

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Leonhardt, Günther; Senfter, Stephan; Schöberl, Friedrich; Schönlaub, Helmut

Ein hybrider Ansatz zur adäquaten Berücksichtigung des Betriebs von Wehr- und Kraftwerksanlagen im Rahmen des Hochwasservorhersagemodells Inn

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/20.500.11970/103801>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Leonhardt, Günther; Senfter, Stephan; Schöberl, Friedrich; Schönlaub, Helmut (2006): Ein hybrider Ansatz zur adäquaten Berücksichtigung des Betriebs von Wehr- und Kraftwerksanlagen im Rahmen des Hochwasservorhersagemodells Inn. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Strömungssimulation im Wasserbau (Flow Simulation in Hydraulic Engineering). Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 32. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 23-30.

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.



Ein hybrider Ansatz zur adäquaten Berücksichtigung des Betriebs von Wehr- und Kraftwerksanlagen im Rahmen des Hochwasservorhersagemodells Inn

Günther LEONHARDT, Stephan SENFTER, Friedrich SCHÖBERL,
Helmut SCHÖNLAUB

Für den Inn in Tirol/Österreich und Bayern/Deutschland wird ein Hochwasservorhersagesystem auf Grundlage eines hybriden Ansatzes erstellt. Dazu werden hydrologische Modelle zur Ermittlung der Zuflüsse aus den Teileinzugsgebieten mit einem hydraulischen 1D-Modell zur Berechnung des Wellenablaufes im Inn kombiniert.

Die für das hydraulische Modell verwendete Software bietet die Möglichkeit, den Betrieb von Laufkraftwerken und Wehranlagen abzubilden. Dies erlaubt die vorausschauende Berücksichtigung der Regelungsvorschriften für Wehranlagen im Prognosemodell. Weiters steht ein Modul zur inversen Modellierung zur Verfügung, welches vor allem die Anpassung von Rauigkeitskoeffizienten im Rahmen der Modellkalibrierung erleichtert, insbesondere wenn Wasserspiegelmessungen an vielen Orten vorliegen. Es besteht jedoch auch die Gefahr, dass physikalisch unplausible Werte ausgewiesen werden, die der Rauheitsstruktur des Gerinnes widersprechen. In Kombination mit sorgfältigen, manuellen Änderungen können schnell gute Kalibrierungsergebnisse erzielt werden.

Flood Forecasting for the Inn River under Consideration of Power Plant Operations using a Hybrid Approach

A flood forecasting system to predict discharge and water level along the river Inn in Tyrol, Austria and Bavaria, Germany is developed as a hybrid system. Runoff from the main lateral valleys is computed with a hydrological model, while a 1D-hydrodynamic model is used to simulate the flood wave propagation in the river channel.

The hydraulic model is set up within a software-environment which provides the opportunity to represent the operation of run-of-river plants and weirs by the help of an integrated controller. Another important feature is the inverse modeling function, which is applied to identify roughness coefficients during the calibration-process. This facilitates the model calibration, but can lead to physically unreasonable values of the roughness coefficients. In combination with careful manual changes, numerical instabilities can be avoided and good calibration results achieved.

1 Einleitung

Der Inn ist der Hauptfluss Tirols und eines der bedeutendsten Fließgewässer Bayerns. Vor allem im Bayerischen Abschnitt, aber auch in Tirol wird das Abflussgeschehen durch die Wasserkraftnutzung mit Laufkraftwerken beeinflusst.

Zur Verbesserung der Hochwasserprognosen werden für den Tiroler sowie den Bayerischen Abschnitt des Inn derzeit Vorhersagemodelle erstellt, die als Kombination aus hydrologischen und hydraulischen Modellen sowie eines meteorologischen Moduls aufgebaut sind. Dieser hybride Ansatz bietet sich an, da einerseits für den Flusslauf des Inn entsprechend gute Daten in hoher räumlicher Auflösung für die hydraulische Modellierung zur Verfügung stehen, andererseits Eingriffe in das Abflussgeschehen, z.B. durch Laufkraftwerke, mit hydrologischen Ansätzen zur Berechnung des Wellenablaufes nicht berücksichtigt werden können.

2 Hydraulisches Modell

Für die über 400km lange Fließstrecke des Inn zwischen der Grenze Schweiz – Österreich und der Mündung in die Donau werden eindimensionale hydraulische Modelle mit der Software Flux^{DSS/DESIGNER} der Firma SCIETEC erstellt. Als Kern verwendet diese das Programm FLORIS2000 (Reichel und Baumhackl 2000).

Neben den für 1D-Programme üblichen Berechnungen bietet die Software die Möglichkeit, den Betrieb und die Regelung von Flusskraftwerken im Modell abzubilden, sowie diverse Parameter mittels inverser Modellierung zu bestimmen bzw. abzuschätzen. Weiters können verschiedene Schnittstellen zum Datenaustausch eingerichtet werden, weshalb sie auch schon bei anderen Vorhersagesystemen eingesetzt wurde (z.B. Kanne et al. 2002).

3 Kraftwerksregelung

Eine essentielle Aufgabe des hydrodynamischen Modells für das Hochwasserprognosesystem besteht darin, die Beeinflussung des Wellenablaufs am Inn im Voraus möglichst gut abzubilden. Der Betrieb der am Inn liegenden Wasserkraftwerke beeinflusst im Hochwasserfall das Abflussgeschehen vor allem für die stromabwärts liegenden Abschnitte in wesentlicher Weise.

Als interner Regelalgorithmus wird ein PID-Ansatz (Proportional-Integral-Differential Ansatz) mit Störgrößenaufschaltung und Sollwertbeobachtung

verwendet. Eine Besonderheit dieses Ansatzes liegt darin, dass neben der aktuellen Störgröße eine erwartete Störgröße für den nächsten Zeitschritt berücksichtigt werden kann, die auf der Entwicklung der Störgröße in einer frei zu wählenden Anzahl vorausgehender Zeitschritte basiert (Reichel und Baumhackl 2000).

3.1 Wehrbetrieb Kraftwerk Kirchbichl

Das Kraftwerk Kirchbichl ist seit 1941 in Betrieb und nutzt bei einer Ausbauwassermenge von $300\text{m}^3/\text{s}$ eine Fallhöhe von maximal $9,70\text{m}$. Das Krafthaus liegt am Ende des etwa 1km langen Zuleitungskanals, der die Inn-Schleife Kirchbichl abschneidet.

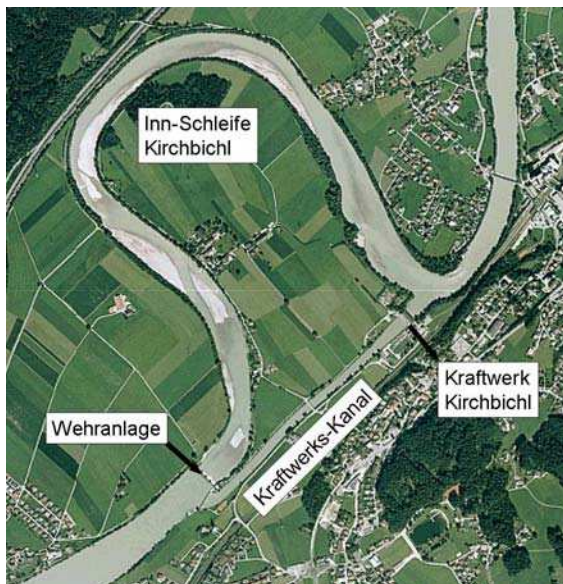


Abbildung 1 Übersicht: Kraftwerk Kirchbichl mit Wehranlage, Kraftwerkskanal und Kraftwerk, Inn-Schleife (Orthophoto: Land Tirol/tiris)

Eine Besonderheit des Wehrbetriebes Kirchbichl liegt darin, dass an 2 Knoten (Wehranlage bei der Abzweigung des Kanals vor der Inn-Schleife, Kraftwerk am Kanal) parallel Regelungsbewegungen durchzuführen sind:

- Bis zu einem Abfluss von $700\text{m}^3/\text{s}$ am Oberlieger-Pegel Brixlegg ist die Regelung des Wasserstandes am Kraftwerk auf $497,00\text{m}$ ü.M. maßgeblich. Dabei wird über die Inn-Schleife nur jener Abfluss abgegeben, der über die Ausbauwassermenge von $300\text{m}^3/\text{s}$ hinausgeht.
- Ab einem Abfluss von $700\text{m}^3/\text{s}$ muss der Kraftwerksbetrieb eingestellt und der Stau an der Wehranlage im Inn gelegt werden. Von diesem Zeitpunkt an geht die Regelungs-Priorität auf die Wehranlage am Inn über.

Die Kombination der Wehrbetriebsordnungen am Kraftwerk Kirchbichl wurde anhand mehrerer Ganglinien auf Stabilität und auf die Abweichung von den Soll-Werten geprüft. Die nachfolgenden Diagramme zeigen einen Vergleich der Durchflussganglinien am Beginn des Teilmodells (Pegel Brixlegg, ca. $18,5\text{km}$

stromaufwärts), im Kraftwerks-Kanal, in der Inn-Schleife und unmittelbar nach dem Zusammenfluss der Innschleife mit dem Unterwasserkanal.

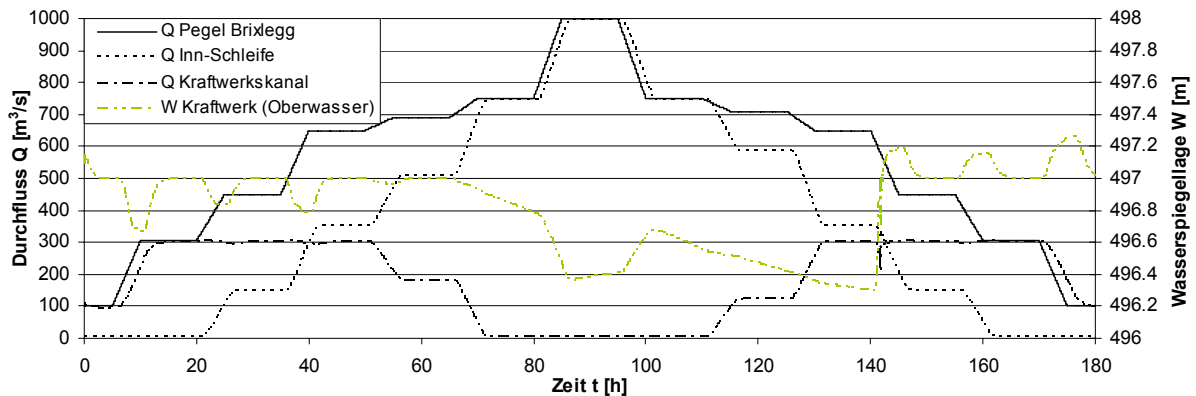


Abbildung 2 Ganglinien des Durchflusses beim stromaufwärts liegenden Pegel Brixlegg und unterhalb der Kraftwerksanlage; Ganglinie des Wasserstandes beim Kraftwerk Kirchbichl (Oberwasser)

Für Abbildung 2 wurde als Modell-Input eine fiktive, gestufte Ganglinie verwendet, um die Wehrbetriebs-Vorgaben im Modell für definierte Zuflüsse unter quasi-stationären Bedingungen zu testen. In Abhängigkeit des Durchflusses am Pegel Brixlegg zwischen $650\text{m}^3/\text{s}$ und $750\text{m}^3/\text{s}$ wird der Kraftwerksdurchfluss von $300\text{m}^3/\text{s}$ auf $5\text{m}^3/\text{s}$ reduziert. Durch den Mindestdurchfluss von $5\text{m}^3/\text{s}$ wird die Verwendung des effizienteren Finite-Differenzen-Schemas ermöglicht.

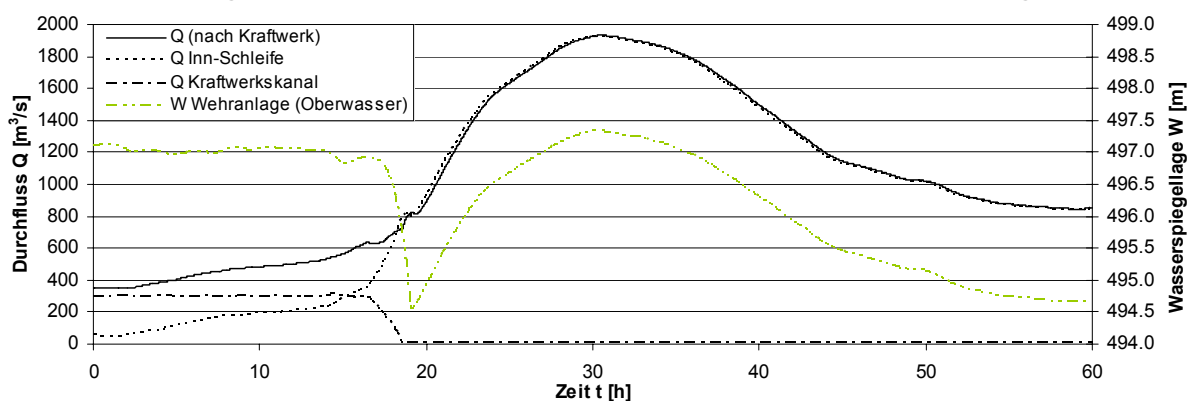


Abbildung 3 Ganglinien des Durchflusses im Kraftwerkskanal, in der Inn-Schleife und unterhalb der Kraftwerksanlage; Ganglinie des Wasserstandes beim Wehr Kirchbichl (Oberwasser)

Für Abbildung 3 ist als Input-Datensatz die Hochwasser-Ganglinie vom 23.08.2005 am Pegel Brixlegg verwendet worden. Gut erkennbar ist die Einstellung des Kraftwerksbetriebes (Reduktion des Durchflusses im Kraftwerkskanal) und die Staulegung bei $t \approx 17\text{h}$. Der nachfolgende Anstieg des Wasserstandes ist durch die hydraulische Leistungsfähigkeit des Gerinnes vorgegeben. Der Wiederaufstau erfolgt erst nach einem weiteren Rückgang des Durchflusses am Inn.

3.2 Erfahrungen

Die Abbildung und vor allem die Optimierung und Validierung komplexer Wehrbetriebsordnungen im hydraulischen Modell ist trotz der anwendungsorientierten Bedienung in der Software mit einigem Aufwand verbunden. Eine Vielzahl von Einflussfaktoren (Wehrbetriebsordnungen, Messorte, Beobachtungspunkte, Regelungsparameter, Rechenzeitschritte, Störgrößen,...) muss berücksichtigt werden, um einen Parametersatz zu finden, der den sehr unterschiedlichen Anforderungen verschiedener Input-Hydrographen gerecht wird.

4 Inverse Modellierung

Mit der Funktion der inversen Modellierung können verschiedene Modellparameter durch Lösung des inversen Problems automatisch ermittelt bzw. geschätzt werden.

Die Methode wird in der Grund- und Bodenwassermodellierung oft verwendet (z. B. Olyphant 2003), aber auch Anwendungen in der hydraulischen Modellierung sind bekannt (z.B. Sulzer et al. 2002, Ding et al. 2004). Weiters kann diese Funktion auch zur Verbesserung und Vervollständigung von Messdaten eingesetzt werden (Reichel und Trösch 2003).

In der verwendeten Software ist ein indirektes Verfahren für die inverse Modellierung implementiert. Dabei werden die Systemgleichungen wiederholt gelöst und mittels Optimierung die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten minimiert. Dies erfolgt durch die Definition einer zu minimierenden Zielfunktion, die die Quadratsumme der gewichteten Residuen der Wasserspiegelmessungen ausdrückt. Durch die Gewichtung können Informationen über Messfehler eingebracht sowie Parametervorkenntnisse berücksichtigt werden. Als Optimierungsverfahren wird der Algorithmus von Marquardt-Levenberg eingesetzt (Reichel und Baumhackl 2000).

Als Eingangsdaten werden Messwerte zu einem bestimmten Zeitpunkt und eine zugehörige Standardabweichung zur Berücksichtigung von Messfehlern, Anfangswerte und Vorkenntnisse für die zu optimierenden Parameter sowie zu letzteren die Standardabweichung zur Bewertung der Qualität benötigt.

In der hier behandelten Arbeit wurde die inverse Modellierung zur Ermittlung der Rauigkeitskoeffizienten im Rahmen der Modellkalibrierung eingesetzt. Als „Messwerte“ dienten Wasserspiegellagen für die Bemessungsabflüsse HQ_{30} und HQ_{100} , die mit einem früheren numerischen Modell für sämtliche Querprofile ermittelt wurden (TIWAG 1999-2003). Als Abflussszenarien wurden stationäre Bedingungen gewählt.

4.1 Manuelle Kalibrierung versus inverse Modellierung

Die Unterschiede zwischen beiden Methoden werden am Beispiel des Abschnittes Rotholz - Brixlegg am Tiroler Inn aufgezeigt. Dieser ist 8km lang, seine Geometrie ist durch 15 vermessene Querprofile definiert, für die auch Wasserspiegellagen für HQ₃₀ und HQ₁₀₀ bekannt sind. Das mittlere Sohlgefälle beträgt 1,1‰, die Bemessungsabflüsse liegen im Bereich zwischen 1390 und 1800m³/s. Einen Längenschnitt des Abschnittes zeigt Abbildung 4.

Als Ausgangswert wurde die Rauigkeit in allen Querprofilen auf $k_{st} = 35\text{m}^{1/3}/\text{s}$ gesetzt. Ziel der Kalibrierung war, bei beiden Abflusszenarien (HQ₃₀ und HQ₁₀₀) Abweichungen kleiner bzw. gleich $\pm 0,3\text{m}$ zu erreichen. Weiters wurden als Kriterium für die Qualität verschiedener Parametersätze die Standardabweichungen der Differenzen herangezogen sowie die Längenschnittdarstellungen der Wasserspiegel visuell betrachtet.

Bei der manuellen Kalibrierung (MK) waren über 5 Schritte notwendig, um gute Ergebnisse mit Abweichungen innerhalb der gewünschten Grenzen zu erhalten. Die Anzahl der zur Kalibrierung notwendigen Schritte ist natürlich von der Erfahrung und den Anfangswerten abhängig.

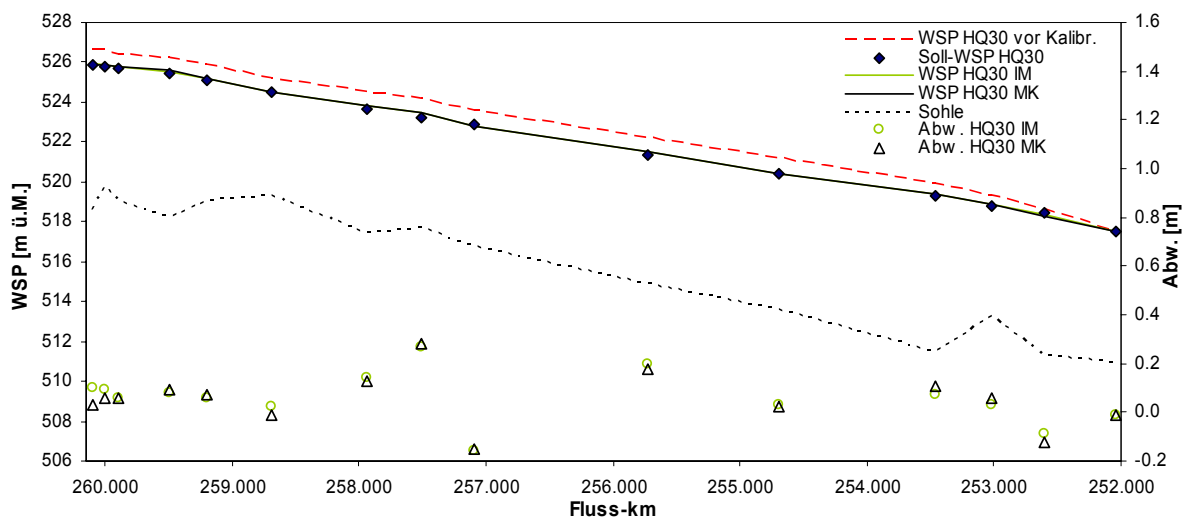


Abbildung 4 Längenschnitt des Abschnittes Rotholz – Brixlegg mit den Wasserspiegelverläufen vor und nach der Kalibrierung mit verschiedenen Methoden, Soll-WSP-Lagen für HQ₃₀ sowie Abweichungen von den Soll-Lagen

Bei der inversen Modellierung (IM) wurde für alle Querprofile entsprechend den obigen Ausgangswerten als Vorkennnis $k_{st} = 35\text{m}^{1/3}/\text{s}$ gewählt, als Messwerte wurden in verschiedenen Simulationen die Wasserspiegelhöhen für HQ₃₀ bzw. HQ₁₀₀ sowie beide zusammen vorgegeben. In allen Fällen lieferten die mit der ersten Optimierung ermittelten Parameter für beide Abflusszenarien Abweichungen innerhalb der gewünschten Grenzen. Für einige Profile ergaben sich hohe k_{st} -Werte, jedoch wurde $46\text{m}^{1/3}/\text{s}$ als obere Grenze festgelegt, was für diesen Abschnitt als physikalisch plausibel erscheint. Daher wurden höhere Werte

durch $k_{st} = 46 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ersetzt, aber auch dann blieben die Abweichungen der Wasserspiegel von den Soll-Werten kleiner $\pm 0,3 \text{ m}$.

Abbildung 4 zeigt die mit den ermittelten Parametern für den Bemessungsabfluss HQ_{30} berechneten Wasserspiegellagen. Die Variabilität der durch inverse Modellierung bestimmten k_{st} -Werte ist erwartungsgemäß größer als jene der manuell angepassten, die grundsätzliche Charakteristik ist aber im Großteil des Abschnittes ähnlich (vergl. Abbildung 5). Die ermittelten Parametersätze wurden mit Durchflussdaten und Wasserspiegelbeobachtungen des Hochwasserereignisses 1985 verifiziert.

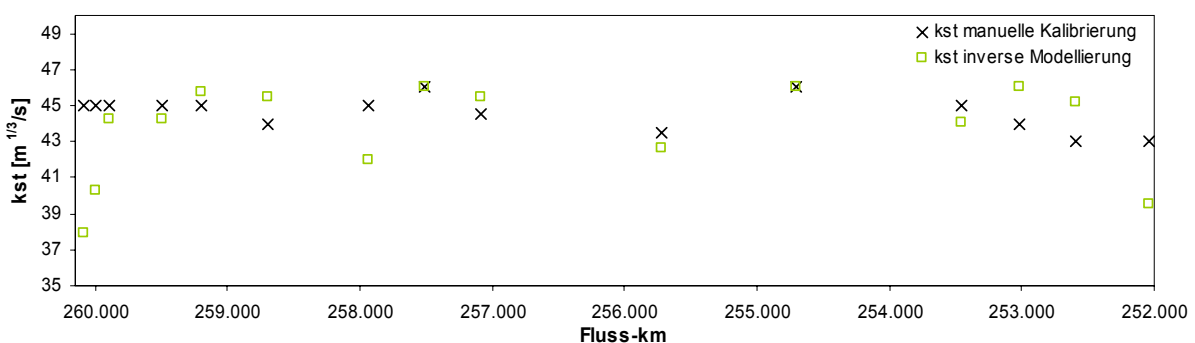


Abbildung 5 Mit den verschiedenen Kalibrierungsmethoden ermittelte k_{st} -Werte.

4.2 Lokale Verbesserungen der Kalibrierung

In manchen Fällen führt eine Kalibrierung mittels inverser Modellierung für einzelne Querprofile oder kurze Teilabschnitte nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Für die weitere Optimierungen der Parameter in diesen Bereichen hat sich die inverse Modellierung nicht bewährt, bessere Ergebnisse konnten durch eine manuelle Veränderung der k_{st} -Werte erzielt werden.

5 Schlussfolgerungen

Der Beitrag der Regelung von Wehranlagen an der Beeinflussung des Wellenablaufes ist vor allem in den ersten Stunden der prognostizierten Ganglinie wesentlich, da sich die Vorhersage in diesem Zeitraum vorwiegend auf die Daten der hydraulischen Modellierung stützt. Optimierungen im Bereich der Abbildung eines regelbasierten Kraftwerksbetriebes sind deshalb in zweierlei Hinsicht von Bedeutung: Einerseits kann dadurch die Prognosegenauigkeit in den ersten Stunden erheblich verbessert werden, andererseits kann durch die Möglichkeit der Simulation verschiedener Szenarien eine Optimierung von Betriebsregeln für Kraftwerke im Hochwasserfall erreicht werden.

Prinzipiell können mittels manueller Kalibrierung ähnlich gute Ergebnisse wie mit der Anwendung der inversen Modellierung erreicht werden, letztere kann jedoch die Modellkalibrierung in großem Maße erleichtern, indem sie schnell zu guten Parametersätzen führt. In manchen Fällen ist eine lokale Verbesserung notwendig, wofür sich jedoch eine manuelle Korrektur der Parameter besser eignet. Die Möglichkeit, Grenzen für die zu ermittelnden Parameter festlegen zu können, würde eine weitere Verbesserung dieses Instruments darstellen.

6 Literatur

- Ding, Y. Jia, Y. Wang, S.S.Y.: Identification of Manning's Roughness Coefficients in Shallow Water Flows, J. of Hydraulic Engineering, Vol. 130, No. 6, 2004
- Kanne, S. Meier, R.Cl. Reichel, G. Schmid, M.: Hochwasserschutz und -management am Lech, Int. Symp. Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau, Zürich, 2002
- Olyphant, G.A.: Temporal and spatial (down profile) variability of unsaturated soil hydraulic properties determined from a combination of repeated field experiments and inverse modeling, J. of Hydrology 218, 23-35, 2003
- Reichel, G. Baumhackl, G.: A New Simulation Tool for Flood Routing in Man-controlled River Systems Focusing on to the Needs of Operational Hydrology, International Symposium on Flood Defense, Kassel, 2000
- Reichel, G. Trösch, J.: Die Verwendung von Numerischen Modellen zur Verbesserung und Erweiterung der Aussagekraft von Messdaten, Hydrographentag 2003 der Deutschen Hydrographischen Gesellschaft, Wien, 2003
- Sulzer, S., Rutschmann, P. Kinzelbach, W.: Flood Discharge Prediction using Two-Dimensional Inverse Modeling, J. of Hydraulic Engineering, Vol. 128, No. 1, 2002
- TIWAG – Tiroler Wasserkraft AG, Bautechnik – Abteilung Wasserbau: Schutzwasserwirtschaft Inn, Ermittlung der Ausuferungsbereiche bei einem HQ₁₀₀ bzw. HQ₃₀ Hochwasserereignis, Technischer Bericht, Innsbruck, 1999-2003

Autoren:

DI Günther Leonhardt
 DI Stephan Senfter
 alpS - Zentrum für Naturgefahren
 Management GmbH
 Grabenweg 3
 A 6020 Innsbruck, Österreich
leonhardt@alps-gmbh.com
 Tel.: +43/512/392929-38

A.o. Univ-Prof. Dr. DI Friedrich Schöberl
 Institut für Geographie, Universität Innsbruck,
 Österreich

Dr. DI Helmut Schönlaub
 TIWAG – Tiroler Wasserkraft Aktiengesellschaft,
 Innsbruck, Österreich