

Universität Karlsruhe (TH)
Institut für Hydromechanik
Kaiserstraße 12
D-76128 Karlsruhe

Studienarbeit

Numerische und experimentelle Bestimmung von Abflusskoeffizienten an einem Wehr

10. Mai 2005

Bitte wenden Sie sich bei Fragen an:
studienarbeiten@ifh.uni-karlsruhe.de

1 Einführung

Überströmte Wehre werden im Wasserbau häufig zur Regulierung des Wasserstandes von Gewässern benutzt. Soll dieses gezielt aufgestaut werden, wird ein Wehr in gewünschter Höhe gebaut. Die Bauwerke werden für einen bestimmten Ausbauabfluss Q_D bemessen, der sich aus den hydrologischen Daten ergibt. Von den zahlreich möglichen Wehrformen sollen in dieser Arbeit nur zwei der häufig vorkommenden Formen der festen Wehre untersucht werden. An einem Versuchsgerinne soll experimentell untersucht werden, welche strömungsmechanischen Zustandsgrößen unter bestimmten Bedingungen zu erwarten sind und wie sich diese Größen ändern, wenn der Abfluss Q vom Ausbauabfluss Q_D variiert.

Der erste Teil der Studienarbeit soll experimentell am Versuchsgerinne im Übungslabor des Instituts für Hydromechanik durchgeführt werden. Ein scharfkantiges, belüftetes und ein rundkroniges Wehr sollen nacheinander in das Gerinne eingebaut werden und die Wasserspiegellagenverläufe durch einen Spitzentaster aufgenommen und dokumentiert werden. Das rundkronige Wehr ist so ausgebildet, dass bei der Ausbauüberfallhöhe $h_{üD}$ der Ablaufrücken unter Atmosphärendruck steht. Der Form des Wehrrückens entspricht somit der unteren Kontur des Überfallstrahls eines vollständig belüfteten, scharfkantigen Wehres [3, Kapitel 3.3].

Der zweite Teil besteht aus einer numerischen Simulation des Experimentes. Es soll überprüft werden, inwieweit die gemessenen Daten mit denen einer Simulation übereinstimmen. Dazu soll das kostenlos verfügbare CFD-Programm SSIIM1 angewandt und kennen gelernt werden. Dieses Software-Paket löst die zeitlich-gemittelten Navier–Stokes Gleichungen in allen drei räumlichen Dimensionen mit der Finite–Volumen–Methode auf einem strukturierten, nicht orthogonalen Rechengitter. Das Programm benötigt das Betriebssystem MS-WINDOWS. Die Software mit einer Beschreibung ist unter der web–Adresse: <http://www.ntnu.no/~nilsol/cfd/> zu beziehen. Weitere Literatur und Erklärungen zur computergestützten Modellierung von hydraulischen Strukturen ist Olsen [4, 5, 6] zu entnehmen. Die benötigten Eingabedateien werden vom Institut für Hydromechanik zur Verfügung gestellt.

2 Aufgabenstellung, experimenteller Teil

Der erste Teil der Studienarbeit besteht aus Messungen am Gerinne bei Einbau eines scharfkantigen, belüfteten Wehres mit der Höhe $w = 15,0$ cm. Der oberstromige Wasserstand soll so eingestellt werden, dass er dem Wasserstand des rundkronigen Wehres bei Ausbauabfluss Q_D entspricht. Anschließend wird das rundkronige Wehr eingesetzt und die Wasserspiegellage bei Ausbauabfluss Q_D und vier davon abweichenden Abflussmengen gemessen.

Ziel der Untersuchung ist es, für die beiden Wehrformen die Überfallstrahlkonturen ober- und unterstrom sowie im Bereich der Wehranlage aufzunehmen. Weiter können

hieraus der Verlauf der Energielinie, die Energielinienneigung I_e und die Abflussbeiwerte C_Q berechnet werden.

2.1 Vorgehensweise bei den Messungen

Ein Versuchsgerinne mit einer Breite $B = 30$ cm und einer maximalen Durchflusskapazität von $Q = 20$ l/s steht für Messzwecke zur Verfügung. Der Durchfluss kann mittels eines Ventils gesteuert und an einer Anzeige abgelesen werden. Die Vermessung der Strahlkonturen erfolgt mit einem Spitzentaster mit austauschbarer Spitze. Im folgenden Versuch des scharfkantigen, belüfteten Wehres wird mit zwei unterschiedlichen Spitzen gearbeitet, um die obere und untere Strahlkontur aufnehmen zu können. Führen Sie ein Messprotokoll mit Datum sowie Ihrem Namen und dokumentieren Sie nachvollziehbar alle relevanten Daten. Beachten Sie dazu bitte die Definitionsskizze zur Transformation der Messergebnisse in Abbildung 1.

1. Bestimmung der Gerinneneigung: Bestimmen Sie mit Hilfe der Schlauchwaage die Höhen der Wasserspiegel über der Sohle am Gerinneanfang und am Gerinneende. Achten Sie darauf, dass sich keine Luftblasen in der Schlauchwaage befinden. Vermeiden Sie ein adverses Gefälle und korrigieren Sie gegebenenfalls die Neigung des Gerinnes. Das Gerinne hat eine Länge von $l = 900$ cm.
2. Detaillierte Messungen zur Strahlgeometrie und des Wechselsprunges beim scharfkantigen, belüfteten Wehr:
 - a) Stellen Sie mittels des Durchflussventils eine Oberwassertiefe von $h_0 = 0,21$ m ein. Wie hoch ist die zugehörige Abflussleistung Q ?
 - b) Vermessen und dokumentieren Sie die obere Strahlkontur. Bestimmen Sie die Wassertiefe h_0 , h_1 , h_2 und h_3 vor dem Wechselsprung und h_4 nach dem Wechselsprung. Dokumentieren Sie auch die x-Koordinaten x_2 , x_3 , x_4 . Beginnen Sie mit Ihren Messungen etwas oberstrom des Absenkungspunktes. Legen Sie Ihr Koordinatensystem für die Messungen wie in Abbildung 1 gezeigt.
 - c) Tauschen Sie die Spitze des Spitzentasters aus. Vermessen und dokumentieren Sie die untere Strahlkontur.
3. Bauen Sie das rundkronige Wehr in das Versuchsgerinne ein. Zweck der Messung am rundkronigen Wehr ist die Bestimmung des Einflusses von $h/h_{üD}$ auf den Abflussbeiwerte C_Q . Die erzielten Ergebnisse sollen anschließend mit denen einer numerischen Simulation verglichen werden.
 - a) Stellen Sie den oberstromigen Wasserstand von $h_0 = 0,21$ m ein. Lesen Sie für diesen Zustand den Durchfluss Q_D am Messgerät ab. Diese Einstellungen entsprechen dem Bemessungsfall der eingebauten Geometrie.

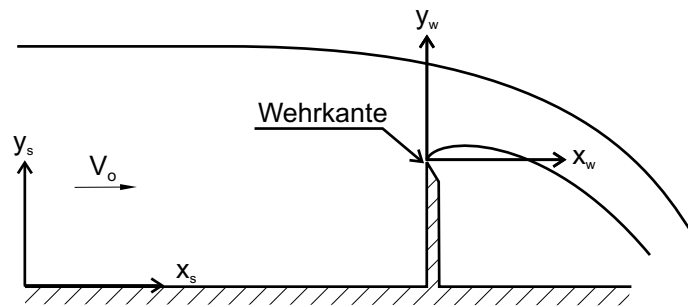


Abbildung 1: Definitionsskizze zum Koordinatensystem

- b) Nehmen Sie die Strahlkontur mit dem Spitzentaster auf.
- c) Stellen Sie vier weitere, beliebige Überfallhöhen h_i ein. Dabei sollen je zwei Überfallhöhen größer und kleiner als die Ausbauüberfallhöhe $h_{üD}$ sein. Messen und dokumentieren Sie für diese vier Zustände jeweils die Überfallhöhen h_i und den Durchfluss Q_i .

3 Ausarbeitung des experimentellen Teils

1. Berechnen Sie die Gerinneneigung I_0 .
2. Zeichnen Sie die obere und untere Strahlkontur des belüfteten, scharfkantigen Wehres. Transformieren Sie Ihre Messergebnisse, so dass der Ursprung des Koordinatensystems am Sohlenboden oberstrom des Wehres liegt.
3. Wie groß sollte der Abstand von der Überfallkante zum ersten Messpunkt oberstrom des Wehres mindestens sein? Begründen Sie Ihre Antwort.
4. Berechnen Sie für die gemessene Strahlkontur des scharfkantigen, belüfteten Wehres
 - a) die Überfallhöhe $h_{ü}$ und
 - b) den Abflussbeiwert C_Q .
 - c) Vergleichen Sie diesen Wert mit Literaturangaben.
 - d) Erklären Sie Unterschiede.
5. Welchen Abflussbeiwert C_Q würden Sie erwarten, wenn der Durchfluss im Gerinne stark erhöht würde? Benutzen Sie die Angaben aus Jirka und Lang [2, Abb. 3.11] sowie Naudascher [3, Bild 3.28].

6. Berechnen Sie die Koordinaten der unteren Strahlkontur des scharfkantigen, belüfteten Überfallstrahles nach den Formeln des U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station [8]. Benutzen Sie die Formel in Tab. 1. Vergleichen Sie die Ergebnisse Ihrer Messungen aus Teil 2.1, Aufgabe 2c mit den rechnerischen Werten und bewerten Sie das Ergebnis.
7. Berechnen Sie in den Querschnitten $i = 0, 2, 3, 4$ (siehe Skizze 2) die Energiehöhen H_i in tabellarischer Form. Zeichnen Sie den Verlauf der Energielinie über x_s bzw. über x_w :
 - a) bei idealisierter Betrachtungsweise.
 - b) auf Basis der Berechnungen aus 7.
 - c) Bewerten Sie das Ergebnis.
8. Bestimmen Sie den Strickler-Beiwert k_{st} des Gerinnes. Gehen Sie dabei wie folgt vor:
 - a) Klassifizieren Sie den Streckenabschnitt zwischen x_2 und x_3 .
 - b) Klassifizieren Sie das Wasserspiegelprofil.
 - c) Berechnen Sie die Energielinienneigung I_e .
 - d) Ermitteln Sie den Strickler-Beiwert k_{st} .
 - e) Führen eine Plausibilitätskontrolle anhand Jirka und Lang [2, Tab. 2.2] durch.
9. Berechnen Sie in den Querschnitten $i = 0, 2, 3, 4$ (siehe Skizze 2) die Froude-Zahl Fr_i und charakterisieren Sie den Abfluss anhand der Froude-Zahlen.
10. Berechnungen zur rundkronigen Wehrgeometrie.
 - a) Berechnen Sie die Ausbauüberfallhöhe $h_{üD}$ für den oberstromigen Wasserstand von $h_0 = 0,21$ m. Beachten Sie die abweichende Definition der Überfallhöhe eines rundkronigen Wehres (siehe Naudascher [3, Bild 3.33] und Abb. 4).
 - b) Vergleichen Sie diesen Wert mit dem Ihrer Messung aus Teil 2.1, Aufgabe 3b.
11. Zeichnen Sie für diesen Abfluss den gemessenen Wasserspiegelverlauf in ein Diagramm.
12. Berechnen Sie die folgende Daten des rundkronigen Wehres anhand Ihrer Messdaten aus dem Experiment.
 - a) Abflussbeiwerte C_{Qi} .

b) die Werte $\frac{h_i}{h_{üD}}$.

Tragen Sie diese Werte in die Abbildung 3 ein.

4 Aufgabenstellung, numerischer Teil

Im zweiten Teil dieser Studienarbeit sollen die Abflussbeiwerte eines rundkronigen Wehres numerisch bestimmt werden. Die Form des Wehres ist identisch mit der aus dem experimentellen Teil. So können die berechneten Werte aus der Simulation verifiziert werden.

Zur Nutzung von Computational Fluid Dynamics (CFD) muss die physikalische Umgebung eines Strömungsprozesses durch ein numerisches Model beschrieben werden. Um die Geometrie des Wehres und des Gerinnes nachbilden zu können, muss ein Rechengitter erzeugt werden, welches den Strömungsraum des Wassers repräsentiert. Das von SSIIM1 benötigte Rechengitter wird Ihnen als Textdatei mit dem Namen `koordina` zur Verfügung gestellt. Beachten Sie bitte, dass die Eingabedateien für SSIIM1 keine Endungen besitzen.

Durch eine weitere Datei namens `control` wird die numerische Berechnung gesteuert. Unter anderem wird durch diese Datei der Durchfluss Q , der oberstromige Wasserstand h_0 und die Rauheit k_s ¹ der Gerinnesohle und der -wandung gesteuert. Auch diese Datei wird Ihnen für unterschiedliche Randbedingungen zur Simulation überlassen.

Die Rechenergebnisse werden in verschiedenen Ausgabedateien protokolliert. Zur Bestimmung der Abflussbeiwerte ist die Datei `koosurf` geeignet. In dieser wird der berechnete Wasserspiegel in Abhängigkeit der x-Koordinate geschrieben. Zur Auswertung der Daten bietet sich hier ein Tabellenkalkulationsprogramm wie MS-EXCEL an.

Um eine Simulation starten zu können, müssen sich mindestens folgende Dateien in einem Verzeichnisordner befinden. Diese lauten:

1. `ssimwin.exe`
2. `beddll.dll`
3. `cofdll.dll`
4. `tsc1dll.dll`
5. `vegdll.dll`
6. `walldll.dll`
7. `control`
8. `koordina`
9. `timei`

¹Zur Umrechnung des Strickler-Beiwertes k_{st} in äquivalente Sandrauheit k_s siehe Olsen [5, Chapter 2.3] oder Jirka und Lang [2, Formel 2.18]

Anschließend legt SSIIM1 mehrere Ausgabedateien an. Die wichtigsten sollen kurz beschrieben werden.

result Diese Datei enthält die Berechnungsergebnisse der hydraulischen Berechnung nach einer gewissen Zahl von Iterationsschritten. Für jede Zelle werden die Geschwindigkeiten in allen räumlichen Dimensionen berechnet. Außerdem wird der Druck und die für das Turbulenzmodell benötigte turbulente kinetische Energie (k) und deren Dissipationsrate (ϵ) in diese Datei geschrieben.

koosurf SSIIM1 schreibt in diese Datei die neu berechneten Geometriedaten. Außerdem wird die Wasserspiegellage dokumentiert.

forcelog Die Kräfte auf ein Hindernis werden für jeden Zeitschritt berechnet.

boogie Zu Anfang jeder Simulation muss der Wasserstand abgeschätzt werden. Die Ergebnisse der eindimensionalen Wasserspiegellagenberechnung werden in dieser Datei dokumentiert. Falls Fehler auftreten, werden diese mit einer möglichen Erklärung in diese Datei geschrieben.

4.1 Vorgehensweise bei der numerischen Simulation

Die numerische Berechnung durch SSIIM1 wird je nach Rechenleistung des verwendeten Computers mehrere Stunden benötigen. Wir empfehlen Ihnen, die Computer im CIP-Pool der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften zu nutzen. Dort können Sie die verschiedenen Simulationen parallel an mehreren Computern durchführen.

1. Erstellen Sie in Ihrem Arbeitsverzeichnis einen neuen Ordner und kopieren Sie in diesen folgende Dateien: `ssiimwin.exe`, `beddll.dll`, `cofdll.dll`, `tsc1dll.dll`, `vegdll.dll` und `walldll.dll`.
2. Auf der Ihnen ausgehändigten Diskette befinden sich die Eingabedateien für die zu untersuchenden Simulationen. In den verschiedenen Verzeichnissen sind jeweils die individuellen Dateien `control` und `timei` gespeichert, die die Berechnung steuern. Der Name des Verzeichnisses gibt Auskunft über die zu simulierende Abflussmenge. Die Datei `koordina` ist für alle Untersuchungen gleich und demnach auch nur einmal gespeichert. Diese muss auch in das Arbeitsverzeichnis kopiert werden.
3. Beginnen Sie die Berechnung, indem Sie das Programm `ssiimwin.exe` durch einen Doppelklick starten. Durch Drücken der Taste `<F10>` sehen Sie den Fortschritt der Berechnungen. Insgesamt werden 240000 Iterationen durchgeführt. Wenn die Simulation beendet ist, wird anstatt der Anzahl der durchgeführten

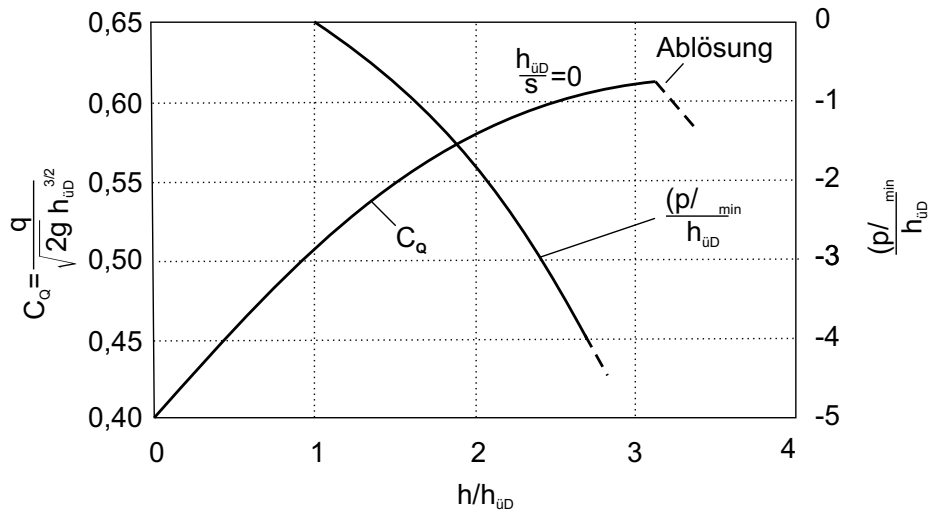


Abbildung 3: Abflussbeiwert C_Q und $\frac{(p/\gamma)_{\min}}{h_{\ddot{u}D}}$ in Abhängigkeit von $h/h_{\ddot{u}D}$ aus Naudascher [3]

$$y_w(x_w) = \begin{cases} - \left(\frac{0.724x_w^{1.85}}{h_{\ddot{u}D}^{0.85}} - 0.4315h_{\ddot{u}D}^{0.375}x_w^{0.625} \right) & \text{für } 0 \leq x_w \leq 0,270h_{\ddot{u}D} \\ - \left(\frac{(x_w - 0,270h_{\ddot{u}D})^{1.85}}{2h_{\ddot{u}D}^{0.85}} - 0,126h_{\ddot{u}D} \right) & \text{für } x_{\ddot{u}D} > 0,270h_{\ddot{u}D} \end{cases} \quad (1)$$

Tabelle 1: Formel des Wehrhöckers nach U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station [8]

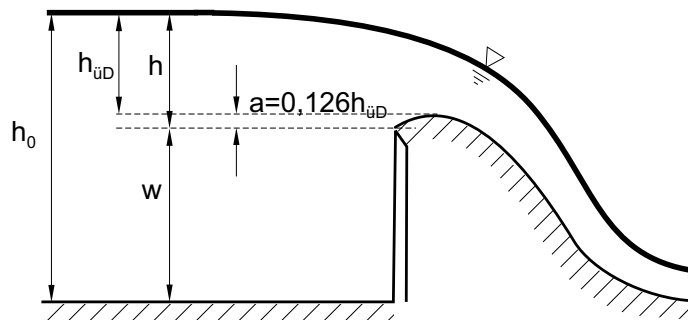


Abbildung 4: Formgebung eines WES-Profiles

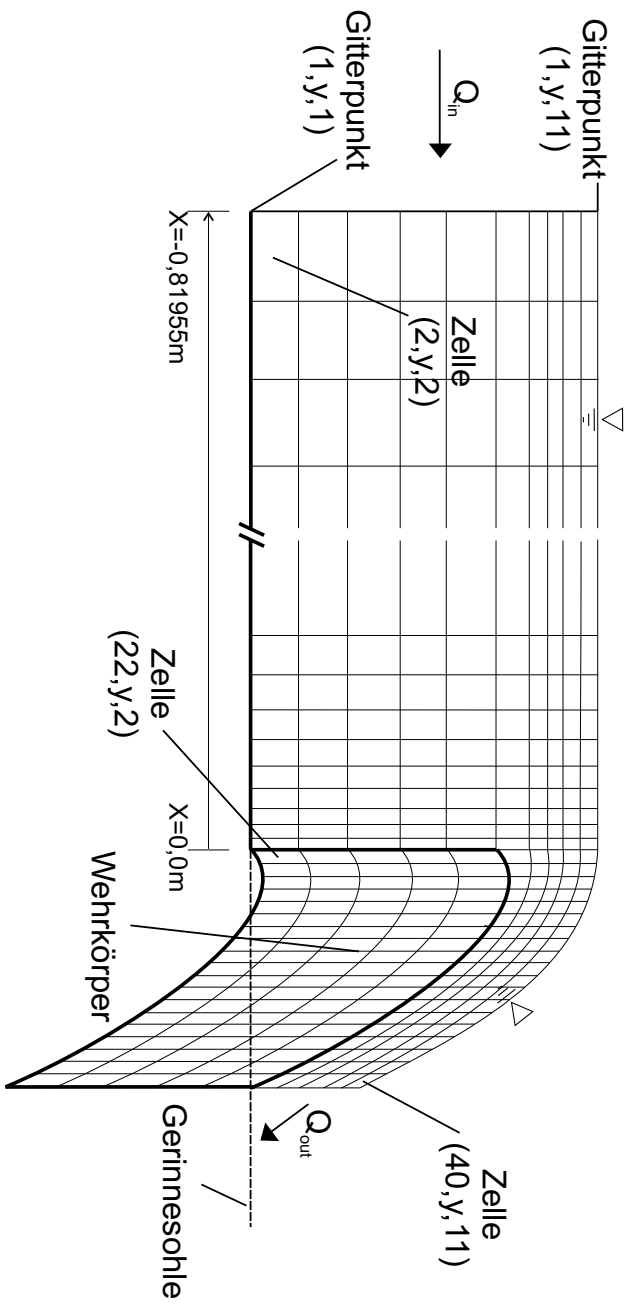


Abbildung 5: Definitionsskizze des benutzten Rechengitters

Literatur

- [1] FERZIGER, Joel H. ; PERIĆ, Milovan: *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2002. – ISBN 3-540-42074-6
- [2] JIRKA, Gerhard H. ; LANG, Cornelia: *Gerinnehydraulik*. Universität Karlsruhe (TH): Institut für Hydromechanik (Veranst.), 2004. – URL <http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/ifh/studneu/gerinnehydraulik/download.htm>. – Zugriffsdatum: November,1st 2004. – class notes
- [3] NAUDASCHER, Eduard: *Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke*. 2. verbesserte Auflage. Wien, New York : Springer Verlag, 1992. – Signatur Uni Karlsruhe: 87A2614. – ISBN 3-211-82366-2
- [4] OLSEN, Nils R. B.: *CFD Algorithms for Hydraulic Engineering*. The Norwegian University of Science and Technology: , 2000. – URL <http://www.ntnu.no/~nilsol/cfd/cfdalgo.pdf>. – class notes
- [5] OLSEN, Nils R. B.: *CFD modelling for Hydraulic Engineering*. The Norwegian University of Science and Technology: , 2001. – URL <http://www.ntnu.no/~nilsol/cfd/cfdstr.pdf>. – class notes
- [6] OLSEN, Nils R. B.: *Hydroinformatics, fluvial hydraulics and limnology*. The Norwegian University of Science and Technology: , 2003. – URL <http://www.ntnu.no/~nilsol/tvm4155/flures5.pdf>. – class notes
- [7] OLSEN, Nils R. B.: *A Three-Dimensional Numerical Model for Simulation of Sediment Movements in Water Intakes with Multiblock Option*. The Norwegian University of Science and Technology: Department of Hydraulic and Environmental Engineering (Veranst.), 2004. – URL <http://www.ntnu.no/~nilsol/ssiimwin/manual3.pdf>. – Zugriffsdatum: August,1st 2004. – user's manual
- [8] U.S. ARMY ENGINEERS WATERWAYS EXPERIMENT STATION: *Corps of Engineers Hydraulic Design Criteria*. siehe auch spätere, verbesserte Auflagen, z.B. 1968. Miss. : Waterways Experiment Station, 1954