasst ca. 150 mal 70 m. Darin enthalten ist die gesamte Hochwasserentlastungsanlage inklusive der Schwergewichtsmauer bis hin zum Gegenhang. Der restliche Speicher wird über den Quellblock ersetzt. Nach der Schussrinne wird eine Outflow-Randbedingung gesetzt. Untersucht werden bei einem stationär zuströmenden Abfluss der Wasserspiegel im Speicher. Dieser Wert dient auch als Zielwert für den Nachweis der Stabilität der numerischen Berechnung.

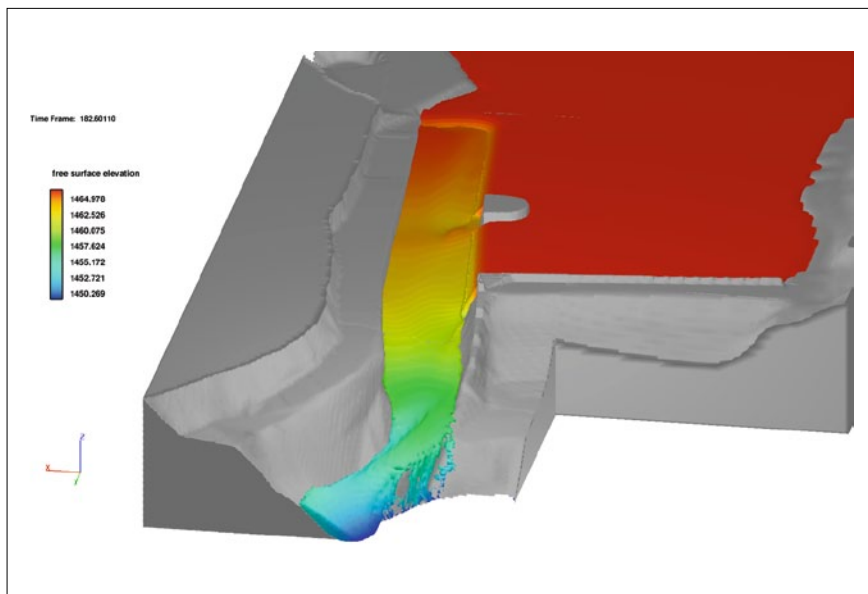
### 2.2 Untersuchte Varianten

Schon im Zuge der Voruntersuchungen konnte festgestellt werden, dass der limitierende Faktor die Leistungsfähigkeit des Sammelkanals ist. Darin kommt es in der Ausgangsgeometrie schon bei ca.  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  zu einem Rückstau und der Überfall wird eingestaut. Um die Leistungsfähigkeit zu erhöhen wurden zwei Hauptuntersuchungen durchgeführt:

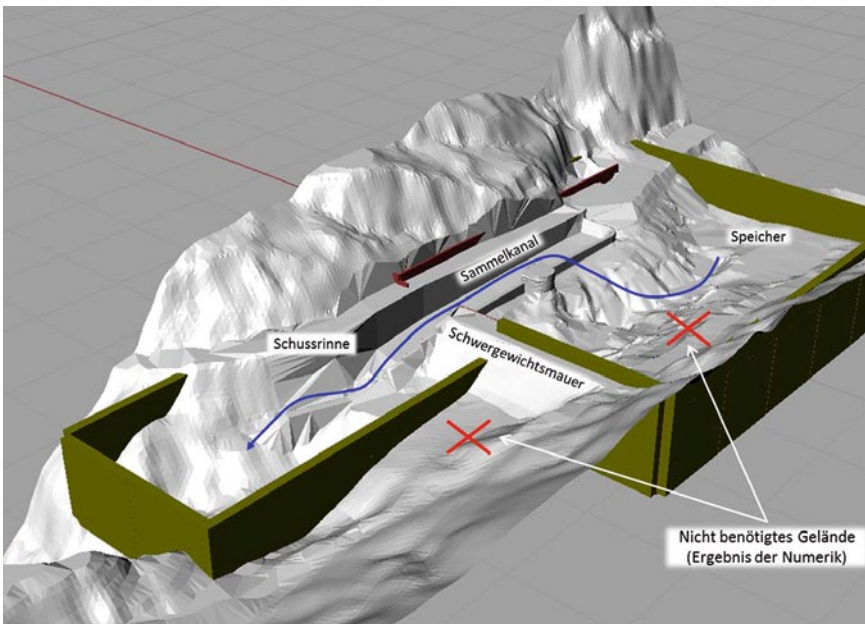
- Eintiefung und
- Verbreiterung des Kanals in Richtung der orographisch rechten Seite (bestehende Straße).

Da der Umbau ohne Betriebsunterbrechung erfolgen sollte, scheiden alle weiteren Varianten, bei denen Baumaßnahmen am Wehr sowie an der Mauer notwendig werden, aus.

Bei der Variante (a) Eintiefung wurde die Breite der Sammelrinne nahezu gleich gehalten und in der Ebene der Mauer um ca. 2 m eingetieft. Der keilförmige zusätzliche Ausbruch lieferte zwar eine Verbesserung der Abfuhrkapazität, doch reichte diese nicht aus. Deshalb wurde zusätzlich eine Erweiterung der Sammelrinne untersucht. Dazu muss die bestehende Straße verlegt werden und die anschließende Felswand deutlich angeschnitten werden. Mit Hilfe der 3-D-Numerik konnte nachgewiesen werden, dass diese Erweiterung



**Bild 2:** Exemplarische Darstellung der numerischen Ergebnisse – aufgeweitete Geometrie bei einem Abfluss von  $211 \text{ m}^3/\text{s}$  (SHQ)



**Bild 3:** Skaliertes Geländemodell inklusive der Umrandung des Labormodelles



**Bild 4:** Laborversuch: Einbau Rampe (weiß) und Nase (rot)

das SHQ (**Bild 2**) und sogar einen Abfluss von  $240 \text{ m}^3/\text{s}$  (Überlastung) schadlos abführen kann. Mit dem Wissen, dass ein physikalisches Modell erstellt wird, wurde die Variation der Geometrie somit gestoppt und weitere Optimierungen im Labormodell untersucht.

### 3 Labormodell

#### 3.1 Übergang von Numerik

An diesem Beispiel können sehr gut die Vorteile einer Vorausberechnung mit Hilfe der 3-D-Numerik gezeigt werden. Im Zuge einer ersten Vorabschätzung wurde der Modellmaßstab von 1:25 angenommen (Froud'scher Modellansatz). Mit Hilfe der Numerik konnte gezeigt werden, dass die luftseitige Gründung der Schwergewichtsmauer in keinem Lastfall eingestaut wird. Damit ist eine Modellierung dieses Bereiches nicht notwendig. Ebenfalls konnte numerisch der Nachweis erbracht werden, dass die Geschwindigkeiten vor dem Wehr sehr gering sind und die Ausformung des Speichers keinen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit hat. Somit konzentriert sich der zu untersuchende Bereich nur auf das Wehr und den Sammelkanal. Bedingt durch diese Erkenntnis konnte der Modellmaßstab auf 1:20 verbessert werden, ohne dass Mehrkosten entstanden sind. Im **Bild 3** ist das komplette Geländemodell dargestellt und die Bereiche gekennzeichnet, die in der Modellierung entfallen. Zusätzlich konnte nahezu das gesamte Bauwerk in der Werkstatt vorgefertigt werden. Der Aufbau erfolgt im Becken auf einem Podest.

Die bestehende Geometrie wurde im physikalischen Modell nicht mehr untersucht, sondern Ausgangspunkt war die numerische optimierte Konfiguration. Daraus ergibt sich ein nicht zu vernachlässigender Vorteil, dass alle zu untersuchenden Einbauten auf bzw. in das Modell gestellt werden konnten. Die zusätzlichen Teile wurden entweder aufgeschraubt oder mit Zwingen an das Modell befestigt (**Bild 4**). Dadurch wurden ein schneller Tausch und eine einfache Kombination der unterschiedlichen zu untersuchenden Einbauten ermöglicht.

#### 3.2 Ergebnisse der Optimierung

Das Ziel des Laborversuches war es neben dem Nachweis der numerischen Berechnung, dass das notwendige Ausbruchvo-

lumen reduziert wird. Dabei können zwei Bereiche unterschieden werden:

- a) Rampe und
- b) Nase.

Der im Bild 4 ersichtliche weiße Bereich innerhalb des Sammelkanals stellt eine Rampe dar, die nicht komplett entfernt wird. Sie ermöglicht es, dass auch in Zukunft eine gute Erreichbarkeit der Sammelrinne auch mit schwerem Gerät möglich ist. Das Belassens dieses Keils hat einen sehr geringen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit, bringt aber deutliche Vorteile für zukünftige Baumaßnahmen.

Der zweite Bereich der Optimierung konzentriert sich auf die Schussrinne. Knapp nach der Sperrachse ist die Felswand mit Ankern gesichert. Die komplette Entfernung der Anker wäre mit beträchtlichen Kosten verbunden. Deshalb wurden unterschiedliche Nasen untersucht, um möglichst viele Anker zu belassen. Im Zuge der Untersuchung hat sich

gezeigt, dass dies sogar eine Verbesserung des Strömungsverhaltens für die Schussrinne ergibt. Die Nase verengt und lenkt das Wasser in der Schussrinne so, dass die Erhöhung der Schussrinne im unteren Bereich geringer ohne diesen Felsbereich ausfallen kann.

### 3.3 Vergleich mit der Numerik

Als Vergleichswert für die Numerik und den physikalischen Modellversuch wurde der Wasserspiegel im Speicher bei einem konstanten Zulauf herangezogen. Die Unterschiede zwischen den beiden Modellansätzen liegen bei ca. 5 cm im Naturmaßstab. Diese Differenz liegt sehr nahe an der Messgenauigkeit des Laborversuches und deutlich unter der zu erwartenden Wellenhöhe im Speicher. Durch diese gegenseitige Absicherung der beiden Modellkonzepte konnte ein zusätzlicher Sicherheitsgewinn für die korrekte Dimensionierung der Anlage erzielt werden.

## 4 Schlussfolgerungen

Für wasserbaulichen Problemstellungen werden immer häufiger hybride Modelle herangezogen [3]. Durch die Kombination der beiden Modellierungsansätze Numerik und Laborversuch konnten für die vorgestellte Erweiterung der Hochwasserentlastungsanlage des Speichers Enzingerboden die jeweiligen Vorteile der Verfahren optimal ausgenutzt werden. Es standen zeitnahe belastbare Ergebnisse zur Verfügung, die aus einer numerischen Optimierung resultierten. Basierend auf der Numerik konnten Einsparungen beim Laborversuch erzielt werden, ohne einen Genauigkeitsverlust zu erleiden. Zusätzlich war eine Verbesserung des Maßstabes möglich, ohne die Kosten zu erhöhen. Durch den physikalischen Modellversuch an sich wurden Einbauten und Reduktionen des notwendigen Ausbruchsvolumens schnell und anschaulich untersucht. Abschließend wurde durch eine nochmalige numerische Berechnung des Ergebnisses eine gegenseitige Abstützung des Ergebnisses ermöglicht. Durch die gute Übereinstimmung der beiden unabhängigen Modellierungsansätze kann ein zusätzlicher Sicherheitsgewinn verbucht werden.

Roman Gabl, Stefan Achleitner, Andreas Sendlhofer, Thomas Höckner, Max Schmitter and Markus Aufleger

### Combined use of 3D-Numerics and Scale Model Test

The methods for the design of hydraulic structure range simplified design rules, numerical simulation or scaled laboratory test may be used. The theoretical and empirical rules provide reliable and satisfying results for common applications. In general an extended numerical and/or physical modelling is to be applied to gain trustful designs. Here the redesign of the spillway Enzingerboden of the ÖBB-Infrastruktur AG is shown, where both methods, numerical and physical modelling, are applied in combination in order to optimizes the design and form finding process.

Роман Габл, Штефан Ахлейтнер, Андреас Зендльхофер, Томас Хёккнер, Макс Шмиттер и Маркус Ауфлегер

### Оптимизация использования и комбинированное применение программы 3-D-Numerik и физического моделирования

Для определения расчетных параметров гидротехнических сооружений могут быть использованы упрощенный измерительный подход, методика цифровых расчетов и масштабируемые лабораторные испытания. Рассчитанные теоретически и полученные на основе опыта величины обеспечивают для простых приложений очень хорошие и достаточные результаты. Однако, как правило, для получения гарантированных результатов необходимо расширенное цифровое или физическое моделирование. В настоящей работе – на основе адаптации расположенной в городке Энцингерboden (Enzingerboden) системы паводкового водосброса, принадлежащей концерну «Австрийские Федеральные железные дороги Инфраструктур АГ» (ÖBB Infrastruktur AG) – показано как обе методики могут быть скомбинированы друг с другом; таким образом, поддерживается и оптимизируется процесс определения.

### Autoren

**Dipl.-Ing. Dr. Roman Gabl**

**Dipl.-Ing. Dr. Stefan Achleitner**

**Dipl.-Ing. Andreas Sendlhofer**

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.**

**Markus Aufleger**

Arbeitsbereich Wasserbau, Universität Innsbruck  
Technikerstraße 13  
6020 Innsbruck, Österreich  
Roman.Gabl@uibk.ac.at

**Dipl.-Ing. Thomas Höckner**

ÖBB-Infrastruktur AG  
Claudiastraße 2  
6020 Innsbruck, Österreich

**Dipl.-Ing. Max Schmitter**

Ingenieurbüro Schmitter  
Kirchangerweg 2  
6365 Kirchberg, Österreich

### Literatur

- [1] Aufleger, M.: Strom fließt – Wasserkraft 2020. In: Bauingenieur (2008), Heft 83, S. 324-332.
- [2] Flow Science Inc. (Hrsg.): FLOW-3D Version 9.4.2, Benutzerhandbuch, 2010.
- [3] De Cesare, G.; Pfister, M., Daneshvari, M.; Bieri, M.: Herausforderungen des heutigen wasserbaulichen Versuchswesens mit drei Beispielen In: WasserWirtschaft (2012), Heft 7-8, S. 71-75.