

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

## Haberl, Ulrich; Kohane, Roberto; Goldenits, Petra; Hebenstreit, Klaus Einsatz eines hydrodynamischen Abflussmodells zur Verbesserung der Leistungsprognose an Laufwasserkraftwerksketten

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische  
Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103437>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Haberl, Ulrich; Kohane, Roberto; Goldenits, Petra; Hebenstreit, Klaus (2014): Einsatz eines hydrodynamischen Abflussmodells zur Verbesserung der Leistungsprognose an Laufwasserkraftwerksketten. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Simulationsverfahren und Modelle für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 50. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 155-164.

### 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.



## **Einsatz eines hydrodynamischen Abflussmodells zur Verbesserung der Leistungsprognose an Lauf- wasserkraftwerksketten**

Ulrich Haberl  
Roberto Kohane  
Petra Goldenits  
Klaus Hebenstreit

Block 2  
Saal 5

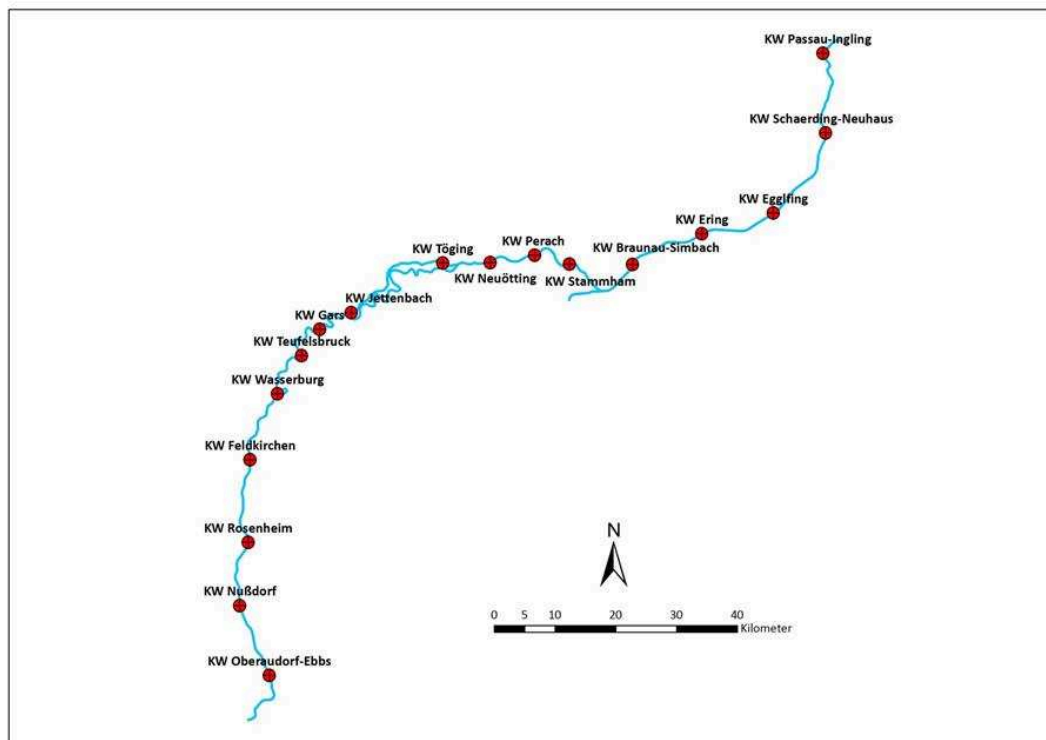
VERBUND betreibt die Laufwasserkraftwerke am Bayerischen Inn zwischen Oberaudorf-Ebbs und Passau-Ingling. Für den Betrieb und die Vermarktung ist es wichtig, die Abflussverhältnisse am Inn, welcher ein stark alpines nivales Abflussregime besitzt, für die zukünftigen 72 Stunden im Echtzeitbetrieb zu prognostizieren. Die prognostizierten Abflussganglinien sind ein essentieller Bestandteil der Leistungsprognose der Laufwasserkraftwerkskette und somit auch für die Kraftwerkseinsatzplanung des gesamten VERBUND Kraftwerksparks in der Day-Ahead Vermarktung.

Um die täglich notwendige Information an der Inn-Kraftwerkskette zu verbessern, wurde ein eindimensionales hydrodynamisches Strömungsmodell für den gesamten Abschnitt zwischen Oberaudorf-Ebbs und Passau-Ingling mit der Software HEC-RAS vom Ingenieurbüro Lahmeyer Hydroprojekt GmbH erstellt und kalibriert. Der im Modell abgebildete Flussabschnitt erstreckt sich über eine Länge von ca. 210 km und umfasst die 16 darin befindlichen Laufwasserkraftwerke sowie die ca. 29 km lange Restwasserstrecke des Inn vom Unterwasser des Kraftwerks Jettenbach bis zum Stauraum Neuötting. Mit diesem Modell ist es möglich, die Leistungsprognose an jedem VERBUND-Innkraftwerk über die im Modell berechneten Größen Durchfluss, Unterwasser- und Oberwasserspiegellage zu berechnen. Diese Methode soll das bestehende Werkzeug, das auf statischen Durchfluss-Leistungsbeziehungen beruht, ablösen. Als Randbedingung für das Abflussmodell im operationellen Prognosebetrieb sollen modellierte Abflussganglinien aus einem Niederschlag-Abfluss-Modell, welches mit Niederschlag und Lufttemperatur als Eingangsgrößen arbeitet, eingehen.

Neben der Verbesserung der Leistungsprognose der Laufwasserkraftwerkskette am Inn und der damit einhergehenden Verbesserung der strategischen Kraftwerkseinsatzplanung kann das hydrodynamische Abflussmodell im Prognosemodus auch in bevorstehenden Hochwassersituationen ein wichtiges und aussagekräftiges operationelles Werkzeug im Kraftwerksbetrieb (z.B. Stauraumvorabsenkung) sein.

## 1 Einleitung

Um die Leistungsprognose der Laufkraftwerke am Inn zwischen Oberaudorf-Ebbs und Passau (Abbildung 1) zu verbessern, ist für diesen Abschnitt ein räumlich detailliertes hydrologisches Niederschlag-Abfluss-Modell (NA-Modell) und ein hydrodynamisches 1D Strömungsmodell erstellt worden.



**Abbildung 1:** Übersicht VERBUND-Kraftwerkskette am bayerischen Inn.

Diese Modelle werden in das VERBUND-interne energiewirtschaftliche Planungssystem (EPV) eingepflegt und in Kombinationen mit den bestehenden Planungsinstrumenten genutzt. Diese beiden Modelle ermöglichen es, über rasterbasierte Niederschlags- und Temperaturprognosen (räumliche Auflösung 1x1km) die Leistung an den einzelnen Staustufen zu prognostizieren. Das hydrologische Modell berechnet für alle Zubringer und Zwischeneinzugsgebiete die Zuflüsse, welche dann im 1D Strömungsmodell geroutet werden. Das hydrodynamische Modell wird zur Berechnung des Verlaufs des Ober- und Unterwasserspiegels sowie des Durchflusses mit einer zeitlichen Auflösung von 1 Stunde herangezogen. Die Verbesserung beim Umsetzen dieser Modellkombination ist eine genaue Abbildung der gesamten Kraftwerkskette, die auch die Beeinflussung des gesamten Unterliegers aufgrund der vorgeschriebenen Wehrbetriebsordnungen der einzelnen Kraftwerke bei unterschiedlichen Durchflusssituationen berücksichtigt. Ein weiterer Vorteil dieses Modell-Setups ist die Berück-

sichtigung der prognostizierten diffusen Zuflüsse, welche im Bereich des bayerischen Inn eine wesentliche Abflussfracht bilden.

## 2 Hydrologisches Modell

Zur Anwendung kommt das HBV-basierte NA-Modell COSERO (*Nachtnebel*, 2009), welches von der Landesregierung Salzburg in Kooperation mit der VERBUND AG und der Salzburg AG bereits erfolgreich für das Hochwasserprognosesystem Hydris 2 eingesetzt wird. Das Modell basiert auf konzeptionellen Speichergleichungen, die die hydrologischen Prozesse Oberflächenabfluss, Interflow und Grundwasserabfluss für hydrologisch gleichartige Flächenelemente nachbilden. Verdunstungs- und Schneeprozesse (Akkumulation und Ablation) werden im Modell für diese Teilflächen berücksichtigt. Für die Leistungsprognose wurde COSERO auf Rasterbasis ab dem Kraftwerk Oberaudorf-Ebbs erstellt. Als hydrologische Grundinformation für jedes Rasterelement, wurden die Landnutzung (Corine – Landuse Data, Quelle: *EEA*), mittlere Geländehöhe (GDEM ASTER 30x30m, Quelle: *NASA, USGS*) sowie die Bodenart (European Soil Data Base, Commission and the European Soil Bureau Network) herangezogen. Für das stromaufwärts liegende Kopfeinzugsgebiet bis Oberaudorf-Ebbs ist eine externe Zuflussprognose bzw. Messdaten des Abflusses als Randbedingung notwendig, da dieses Gebiet derzeit noch nicht als verteiltes NA-Modell aufgebaut ist. Das hydrologische Modell rechnet kontinuierlich und setzt jede Berechnung auf dem aktuellsten Systemzustand der gesamten modellierten Berechnungszeitspanne auf. Der Startzeitpunkt muss daher immer in der Vergangenheit liegen, damit der Systemzustand auf gemessenen meteorologischen Inputgrößen beruht. Als Input werden die INCA-Daten des österreichischen Wetterdienstes (*ZAMG*, online) für Niederschlag und Temperatur herangezogen. Das NA-Modell ist intern in 128 Teilgebiete unterteilt und berechnet für jedes Teilgebiet den aus den zugehörigen Oberlieger-Einzugsgebieten akkumulierten und über einen linearen Speicher gerouteten Abfluss am Gebietsauslass. Neben dem Gebietsabfluss wird auch der Abfluss aus dem Zwischeneinzugsgebiet selbst ausgegeben. Diese Abflüsse werden als Input für das hydrodynamische Modell herangezogen. Abbildung 2 zeigt eine generelle Übersicht über die modellierten Teilgebiete und die Kraftwerkskette im Modellgebiet.



der Wasserkraftanlagen sowie Abflüsse. Zur Ermittlung dieser Größen für Prognoserechnungen eignen sich numerische Strömungsmodelle am besten. Erfahrungen mit unterschiedlichen Modelltypen am Inn zeigen, dass die Strömungsvorgänge und vor allem die oben genannten hydraulischen Größen mit Hilfe eines relativ einfachen eindimensionalen Modellansatzes gut abgebildet werden können. Da bei Prognoserechnungen neben der räumlichen auch die zeitlichen Veränderungen der Strömung erfasst werden müssen, kommt hier nur ein instationärer Modellansatz in Frage.

Bei der Strömungsmodellierung am bayerischen Inn spielen neben den hydrotechnisch relevanten Faktoren auch morphologische Einflussprozesse eine wichtige Rolle. Durch die extrem hohe Feststofffracht des Gewässers sind die Stauräume der Stauhaltungen mit feinen Ablagerungssedimenten stark verlandet. Da sich der Verlandungsprozess in den Stauhaltungen am Inn verhältnismäßig schnell vollzieht (ca. 4 bis 5 Jahre), befindet sich die Gewässersohle in den Stauräumen der Kraftwerke in einem morphologischen Gleichgewichtszustand. Bei mittleren Abflussverhältnissen sind in allen Stauräumen Sohlformen zu beobachten, die den Strömungswiderstand maßgebend beeinflussen. Darüber hinaus kommt es bei höheren Abflüssen zur Ausräumung der im Stauraum abgelagerten Feinsedimente und zur Eintiefung der Gewässersohle. Zur rechnerischen Erfassung der oben genannten Prozesse eignen sich Feststofftransportmodelle, mit deren Hilfe zuverlässige Aussagen über die räumlichen und zeitlichen morphologischen Veränderungen im Gewässer sowie über deren Auswirkungen auf die Strömung berechnet werden können. Dies belegen zahlreiche Modelluntersuchungen an mehreren Staustufen am Inn (Kohane, 2008, 2010, 2013).

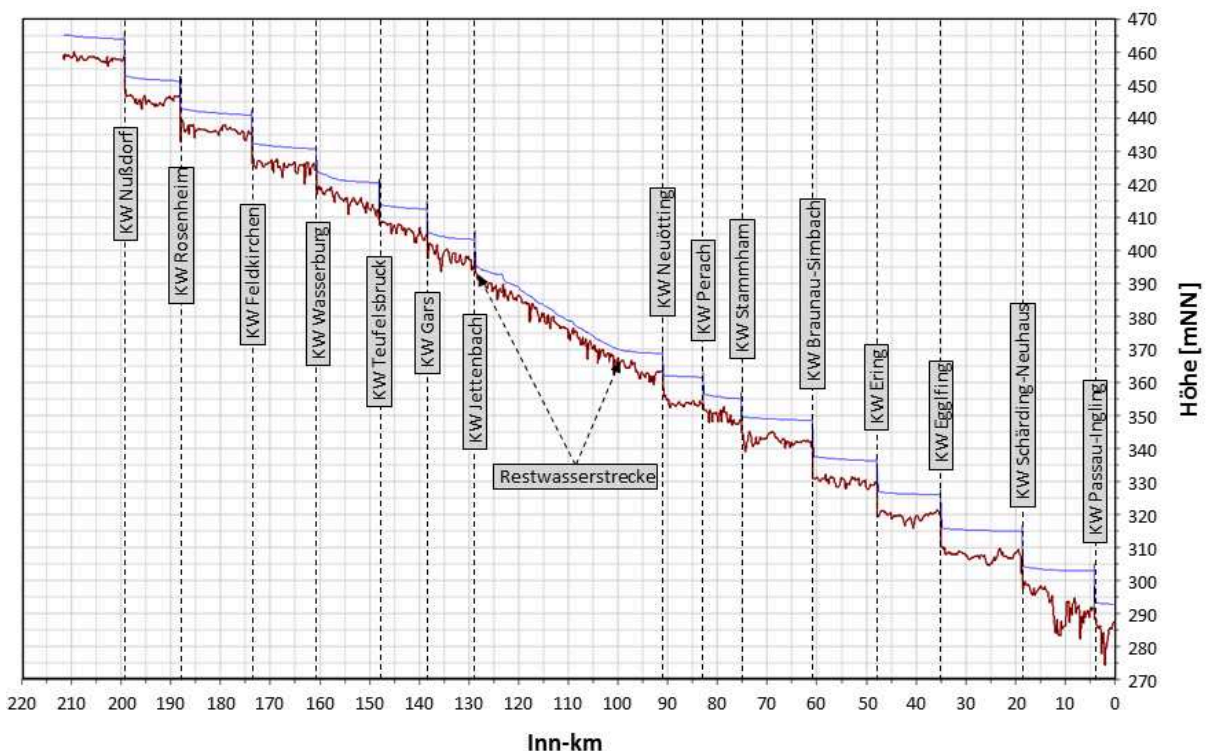
Für das hier betrachtete Prognosemodell des bayerischen Inn wurde das Softwaresystem HEC-RAS von U.S. Army Corps of Engineers in der aktuellen Version 4.1.0 ausgewählt. Dieses System vereinbart alle Funktionalitäten, die für die hydraulische Modellierung der Staustufenkette am Inn erforderlich sind. Dabei wird zur Strömungsberechnung das instationäre Modul basierend auf den eindimensionalen St. Venant Gleichungen verwendet.

Im Zuge des Modellaufbaus wurden zunächst Teilmodelle für die einzelnen Staustufen erstellt. Für den oberen Gewässerabschnitt vom Unterwasser des Kraftwerks Oberaudorf-Ebbs bis zum Kraftwerk Neuötting (8 Staustufen) lagen bereits HEC-RAS-Modelle vor. Diese wurden im Rahmen von früheren Feststofftransportmodelluntersuchungen erstellt und konnten mit wenigen geringen Anpassungen übernommen werden. Für den unteren Innabschnitt vom Unterwasser des Kraftwerks Neuötting bis zur Mündung des Inn in die Donau wurden neue Modelle für die darin befindlichen 7 Staustufen erstellt. Auch für die Restwasserstrecke zwischen Jettenbach und Neuötting musste ein neues Strö-

mungsmodell erstellt werden. Alle Teilmodelle wurden anhand von gemessenen Daten aus den vorhandenen Pegelanlagen (Zeitreihen der Wasserspiegellage und des Abflusses) für den Zeitraum 2009-2013 instationär kalibriert.

Beim gewählten Modellansatz zur Strömungsmodellierung wird von einer festen Gewässersohle ausgegangen. Damit wird der Einfluss der zeitlich und räumlich veränderlichen morphologischen Prozesse (Sohlformen und Sedimentausträumung) auf die Wasserspiegellagen in der Berechnung nicht direkt berücksichtigt. Als Abhilfe wird dieser Effekt durch die Verwendung von abflussabhängigen Sohlreibungsbeiwerten kompensiert, welche abschnittsweise im Modell definiert wurden. Die Festlegung der Abhängigkeit des Sohlreibungsbeiwerts vom Abfluss erfolgte anhand der Ergebnisse von früheren Feststofftransportmodelluntersuchungen. Durch diese Vorgehensweise konnte in allen Teilmodellen eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Wasserspiegellagen und Abflüssen erzielt werden.

Nach Erstellung und Kalibrierung der einzelnen Teilmodelle wurden diese zu einem Gesamtmodell zusammengeführt. Abbildung 3 zeigt den Längenschnitt des Gesamtmodells.



**Abbildung 3:** Längenschnitt des hydrodynamischen Modells.

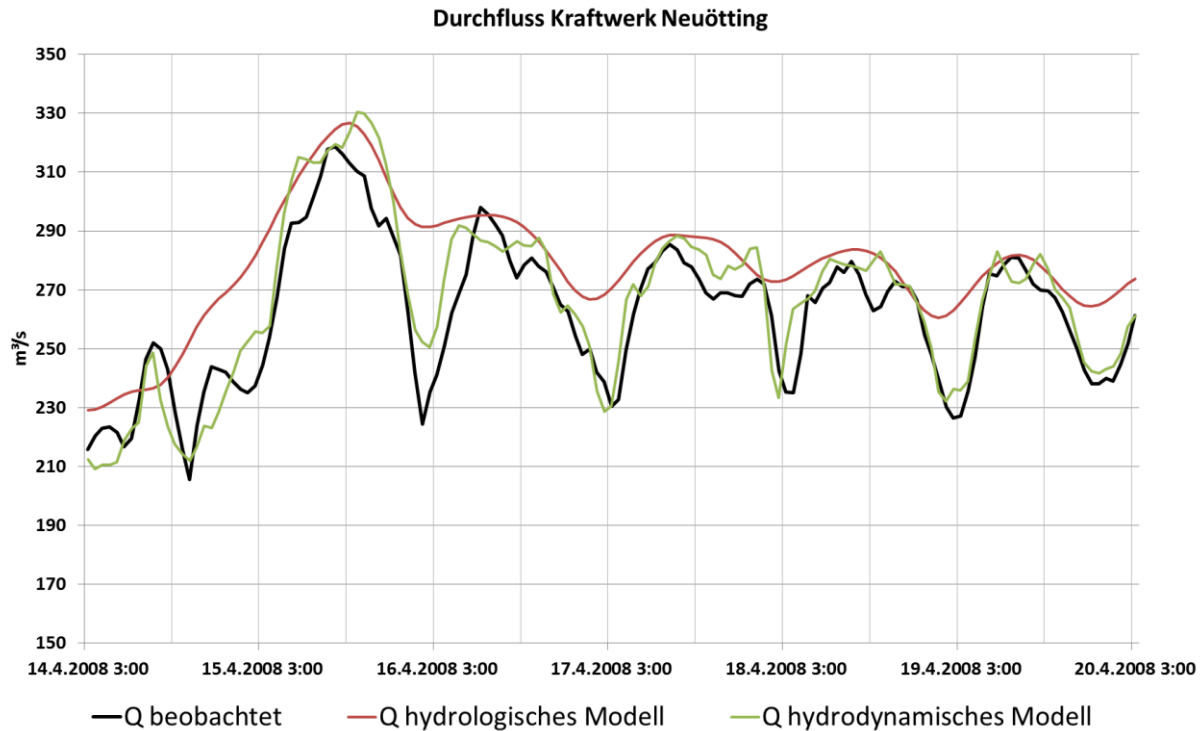
Die Strömungsberechnung mit dem Gesamtmodell erfordert die Festlegung von Übergangsbedingungen für die Wehranlagen der einzelnen Kraftwerke. Grundsätzlich wird an den Kraftwerken am bayerischen Inn das normale Stauziel im Oberwasser der Wehranlagen konstant gehalten. Für einige Anlagen existieren jedoch spezielle Wehrbetriebsordnungen, die eine Absenkung des Wasserspiegels bei höheren Abflüssen zur Einhaltung der bescheidgemäßen Höchstwasserspiegellagen und Freiborde der Stauhaltungsdämme und anderer Hochwasserschutzanlagen in den einzelnen Staugebieten bewirken. Zur Beschreibung der Wehrbetriebsordnungen im Modell wurden spezielle Programmierfunktionen der Software HEC-RAS verwendet. Mit Hilfe dieser Programmtools lassen sich die zum Teil komplexen Wehrsteuerungsvorgänge präzise als Randbedingungen für die Modellrechnungen formulieren.

Erste Testrechnungen mit dem oben beschriebenen hydrodynamischen Modell des bayerischen Inn für unterschiedliche Prognoseszenarien wurden bereits durchgeführt. Wie die Ergebnisse zeigen, ist das Modell in der Lage, ausreichend genaue Wasserspiegellagen und Abflüsse im gesamten Gewässerabschnitt für alle getesteten Konfigurationen zu berechnen. Dabei sind die Rechenzeiten der Simulationsläufe relativ kurz, was für ein Prognosesystem dieser Art ein wichtiges Kriterium darstellt. Außerdem erweist sich das Modell als äußerst robust und sehr stabil.

## 4 Ergebnisse

Das hydrologische Modell ist für den Zeitraum 1.10.2007 bis 30.09.2012 kalibriert, das hydrodynamische Modell für den Zeitraum 1.1.2009 bis 31.12.2013. Die folgenden Ergebnisse basieren auf einer Berechnung im Zeitraum 3.1.2008 bis 31.12.2008. Für das hydrologische Modell ist dieser Zeitraum noch durch die Kalibrierung abgedeckt, für das hydrodynamische Modell sind die Ergebnisse eine Validierung. Zur Beurteilung der Güte bzw. der Verbesserung mittels der neu geschaffenen Modelllandschaft für die Leistungsberechnung wird der Unterschied zwischen dem Abfluss im hydrodynamischen Modell mit dem modellierten Abfluss im hydrologischen Modell verglichen sowie den tatsächlich gemessenen Werten gegenüber gestellt.



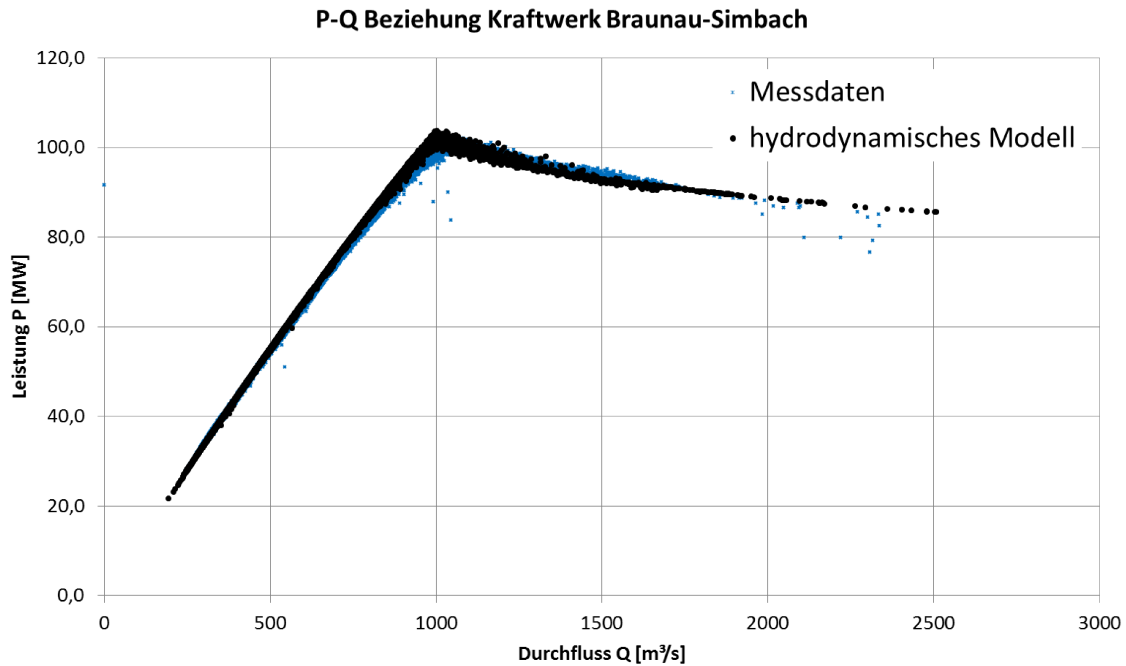


**Abbildung 4:** Vergleich der simulierten Abflüsse mit dem beobachteten Abfluss am Kraftwerk Neuötting

Abbildung 4 zeigt den Vergleich zwischen dem Abfluss aus dem hydrologischen Modell und dem hydrodynamischen Modell am Kraftwerk Neuötting. Das hydrodynamische Modell kann die Dynamik des Abflusses wesentlich besser nachbilden als das einfache Routing im hydrologischen Modell. Das ist insbesondere für die nachfolgende Leistungsberechnung wichtig, da dadurch die Energieproduktionsschwankung innerhalb eines Tages besser abgeschätzt werden kann. Das tatsächliche Potenzial dieser zeitlich hoch aufgelösten Information für die energiewirtschaftliche Day-Ahead Planung wird in den kommenden Jahren getestet. Bei diesen Tests steht insbesondere die Frage der Prognoseunsicherheit basierend auf den meteorologischen Grunddaten im Mittelpunkt.

Ein weitere Güteprüfung ist die Leistungs-Durchflussbeziehung (P-Q) aus der HEC-RAS Rechnung (errechnet als Funktion von Fallhöhe und Durchfluss mit konstantem Wirkungsgrad) und der tatsächlich gemessenen P-Q Beziehung.

Abbildung 5 zeigt diesen Vergleich für das Kraftwerk Braunau-Simbach. Es ist gut zu erkennen, dass die mit den Ergebnissen des hydrodynamischen Modells berechneten Leistungen sehr gut mit den beobachteten Daten übereinstimmen.



**Abbildung 5:** Vergleich der simulierten P-Q Beziehung mit Messdaten am Kraftwerk Braunau-Simbach.

Der Vergleich zeigt, dass die Leistungsberechnung auf Basis des 1D-Strömungsmodells in der für die energiewirtschaftliche Planung wesentliche Mittelwassersituation sehr gut geeignet ist und eine gute, von Approximationsgleichungen unabhängige, Methode ist.

## 5 Schlussfolgerungen & Ausblick

Die Auswertungen mit den Ergebnissen der Modellkombination aus hydrologischem und hydrodynamischem Modell für die Leistungsberechnung am Inn zeigen, dass das hydrodynamische Modell das Routing für die energiewirtschaftliche Planung wesentlich genauer simuliert als nur das hydrologische Modell. Ob dieser Genauigkeitserfolg nicht durch die Prognoseunsicherheit in den meteorologischen Eingangsdaten wieder aufgehoben wird ist aktuell noch nicht ausgewertet. Die nächsten Arbeitsschritte, die in diesem Zusammenhang umgesetzt werden, sind die operative Eingliederung in die von VERBUND genutzte Prognoseoberfläche FEWS (Werner, 2013). Die hydrologische und hydrodynamische Berechnung soll dann stündlich angestoßen werden. Für die Korrektur der simulierten Leistungsprognosen auf Basis historischer Modellfehler stellt sich die noch offene Frage, ob diese direkt an der Leistung oder an den Kraftwerksdurchflüssen erfolgen wird. Beide Methoden sind aus derzeitiger Sicht erfolgverspre-

chend. Das deutlich bessere Abflussrouting mit dem hydrodynamischen Modell ist auch im Hochwasserfall bzw. in der Hochwasserprognose eine wesentliche Aufwertung der bestehenden Prognosemodelle für den Inn bei VERBUND.

## 6 Literatur

- Kohane, R. (2008): Hydraulische Modellierung mit beweglicher Sohle für Stauhaltungen am Oberen Inn, Internationales Symposium „Neue Anforderungen an den Wasserbau“, Zürich, September 2008.
- Kohane, R. (2010): Stauraummanagement am Bayerischen Inn, 15. Gemeinschafts-Symposium der Wasserbau-Institute TU München, TU Graz und ETH Zürich „Wasserbau in Bewegung... von der Statik zur Dynamik“, Wallgau, 01. bis 03. Juli 2008.
- Kohane, R. (2013): 1D Sedimenttransport am Inn, 2. Darmstädter Ingenieurkongress - Bau und Umwelt, Technische Universität Darmstadt, 12. und 13. März 2013.
- Nachtnebel H.P., Haberl U., Stanzel Ph., Kahl B., Holzmann H., Pfaffenwimmer Th.: "Hochwasserprognose Salzach - Hydrologische Abflussmodellierung - Teil 3"; In Amt der Salzburger Landesregierung: HydriII Hydrologisches Informationssystem zur Hochwasservorhersage im Land Salzburg. Amt der Salzburger Landesregierung, 341, 2009
- Werner M., Schellekens J., Gijsbers P., van Dijk M., van den Akker O., Heynert K. (2013): The Delft-FEWS flow forecasting system, Environmental Modelling & Software, Volume 40, February 2013, Pages 65–77
- ZAMG: <http://www.zamg.ac.at/cms/de/forschung/wetter/inca>

Autoren:

Dipl.Ing. Ulrich Haberl  
Dipl.Ing. Dr. Petra Goldenits  
Dipl.Ing. Dr. Klaus Hebenstreit

Dr.-Ing. Roberto Kohane

VERBUND AG  
Am Hof 6a  
1010 Wien

Lahmeyer Hydroprojekt GmbH  
Regionalbereich West - Bad Vilbel  
Friedberger Straße 173  
D - 61118 Bad Vilbel

Tel.: +43 (0)50313-0  
Fax: +43 152 319  
E-Mail: [ulrich.haberl@verbund.com](mailto:ulrich.haberl@verbund.com)  
[petra.goldenits@verbund.com](mailto:petra.goldenits@verbund.com)  
[klaus.hebenstreit@verbund.com](mailto:klaus.hebenstreit@verbund.com)

Tel.: +49 (0) 6101 55 2416  
Fax: +49 (0) 6101 55 2417  
E-Mail: [roberto.kohane@de.lahmeyer.com](mailto:roberto.kohane@de.lahmeyer.com)