

Hybridmodellierung von komplexen Freispiegelströmungen

Nils R  ther und  yvind Pedersen

Zusammenfassung

Hybridmodellierung im Wasserbau hat sich über die letzten 5 bis 10 Jahre stark etabliert. Mit Hybridmodellierung ist die gleichzeitige physikalische und numerische Modellierung eines wasserbaulichen Problems gemeint. In dem vorliegenden Beitrag werden die Vorteile dieser Methode zur Hybridmodellierung anhand eines Beispiels erklärt. In diesem Beispiel geht es um die Hybridmodellierung einer Pegelmessstation in Holt len, Norwegen. Es werden Zwischenergebnisse des Projektes „FlomQ“ präsentiert. In diesem Projekt geht es hauptsächlich um die Verringerung der Unsicherheiten in Hochwasservorhersagen.

1 Einleitung

Zuverlässige Wasserstands-Abfluss Beziehungen (Abflussganglinien) sind für die Berechnung der Bemessungshochwasser unerlässlich. Da aber Feldmessungen im Hochwasserfall mit erheblichen Schwierigkeiten aufgrund von Sicherheitsrisiken verbunden sind, und entsprechende extreme Hochwasser nur selten auftreten, werden die Wasserstands-Abflussbeziehungen für höhere Abflüsse oftmals durch Extrapolation der Wasserstands-Abflussganglinie für niedrige Abflüsse gewonnen (Leopold and Maddock, 1953). Diese Vorgehensweise kann zu signifikanten Fehlern führen wenn entsprechende Informationen für höhere Abflüsse nicht vorliegen (Di Baldassarre and Montanari, 2009). In den letzten Jahrzehnten ist man deswegen dazu übergegangen diese Verhältnisse in einem physikalischen Modellversuch zu untersuchen. Da diese Methode aufwendig und kostenintensiv ist, wird parallel die Funktionsfähigkeit eines numerischen Modells für diesen Anwendungsbereich getestet, validiert und zur Erhebung weiterer Messdaten benutzt. Hierzu wird das kommerzielle dreidimensionale CFD Programm StarCCM+ von CD-Adapco verwendet, welches die Reynolds-gemittelten Navier Stokes Gleichungen mit der finiten Volumen Methode sowie dem klassischen $k-\epsilon$ Turbulenzmodell löst und die freie Wasseroberfläche mit Hilfe der „Volume of Fluid“ Methode darstellt. Durch die Kalibrierung und Validierung des numerischen Modells anhand von Natur- und Modelldaten können somit auch extremste Abflüsse modelliert werden, die selbst im physikalischen Modell nicht mehr möglich sind. Somit kann die Wasserstands-Abflussbeziehung aus der Natur und dem physikalischen Modell mit Werten aus der numerischen Simulation erweitert werden. Diese Technik wird als Hybridmodellierung bezeichnet. Mit dieser Methode können dann auf relativ einfache Weise andere Pegelmessstationen überprüft und ggf verbessert werden. Die in diesem Artikel präsentierten Ergebnisse sind Zwischenergebnisse im Rahmen des Projektes „FlomQ“ und umfassen sowohl die Erkenntnisse aus den physikalischen Modelluntersuchungen als auch aus der numerischen Simulation.

2 Projektgebiet

Die Pegelmessstation ist im Fluss Gaula in Mittelnorwegen auf etwa 265 m NHN. gelegen Die mittlere Strömung an der Stelle ist $17 \text{ m}^3/\text{s}$, während das mittlere jährliche Hochwasser knapp $200 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt (Diese Zahlen sind bezogen auf die Datenreihe von 1961-1990). Der Wasserstand wird am rechten Ufer des Flusses, ca. 30 m oberstrom des Überfalls, gemessen. Kurz oberstrom des Überfalls macht der Fluss dann eine scharfe Kurve mit 90° Grad nach rechts.. Der sich anschliessende Pool weist einen Höhenunterschied von ca 10 m auf. Der

Fluss macht dann einen 90° Grad Drehung nach links bevor die Strömung wieder beschleunigt wird und gerade weiter aus um eine Kiesbank herum fließt. Hier passiert der Fluss eine natürliche Engstelle, die bei starken Hochwasserereignissen die hydraulische Kontrolle übernimmt. Dies hat zur Folge, dass der Wasserstand unterstrom der natürlichen Überfallkante bei Hochwasser steigt, und bei sehr grossen Hochwassern kann der Wasserstand über dieselbige hinweg ansteigen. Die Lage der Druckmesssonde wird im folgenden als Messpunkt A bezeichnet werden. Bei kleinen Durchflüssen dient der Überfall als hydraulische Kontrolle für den Bereich oberstrom in dem sich die Druckmesssonde befindet. Messpunkt A ist auf der Innenseite der Kurve und hinter einigen Felsen gelegen. Diese Lage garantiert ruhigen Gewässern, und gibt gute Messbedingungen bei niedrigen Abflüssen. Höhere Abflüsse stellen eher ein Problem dar, weil sich durch die lokalen Verhältnisse genau an dieser Stelle ein Wechselsprung durch einen überströmten Felsen bildet. Bei Abflüssen höher als die mittlere Jahresfluss ergaben die Messungen im physikalischen Model, dass die Strömung um den Punkt A (Abb. 1), durch den oben erwähnten Wechselsprung stark gestört wird. Die Modellierung hat auch gezeigt, dass ein geeigneterer Standort für die Druckmesssonde bei hohen Abflüssen auf der rechten Seite des Flusses befindet. Dieser Punkt wird im Folgenden als Punkt B bezeichnet (Abb. 1). Die in den Punkten 1- 5 in Abbildung 1 gemessenen Wasserstandsdaten werden in diesem Beitrag nicht betrachtet.

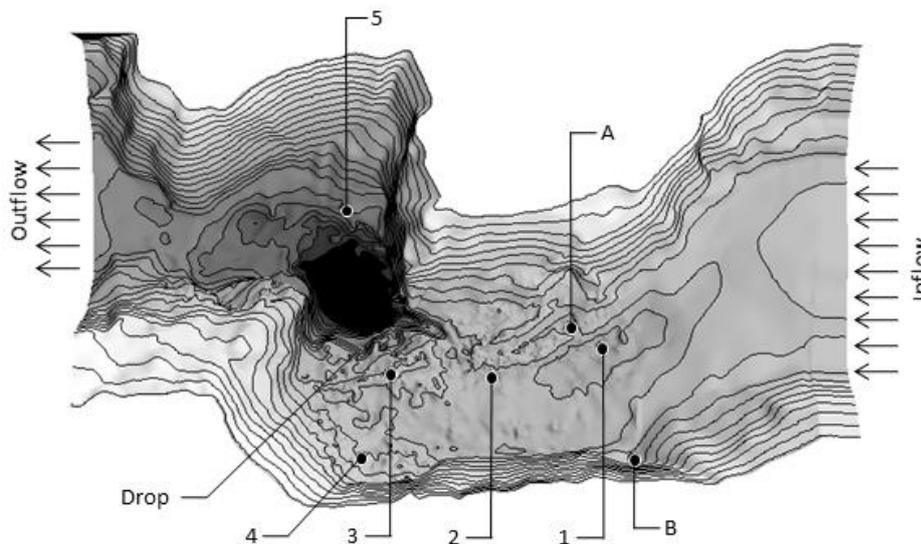


Abb. 1 Übersicht des modellierten Flussabschnittes. Fließrichtung von rechts nach links.

2.1 Erstellung des digitalen Geländemodells

Um die Geometrie des zu untersuchenden Abschnittes sauber in ein digitales Geländemodell als Grundlage für das physikalische und auch für das numerische Modell umwandeln zu können, wurden mehrere Messmethoden angewandt. Zunächst wurden Daten einer LiDAR-Befliegung ausgewertet. Die Punkte wurden hauptsächlich zur Auswertung der trockenen Seitenflächen des Flussschlauches benutzt. Die Punktdichte war allerdings nicht so gross, um die doch so wichtigen Details der Geometrie im Bereich des Überfalls abzubilden. In diesen Bereichen wurde ein terrestrischer Laserscanner (Abb. 2 links) mit einer sehr hohen Punktdichte eingesetzt. Für die Bereiche unter Wasser wurde ein Echolot eingesetzt. Das eingesetzte Echolot ist der vertikale Strahl eines ADCPs, welches auf einer schwimmenden Plattform in Form eines Kayaks bewegt wurde. Um eine genaue Position bei der jeweiligen Tiefenmessung des Echolotes zu erlangen, wurde das ADCP mit einem Reflektor ausgestattet, der die jeweilige

Position im Zusammenspiel mit einem elektronischen Theodoliten bestimmt (Abb. 2, rechts). Da die niedrigste Abflüsse am Standort im Winter und Frühjahr vor Schneeschmelze zu beobachten sind, wurden in dieser Zeit der größte Teil der Messkampagne durchgeführt. Die terrestrischen Laserscans wurden zuletzt durchgeführt, da diese weitestgehend schneefreie Bedingungen erfordern.



Abb. 2 Messmethoden zur Erstellung des digitalen Geländemodells, links: terrestrischer 3D Laserscanner, rechts: GPS kombiniert mit Echolotmessung

Die durch die verschiedenen Messverfahren entstandenen Punktwolken wurden zusammengesetzt und zu einem digitalen Geländemodell verschnitten. Eine zweidimensionale Draufsicht ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Strömungsrichtung ist von rechts nach links. Die in der Abbildung als dunkel grau bis schwarz markierten Bereiche sind in der Geometrie tiefer als die Hellen. So kann man deutlich den flachen Einlaufbereich sehen der dann nach dem Überfall in den tiefen Poolbereich übergeht, und dann wieder flach ausläuft.

2.2 Erstellung des physikalischen Modells

Für den Bau des physikalischen Modells im Maßstab 1: 17,5 mit den Maßen 6,9 x 4,3 Meter wurde eine neue, innovative Technik verwendet. Das oben erwähnte digitale Geländemodell dient als Eingangsdaten für eine CNC Fräse. Diese CNC-Maschine fräste die Geländeoberfläche aus einem Verbundmaterial, welches dann in mehreren Teilen in das Wasserbaulabor der NTNU transportiert wurde. Das verwendete Material für CNC-Fräsen waren ein PVC-Strukturschaumkern mit einer Dichte von 60 kg/m^3 . Die Oberfläche, die dem Fräsen ausgesetzt war, wurde anschliessend mit einem Epoxydharz beschichtet. Nach der Zusammensetzung dieser Blöcke zu dem physikalischen Modell, konnte die Wasserstands-Abflussbeziehung für Abflüsse bis zu einem Modellabfluss von 500 l/s im physikalischen Modell bestimmt werden (Abb. 4).



Abb. 3 Fräsvorgang für die Geometrie des physikalischen Modells

Das Modell ist mit Druckanschlüssen an den Punkten A, B und 1-5 bestückt (Abb. 1). Die Druckanschlüsse sind mit Glaszylinder verbunden in denen der Wasserstand mit einem Punkt Messer abgelesen werden. Die Punktlehren sind lesbar zu 0.1mm Präzision. Da die Druckanschlüsse in der Unterseite der Modellgeometrie angeordnet sind, entspricht der Wasserstand im Zylinder dem statischen Druck (piezometrisch). Zusätzlich zu den Druckanschlüssen wurden der Wasserstand auch direkt in Punkt B und 1-4 unter Verwendung von Ultraschall Messgeräte gemessen. Alle Ultraschallaufnahmen sind über mindestens 120 s der Modelllaufzeit gemittelt und bei stationären Bedingungen erreicht worden war..

Die Experimente wurden mit einer konstanten Abflussverhältnissen gefahren. Um zu überprüfen, ob ein Gleichgewichtszustand erreicht wurde, wird die Druckdifferenz zwischen Punkt A und Punkt B gemessen. War die Differenz über einen Zeitraum von 60 sec konstant, so konnte von einem stationären Zustand ausgegangen werden.

In Abbildung 5 sieht man die gleiche Draufsicht des Flussschnittes wie in Abbildung 1. Allerdings ist das hier gezeigte Foto eine Draufsicht der fertigen physikalischen Modells mit laufenden Wasser. Markant hier zu beobachten, den Überfall über die Kante und den kleinen Wechselsprung in Messpunkt A.



Abb. 4 Mit Wasser befülltes, physikalisches Model von oben, Strömung von rechts nach links

3 3D numerisch Modellierung

Die Modellierung wird mit dem kommerziellen CFD-Software -Star- CCM + durchgeführt . Das Modell löst die Reynolds gemittelten Navier Stokes Gleichungen (RANS Gleichungen) für Mehrphasenströmungen auf einem Finite-Volumen-Gitter. Ein $k-\epsilon$ Modell wird für Turbulenzmodellierung und die Schliessung des Gleichungssystems verwendet. Die Wasserspiegellage wird mit der sogenannten „Volume of Fluid“ Methode berechnet (Hirt and Nichols, 1981). In Abbildung 6 wird die Wasserspiegellage mit den vorherrschenden Geschwindigkeiten in dem digitalen Geländemodell dargestellt. Je roter die Darstellung ist desto schneller fließt das Wasser. Quantitativ kann man hier sehr schön sehen wie gut das numerische Modell in der Lage ist, die vorherrschenden Verhältnisse zu berechnen.

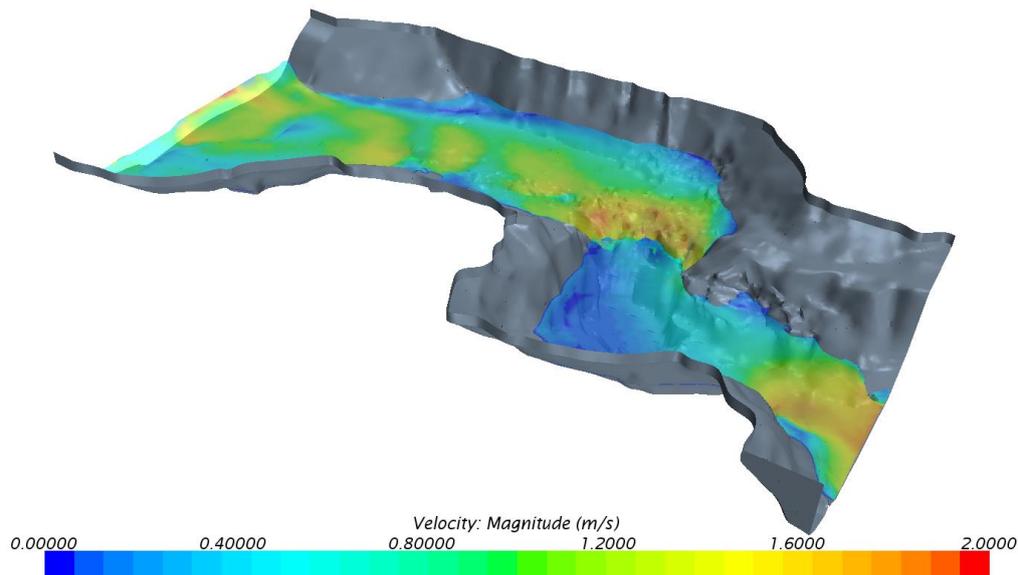


Abb. 5 In ein numerisches Gitter umgewandeltes digitales Gelände Model als Grundlage für die hydraulische Strömungsberechnung

4 Vergleich der Resultate

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse aus der Messung im Feld, im physikalischen Model und aus der numerischen Berechnung dargestellt. Auf der x-Achse ist der Durchfluss und auf der y-Achse die Wasserspiegellage aufgetragen.

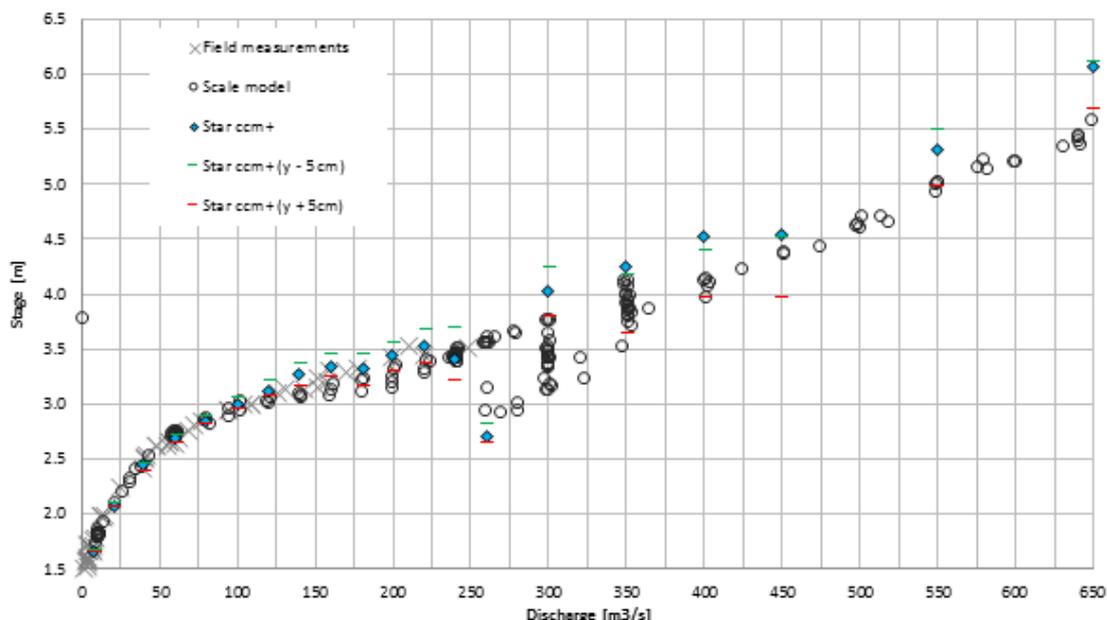


Abb. 6 Gemessen und berechnete Werte zur Abfluss/ Wasserstandsbeziehung in Punkt A

Als Standort wurde hier der Punkt gewählt über dem auch im Feld die Daten erhoben werden. Hierbei fällt vorallem auf, dass die Felddaten, die Labordaten und numerischen Ergebnisse bis 150 m³/s sehr gut, und bis 250 m³/s gut passen. Danach lassen die lokalen Strömungsverhältnisse keine guten Messungen mehr zu. Die Wasserspiegellage ist lokal stark verfälscht und entspricht nicht mehr dem repräsentativen Wert für den Querschnitt. Die erstellte, durch-

gehende, blaue Regressionsfunktion passt auch bis 250 sehr gut zu den Messdaten um dann oberhalb dieser Werte stark von den extrapolierten Werten abzuweichen.

Aufgrund dieser Tatsache, dass über Messpunkt A stark schwankende Strömungsverhältnisse herrschen, wurde geprüft ob es in der Geometrie auch andere Punkte gibt die evtl eine bessere Übereinstimmung haben. Noch nicht verifizierte Simulationen sehen sehr vielversprechend aus und lassen den Schluss zu dass die Korrelation der Daten in Punkt B (Abb. 1) sehr viel besser aussehen.

5 Zusammenfassung

Die vorgetragene Studie hat zum Ziel die eventuellen Unsicherheiten bei der Hochwasservorhersage zu minimieren. Hierzu wurde sich der Methode der Hydridmellierung bedient, um die klassische Extrapolation der Wasserstand - Abflussbeziehung zu überprüfen und ggf zu verbessern. Hierzu wurden zunächst verschiedene Messmethoden zur Aufnahme von Topographie- und Bathymetrie Daten im Gelände aufgezeigt, bevor eine neue Methode zum Bau von physikalischen Modellen vorgestellt wurde. Abschliessend konnten die Abfluss-Wasserstandsbeziehungen an Hand des physikalischen und des numerischen Modells verbessert werden.

Danksagung

Das Projekt wird zu gleichen Teil vom Norwegischen Forschungsrat und dem Zusammenschluss der Norwegischen Energieproduzenten, EnergiNorge, finanziert.

Literatur

- Leopold, L.B. and T. Maddock, (1953). The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications.
- Di Baldassarre, G. and A. Montanari, (2009). Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*. 13(6): p. 913-921.
- Patankar, S.V. and D.B. Spalding, (1972). A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15(10): p. 1787-1806.
- Hirt, C.W. and B.D. Nichols, (1981). Volume of Fluid (Vof) Method for the Dynamics of Free Boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1): p. 201-225.

Anschrift der Verfasser

Dr. Nils Røther, PhD & Øyvind Pedersen, MSc
Department of Hydraulic and Environmental Engineering, NTNU
S.P.Andersens veg 5, 7391 Trondheim, Norway
nils.ruther@ntnu.no, oyvind.pedersen@ntnu.no