

Sensitivitätsanalyse und Kalibrierung von hydrodynamischen Simulationen Am Beispiel des KW Gries an der Salzach

M. Goldgruber¹ und G. Harb²

¹ Dynardo Austria GmbH, Wagenseilgasse 14, 1120 Wien, Austria

² Verbund Hydro Power, Wien, Austria

Email: markus.goldgruber@dynardo.at, gabriele.harb@verbund.com

Kurzfassung

Numerische hydrodynamische Simulationen sind im Bereich der Fließgewässermodellierung oder bei hydraulischen Fragestellungen in den letzten Jahren zum Stand der Technik geworden. Die Kalibrierung dieser Simulationen ist aufgrund der zunehmenden Komplexität der Modelle oft ein zeitaufwendiges Unterfangen.

Mit Hilfe von statistischen Methoden ist es möglich, die relevanten Parameter zur Kalibrierung/Optimierung des Simulationsmodells hinsichtlich Messungen zu identifizieren und reduzieren. Die Grundlage der Analyse ist ein parametrisiertes numerisches Modell der Unterwasserstrecke des momentan in Bau befindlichen KW Gries an der Salzach. Für die Durchführung der Kalibrierung wird mit dem Programm optiSLang[®] eine Sensitivitätsanalyse mit Latin Hypercube Sampling durchgeführt. Dabei werden 100 Designs (Parameterkombinationen) mit dem Programm TELEMAT-2D[®] gerechnet und automatisiert mit optiSLang[®] ausgewertet. Basierend darauf liefert optiSLang[®] ein Metamodell, das eine sekundenschnelle Kalibrierung und Echtzeitauswertung der Ergebnisse ermöglicht. Zusätzlich zu dem kalibrierten numerischen Modell wird mittels Feldmetamodellen bestimmt, welcher Parameter (Durchfluss, Rauigkeit, etc...) wo am betrachteten Flusslauf den größten Einfluss hat (z.B. Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, etc.). Das umgesetzte Projekt zeigt, dass mit einer Software wie optiSLang[®], zur Erstellung von Workflows und automatisierten Auswertungen von hunderten Simulationen, eine Kalibrierung schnell und einfach möglich ist. Dazu liefert es Erkenntnisse über die Sensitivitäten des Modells bezüglich aller Parameter und ein Metamodel, das eine Echtzeitauswertung der Ergebnisse ermöglicht.

Diese Art der Analyse mit optiSLang[®] lässt sich auf allgemeineren Problemstellungen, d.h. einer höheren Anzahl an Parametern, mehreren unterschiedlich verteilten Reibungswerten über den Flusslauf, sowie Geometrieänderung (Buhnen, Schleusen, Pfeiler, etc.) genauso anwenden. Dadurch lassen sich Optimierungen, hinsichtlich der Strömungssituation, Geschiebetransport, Einlaufbauwerke, etc. problemlos durchführen.

Einleitung

Seit Beginn des 20. Jhdts. wurden zunehmend physikalische Modelle verwendet, um Prozesse in Flüssen und Gerinnen zu analysieren und zu verbessern. Aufgrund der rasanten Entwicklung der Computational Fluid Dynamics (CFD) in den letzten Jahrzehnten ist die Verwendung von hydrodynamischen bzw. morphologische Modelle zum Stand der Technik geworden. Die zunehmende Computerleistung, die verbesserte Parallelisierung der Programme und die Verfügbarkeit von Highperformance-Clustern (HPC) haben zu einer enormen Weiterentwicklung der Programme und Modelle geführt. Die Möglichkeit zur Berechnung von Large-Eddy-Simulationen oder Direct Numerical Simulations sind ein Beispiel dafür.

Die automatische Kalibrierung von hydrodynamischen Modellen ist aber noch kaum entwickelt, bzw. wird aufgrund fehlender Werkzeuge, geringer Kalibrierungs- und

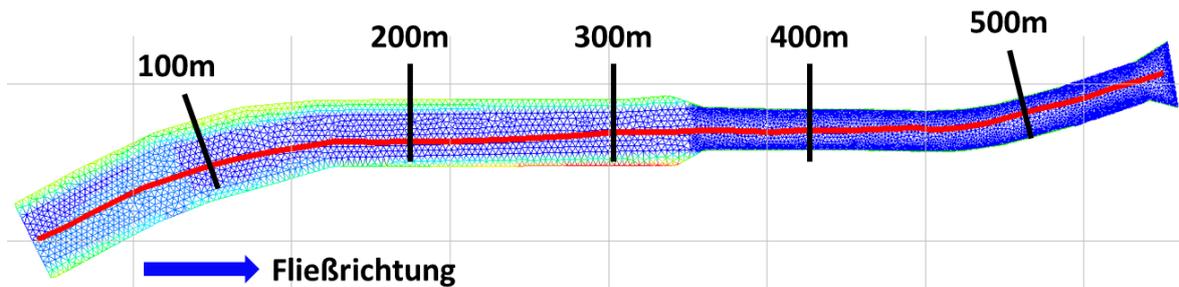


Abbildung 2: Vernetzung, Polylinie (rot) und Stationierung

Sensitivitätsanalyse

Bevor die automatische Kalibrierung des hydrodynamischen Modells beginnt, wird eine Sensitivitätsanalyse mit 100 Berechnungen des Simulationsmodells durchgeführt. Diese erfolgt mittels variationsbasierter Korrelationsanalyse mit dem Programm optiSLang® [6]. Das in optiSLang® verfügbare stochastische Advanced-Latin-Hypercube-Sampling [6] wird für die Erstellung der Parameterkombinationen der 100 Designs verwendet. In Tabelle 1 sind die im Modell variierten Parameter aufgelistet. Die Reibungskoeffizienten werden als Strickler-Beiwerte im Modell definiert. Weiters werden 5 unterschiedliche Turbulenzmodelle in den Berechnungen verwendet. Dabei handelt es sich in TELEMAC-2D® [9], entsprechend den Nummern, um die folgenden Turbulenzmodelle:

1. Constant Viscosity Model
2. Elder Model
3. K-Epsilon Model (mit Option 2: Rough wall boundaries)
4. Smagorinski Model
5. Dorfmann Model [3]

Tabelle 1: Parametervariation

Parameter	Einheit	Min	Max
Initielle Wassertiefe	m	738	743
Reibungskoeffizient im Flussbett	$m^{1/3}/s$	10	100
Reibungskoeffizient am Flussufer	$m^{1/3}/s$	10	100
Turbulenzmodell	-	1, 2, 3, 4, 5	
Geschwindigkeits-Diffusivität (Turbulenzmodell 1)	-	0.5	2.0
Geschwindigkeits-Diffusivität (Turbulenzmodelle 2, 3, 4, 5)	-	10^{-6}	

Für die Analyse der Sensitivitäten und in weiterer Folge für die Kalibrierung, wurden mehrere Ergebnisse entlang des Flusslaufs definiert:

Tabelle 2: Berechnete Ergebnisgrößen

Ergebnisgröße
Maximale Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit
Minimale Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit
Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit nach 100, 200, 300, 400, 500 Meter
Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit nach 100, 200, 300, 400, 500 Meter
Maximale Courant Number
Verlauf des Wasserspiegels entlang des Fließgewässers
Verlauf der Fließgeschwindigkeit entlang des Fließgewässers
Verlauf der Courant Number entlang des Fließgewässers

Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätswerte sind als Coefficients of Prognosis (COP) in Abbildung 3 zusammengefasst. Die CoP wurde erstmals 2008 von Most und Will [8] eingeführt, einer modellunabhängigen Messgröße zur Beurteilung der Modellqualität. Diese Werte sind ein direktes Ergebnis und Ausdruck der Simulationen in optiSlang[®], die ein ausgezeichnetes Maß für die wichtigsten Parameter einer Sensitivitätsanalyse liefern.

In Abbildung 3 ist die gesamte CoP-Matrix der Sensitivitätsanalyse dargestellt. Die Eingangsparameter und Ergebnisse werden darauffolgend mittels komplexen Regressionsmethoden miteinander in Zusammenhang gebracht, wodurch ein sogenanntes Metamodell (mathematisches Ersatzmodell) entsteht, kurz MOP (Metamodel of Optimal Prognosis [8]) genannt.

Die rechte Spalte beschreibt dabei die Qualität des erstellten Metamodells. Das heißt, je höher der Wert (max. 100%), desto besser kann das Ergebnis (z.B. die Wassertiefe bei 500m) ohne zusätzlichen numerischen Rechenaufwand (Neuberechnung des Simulationsmodells) vorausgesagt werden.

In Abbildung 3 ist beispielsweise zu erkennen, dass die beiden Parameter *ini_depth* und *rough_coef* (Reibungskoeffizient am Flussufer) so gut wie keinen Einfluss auf die Ergebnisse haben (alle CoP-Werte nahe null). Die Wassertiefen sind hauptsächlich vom Turbulenzmodell beeinflusst (CoP=80%). Bei den Fließgeschwindigkeit teilen sich die Sensitivitäten gleichmässig auf das Turbulenzmodell und den Reibungskoeffizienten auf, außer bei Station 500m, wo der Einfluss der Reibung (CoP=73.6%) höher ist. Der Geschwindigkeits-Diffusivitäts-Parameter bei fast allen Ergebnissen einen leichten Einfluss. Es sei anzumerken, dass die minimale Tiefe einen vergleichsweise geringen CoP-Wert aufweist, da dieses Ergebnis durch die Querschnittsverringering im Flusslauf beeinflusst ist und es dabei zu starken Schwankungen (sog. Rauschen) kommt.

Abbildung 4 zeigt die Response Surface Plots der beiden Ergebnisgrößen Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit bei 500m. Anhand dieser beiden Plots ist sehr gut der Einfluss des Turbulenzmodells und Reibungskoeffizienten zu erkennen.

Abbildung 5 stellt die Verläufe der Wassertiefe und der Fließgeschwindigkeit, farblich sortiert je nach Turbulenzmodell, über den 500m langen Flusslauf dar. Hier sei anzumerken, dass die Wassertiefe bei Turbulenzmodell 1 am Anfang viel höher ist als bei allen anderen. Zusätzlich gibt es bei Modell 1 einen fast sprunghaften Anstieg der Fließgeschwindigkeit am Ende des Flusslaufs. Im Allgemeinen ist zu erkennen, dass knapp vor 300m eine Verengung des Flussprofils stattfindet, da dort die Fließgeschwindigkeiten plötzlich stark ansteigen und zugleich die Wassertiefe sinkt.

Analog zu den CoP-Werten, welche auf Bewertungen von skalaren Größen begrenzt sind, können auch sogenannte Feldmetamodelle erstellt werden. Mit Hilfe der Software SoS (Statistics on Structures [7]) werden diese Felddaten (2- und 3-dimensional räumlich und zeitlich verteilte Daten), z.B. Fließkurven entlang eines Pfades oder eine Fließgeschwindigkeitskontur am gesamten Modellnetz analysiert und dafür ein Feldmetamodell erstellt. Beispielsweise lässt sich damit erschließen, welcher Parameter wo im Modell am meisten Einfluss hat.

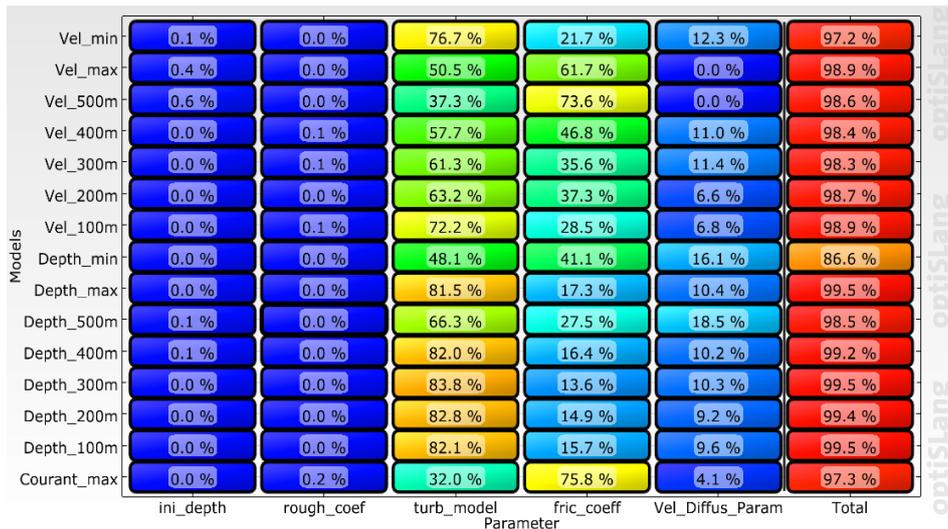


Abbildung 3: CoP Matrix der Sensitivitätsanalyse

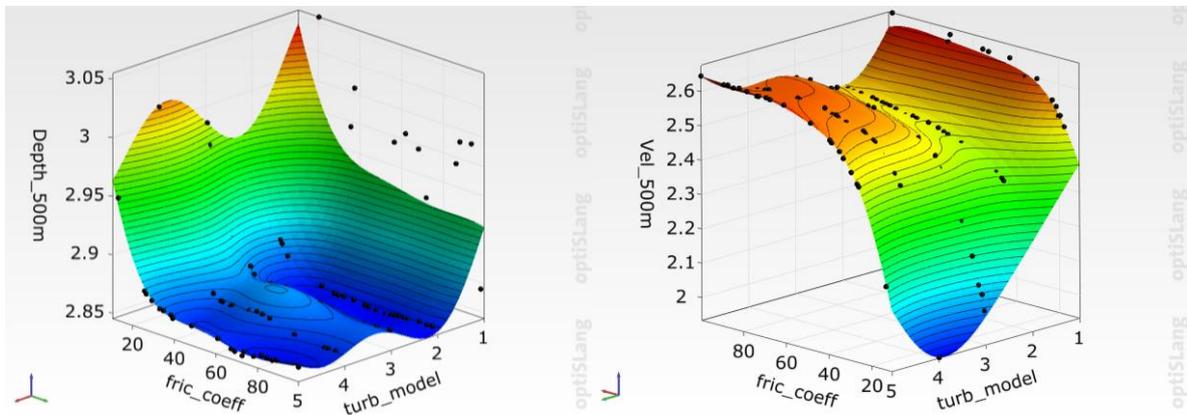


Abbildung 4: Response Surface Plot für die Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit bei 500m

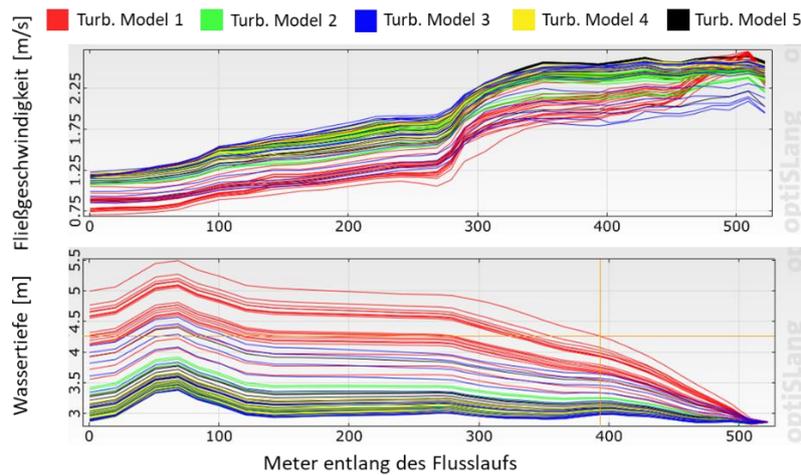


Abbildung 5: Verlauf der Tiefe und der Fließgeschwindigkeit entlang des Fließgewässers

In Abbildung 6 ist die Auswertung der F-CoP (Field Coefficients of Prognosis) Verläufe der Wassertiefe und der Fließgeschwindigkeit über den 500m langen Flusslauf dargestellt. Anhand des Fließgeschwindigkeitsverlaufs ist zu erkennen, dass der Reibungskoeffizient über die Länge immer mehr Einfluss gewinnt und es am Ende des Simulationsmodells zu einem

Wechsel der Dominanz der beiden Parameter kommt. Es sei zu erwähnen, dass es am Ende des simulierten Flusslaufs einerseits aufgrund der Fließquerschnittsvergrößerung und andererseits durch das Modellende zu numerischen Instabilitäten kommt und deshalb auch der Totale CoP-Wert nach unten fällt und damit auch die Beschreibbarkeit der Simulation mit dem Metamodell.

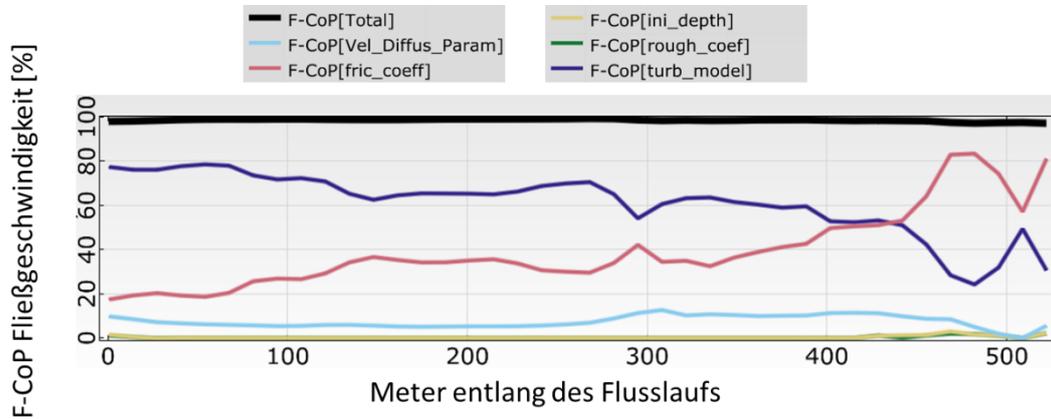


Abbildung 6: F-CoP Verlauf der Fließgeschwindigkeit entlang des Fließgewässers

Automatische Kalibrierung

Bei realen Problemstellungen liegen Sollwerte des zu analysierenden Flusslaufs vor. Dadurch liegt es nahe, das erstellte Simulationsmodell mit den vorhandenen Daten zu kalibrieren. Bei den Werten handelt es sich um Wassertiefen an 3 bestimmten Stellen entlang des Flusslaufs. Folgende Sollwerte der Wassertiefen ergeben sich am Fluss:

- 100m $\rightarrow t_{100} = 3.50$ m
- 200m $\rightarrow t_{200} = 3.31$ m
- 400m $\rightarrow t_{400} = 3.10$ m

Als Zielfunktion für die Kalibrierung wird die euklidische Norm der Differenz zwischen den Sollwerten und der Simulation an diesen 3 Punkten herangezogen.

$$e_{norm} = \sqrt{(t_{100,M} - t_{100,S})^2 + (t_{200,M} - t_{200,S})^2 + (t_{400,M} - t_{400,S})^2} \rightarrow Min \quad (1)$$

Mit der Minimierung dieser Zielfunktion soll ein Set an Parameterwerten aus Tabelle 1 resultieren, dass im Simulationsmodell dieselben Tiefen ergibt wie jene, die am auftreten. Die hohen CoP-Werte (Maß für die Qualität des Metamodells) aus der Sensitivitätsanalyse erlauben es, das zuvor generierte Metamodell für die Kalibrierung heranzuziehen. Das bedeutet, es muss dafür keine weitere Finite Elemente Simulation durchgeführt werden, da die Ergebnisse bei unterschiedlichen Parameterkombination direkt am Metamodell in Sekundenschnelle ausgewertet werden können. Für die Minimierung wird ein Evolutionäre Algorithmus verwendet, um den Designraum entsprechend großflächig abzutasten und somit zu vermeiden, dass sich der Algorithmus in einem lokalem Minimum verirrt. Die Kalibrierung erfolgt vollautomatisch und führt, nach finden eines Minimums an Abweichung, eine nachgeschaltete Kontrollrechnung am hydrodynamischen Simulationsmodell durch, um die Ergebnisse auf Basis der Metamodell-Kalibrierung zu verifizieren. Abbildung 7 zeigt den in optiSLang[®] umgesetzten Workflow, der die Kalibrierung nach dem Einlesen des Simulationsmodells und der Parameterdefinition vollautomatisch durchführt.

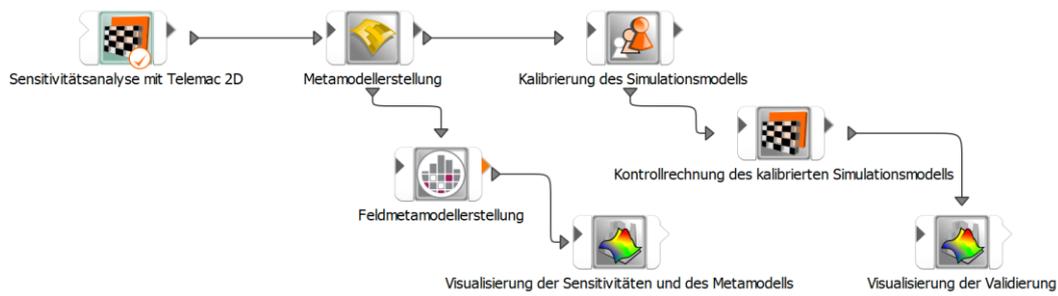


Abbildung 7: Automatischer Workflow zur Modellkalibrierung

Am Metamodell wurden in weniger als einer Minute 1000 Berechnungen durchgeführt, wobei das Design 680 den besten Abgleich zwischen den Sollwerten und der Simulation ergab. Nachdem die Kalibrierung und Kontrollrechnung abgeschlossen ist, erhält man das Parameterset (siehe Tabelle 3), reduziert um die unwichtigen Parameter aus der Sensitivitätsanalyse, für das hydrodynamische Simulationsmodell in TELEMAC-2D®, welches Simulationsergebnisse der 3 Wassertiefen liefert, die so gering wie möglich von den Sollwerten abweichen. Neben den Reibungskoeffizienten im Flussbett und Flussufer zu jeweils $26.7 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ und $19.0 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, ergab das Turbulenzmodell 5 (Dorfmann Model [3]), die beste Übereinstimmung mit den Sollwerten. In

Tabelle 4 sind die Ergebnisse und die Differenzen gelistet. Die max. Abweichung ergibt sich bei 400m von nur 1.5cm. In Abbildung 8 sind die Fließgeschwindigkeitsvektoren und Wassertiefen des kalibrierten Modells in TELEMAC-2D® dargestellt (Postprocessor: BlueKenue® [10]).

Tabelle 3: Kalibriertes Parameterset

Parameter	Einheit	Kalibrierter Wert
Reibungskoeffizient im Flussbett	$\text{m}^{1/3}/\text{s}$	26.7
Reibungskoeffizient am Flussufer	$\text{m}^{1/3}/\text{s}$	19.0
Turbulenzmodell	-	5

Tabelle 4: Differenz zwischen Sollwert und Simulation

Messstelle	Sollwert [m]	Simulation [m]	Differenz [m]
Wassertiefe bei 100m	3.500	3.502	0.002
Wassertiefe bei 200m	3.310	3.319	0.009
Wassertiefe bei 400m	3.165	3.150	0.015

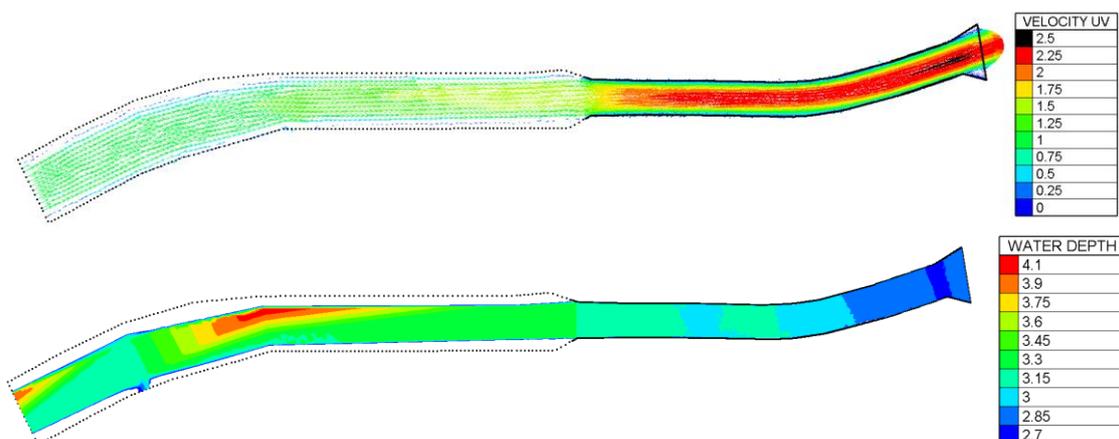


Abbildung 8: Fließgeschwindigkeitsvektoren und Wassertiefen des kalibrierten Modells

Zusammenfassung

Anhand des hydrodynamischen Simulationsmodells der Unterwasserstrecke des KW Gries an der Salzach wurde der Mehrwert einer Sensitivitätsanalyse gezeigt. Dadurch war es möglich die relevanten Parameter des Modells (Reibung, Turbulenzmodell, etc.) zu identifizieren, mit der zusätzlichen Information, welche davon die Ergebnisse am stärksten beeinflussen. Dafür wurden 100 Designs (Parameterkombinationen) mit dem Programm TELEMAC-2D[®] gerechnet, automatisiert mit optiSLang[®] ausgewertet und ein Metamodell erstellt, das die Basis für eine sekundenschnelle Kalibrierung und Echtzeitauswertung der Ergebnisse bildet. Für die Kalibrierung wurden 1000 unterschiedliche Parameterkombinationen am Metamodell berechnet (Rechenzeit < 1 Minute). Dadurch konnte das Parameterset, das die geringsten Abweichungen zu den Sollwerten liefert, identifiziert werden. Die Validierung zeigt dabei max. Abweichungen an einer der 3 Messstellen von nur 1.5cm.

Neben dem kalibrierten numerischen Modell konnten mittels Feldmetamodelle bestimmt werden, welcher Parameter (Durchfluss, Rauigkeit, etc...) wo am betrachteten Flusslauf den größten Einfluss hat (z.B. Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, etc.).

Diese Art der Analyse mit optiSLang[®] lässt sich auf allgemeineren Problemstellungen, d.h. einer höheren Anzahl an Parametern, mehreren unterschiedlich verteilten Reibungswerten über den Flusslauf, sowie Geometrieänderung (Buhnen, Schleusen, Pfeiler, etc.) genauso anwenden. Dadurch lassen sich Optimierungen, hinsichtlich der Strömungssituation, Geschiebetransport, Einlaufbauwerke, etc. problemlos durchführen.

Quellenverzeichnis

- [1] Dung, N.V., 2011: Multi-objective automatic calibration of hydrodynamic models – development of the concept and an application in the Mekong Delta. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart. Stuttgart, Diss, ISBN 978-3-942036-11-5.
- [2] Hervouet J-M., 2007. Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method. Wiley.
- [3] Dorfmann C. and G. Zenz, 2016. The depth-averaged mixing length turbulence model for Telemac2D, Proceedings of the XXIIIrd Telemac User Conference, Paris, France. Published by HR Wallingford.
- [4] Biscarini C., S. Di Francesco, and P. Manciola, 2010. CFD modelling approach for dam break flow studies. Hydrol. Earth Syst. Sci., 14, 705–718, 2010, www.hydrol-earth-syst-sci.net/14/705/2010/.
- [5] Froehlich D.C., 2008. Embankment dam breach parameters and their uncertainties. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 134, No. 12, P. 1708-1721.
- [6] Dynardo GmbH, 2018. ANSYS optiSLang User Documentation, Weimar, www.dynardo.de
- [7] Dynardo GmbH, 2018. Statistics on Structures, Reference Manual, Weimar, www.dynardo.de
- [8] Most T. and Will J., 2008. Metamodel of Optimal Prognosis - an automatic approach for variable reduction and optimal metamodel selection. In Proc. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 5.0, Weimar, Germany, November 20-21, 2008.
- [9] Telemac User Manual, 2014. Telemac Modelling System, 2D hydrodynamics, Telemac-2D Software, Release 7.0.
- [10] Blue Kenue Reference Manual, 2011. NRC Canadian Hydraulics Centre (NRC-CHC) National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, Canada.