Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 84 (1992)
Heft: 11-12

Artikel: Abflusssimulation mit einem hydrodynamisch-numerischen Modell
Autor: Kühne, Anton
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940603

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Abflusssimulation mit einem hydrodynamisch-numerischen Modell

Anton Kühne

Floris ist ein Programm zur Berechnung instationärer Abflüsse in Gerinnesystemen. Es werden die Modellstruktur beschrieben, praktische Anwendungen erwähnt und Folgerungen für numerische Abfluss-Simulationen gezogen.

Résumé: Simulation de l'écoulement à l'aide d'un modèle numérique

Le programme Floris est basé sur un modèle mathématique permettant le calcul de l'écoulement non stationnaire dans un système de canaux. La structure du modèle est décrite, applications pratiques sont présentées et les conséquences pour la simulation numérique sont commentées.

Summary: River flow simulation by a numerical model

Floris is the name of a software package for the computation of unsteady flow in river systems. The structure of the model is described, practical applications and consequences for numerical flow-simulation are noted.

Dem Wasserbauer oder Hydrologen stellt sich oftmals das Problem, den Abfluss in einem Kanal, in einem Fluss oder gar einem verzweigten Gerinnesystem zu ermitteln. Wie lässt sich diese Aufgabe lösen? Das Vorgehen wird von verschiedenen Faktoren abhängen, z. B. von der Komplexität des Problems, der geforderten Genauigkeit, den zur Verfügung stehenden Daten und wissenschaftlichen Hilfsmitteln usw. Für eine erste Abschätzung wird häufig eine empirische Fliessformel, beispielsweise die Manning-Strickler-Formel, herangezogen, ohne dass man sich grosse Sorgen darüber macht, dass diese Beziehung nur für stationär-gleichförmigen Abfluss gilt. Diese Vereinfachung ist aber vielfach nicht gegeben, wenn man beispielsweise an den Ablauf von Hochwasserwellen, an ein natürliches Gerinne, an staugeregelte Flüsse usw. denkt. Hat man in solchen Situationen Aussagen über die Abflussvorgänge zu machen, wird man ein anspruchsvolleres mathematisches Modell verwenden müssen. Aufgrund der Erfahrungen mit einem an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich entwickelten Programm wird erläutert, welche Möglichkeiten ein hydrodynamisch-numerisches Modell eröffnet.

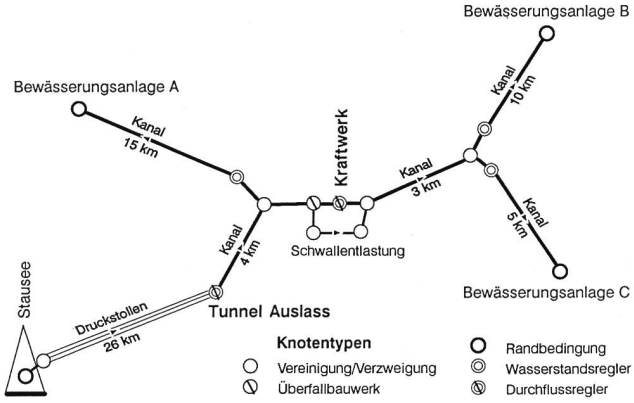

Bild 1. Beispiel einer Floris-Modellstruktur – hier zur numerischen Simulation eines konkreten wasserwirtschaftlichen Mehrzwecksystems. Dieses wird durch 15 Flussarme, 16 Knoten sowie rund 600 Querprofile repräsentiert.

Berechnungsgrundlagen

Die Grundgleichungen zur Berechnung des instationären Abflusses in offenen Gerinnen wurden von B. de Saint-Venant bereits im letzten Jahrhundert hergeleitet. In der Praxis werden sie als Kontinuitäts- und Impulsgleichung oft in der folgenden Form verwendet:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q\,, \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\beta \frac{Q^2}{A}\right) + gA\left(\frac{\partial z}{\partial x} + J_f\right) = q\, v_x\,. \tag{2}$$

Dabei bezeichnen x die Ortsvariable in Fliessrichtung, t die Zeit, Q den Abfluss, z den Wasserstand (Kote des Wasserspiegels), A die durchströmte Gerinne-Querschnittsfläche, J_f das Reibungsgefälle, g die Erdbeschleunigung, q einen allfälligen seitlichen Zufluss zum Gerinne pro Flusslaufmeter, v_x die Geschwindigkeit des seitlichen Zuflusses in x-Richtung, β einen Korrekturfaktor für ungleichmässige Geschwindigkeitsverteilung. Die Unbekannten sind der Abfluss Q und der Wasserstand z; beide hängen von x und t ab.

Für die Herleitung der genannten Gleichungen kann auf eine breite Fachliteratur verwiesen werden [z. B. 1, 2]. Sie basieren auf einer Reihe von vereinfachenden Annahmen, die bei der Anwendung beachtet werden sollten. Davon seien insbesondere erwähnt:

- Der Abfluss wird eindimensional betrachtet; es wird mit einer über den ganzen Gerinnequerschnitt gleichmässig verteilten mittleren Fliessgeschwindigkeit gerechnet; der Wasserstand über den Querschnitt ist horizontal.
- Das Sohlengefälle in Fliessrichtung ist klein.
- Es wird von festen Gerinnebegrenzungen ausgegangen (keine Sohlenbewegungen).
- Das Reibungsgefälle wird gleich wie beim stationären Abfluss angesetzt.

Von den Lösungsmethoden zum praktikablen Computerprogramm

Die Differentialgleichungen (1) und (2) lassen sich nicht analytisch lösen, abgesehen von einfachen Spezialfällen. Für praktische Probleme sind Lösungen mit Hilfe von numerischen Verfahren zu finden. Diese erfordern in der Regel erheblichen Rechenaufwand. Es liegt daher nahe, dass oft nach weiteren Vereinfachungen in der mathematischen Beschreibung und im Lösungsverfahren gesucht wird. Heute stehen aber derart leistungsfähige Computer zur Verfügung, dass der Rechenaufwand kaum mehr ein Hindernis für die Anwendung von anspruchsvolleren Verfahren darstellt. Methoden, die die vollständigen Saint-Venant-Gleichungen lösen, werden als hydrodynamisch-numerische Modelle bezeichnet.

Bei eindimensionalen, instationären Abflussberechnungen hat sich das numerische Verfahren der finiten Differenzen bewährt [1, 2, 3]. Für die Simulation von Ereignissen, die sich über einen längeren Zeitbereich erstrecken, drängen sich sogenannte implizite Differenzenverfahren auf. Im Gegensatz zu den etwas einfacheren expliziten Verfahren sind sie an keine Stabilitätskriterien gebunden, die die Länge der Zeitschritte stark einschränken würden. Bei konkreten Problemen, wie etwa bei der Simulation von Hochwasserabläufen oder Flutwellen über eine längere Fluss- bzw. Talstrecke, sind sehr oft Zeitabschnitte

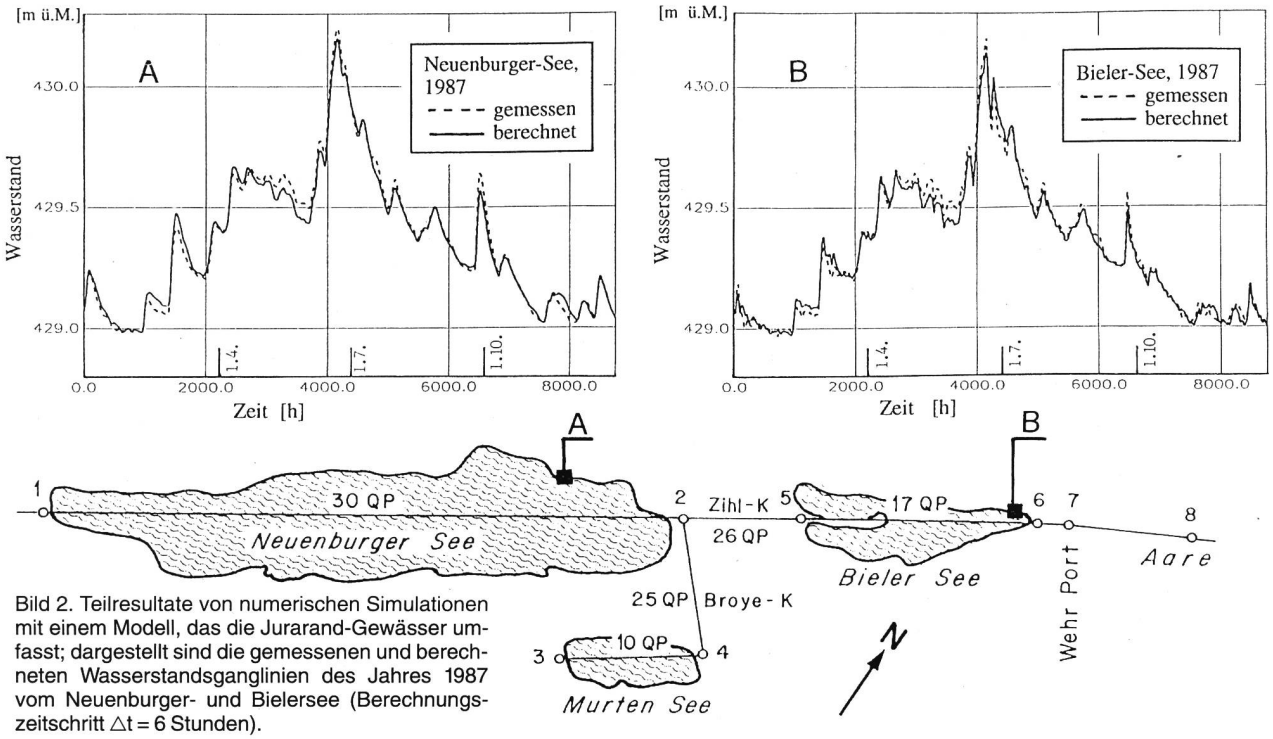

Bild 2. Teilresultate von numerischen Simulationen mit einem Modell, das die Jurarand-Gewässer umfasst; dargestellt sind die gemessenen und berechneten Wasserstandsganglinien des Jahres 1987 vom Neuenburger- und Bielersee (Berechnungszeitschritt $\Delta t = 6$ Stunden).

von mehreren Stunden und Tagen zu berücksichtigen. Dabei ist die Möglichkeit, grössere Zeitschritte wählen zu können, sehr erwünscht. Im Hinblick auf solche Aufgaben ist an der VAW schon Anfang der achtziger Jahre ein hydrodynamisch-numerisches Modell namens Floris entwikkelt worden, das auf einem impliziten Differenzenschema basiert [4].

Wie der Name Floris (*Flo*od Routing in *R*iver *S*ystems) andeutet, soll das Programm Abflussberechnungen in Gerinnenetzen ermöglichen. Zu diesem Zweck ist die mathematische Beschreibung auf drei Grundelemente abgestützt: Querprofile, Flussarme und Knoten. Mit den Querprofilen wird die Flussgeometrie beschrieben. Längs eines Flussarmes gelten die Saint-Venant-Gleichungen. Knoten sind bestimmte Flussstellen, wo diese Gleichungen durch Beziehungen zu ersetzen sind, die die speziellen lokalen Vorgänge zutreffend beschreiben. Die Knoten dienen der Verknüpfung der Flussarme.

Mit den Knoten lassen sich auf vielfältige Weise Randbedingungen, Verzweigungen, Zusammenflüsse, Überfälle, Wehre, Kraftwerke, Reguliereinrichtungen usw. im Gerinnenetz berücksichtigen (Bild 1). Die Unbekannten (Abfluss, Wasserstand) werden zu jedem Zeitschritt für eine Folge von ausgewählten Flussstellen berechnet. An diesen Stellen müssen die Querprofile definiert sein. Deren Anzahl bestimmt wesentlich den Rechenaufwand. Mit einem geeigneten Lösungsalgorithmus wird der speziellen Modellstruktur mit Knoten, Ästen und Querprofilen Aufwand sparend Rechnung getragen.

Damit die Abflussberechnungen Früchte tragen, müssen die Resultate in verständlicher Form präsentiert werden. Sowohl für die Datenbereitstellung (Pre-Processing) als auch die Resultatdarstellung (Post-Processing) sind eigene Programmpakete geschaffen worden. Sie erleichtern dem Anwender den Zugang zur numerischen Simulation und die Resultatauswertung.

Anwendungen

Das hydrodynamisch-numerische Modell Floris ist an der VAW seit rund 10 Jahren im praktischen Einsatz. Im Laufe der Zeit hat das Programmpaket verschiedene Verbesserungen und Anpassungen an neue Problemstellungen erfahren. Das ursprünglich für einen Grossrechner konzipierte Programm kann heute auch auf Arbeitsstationen eingesetzt werden.

Das Floris-Modell ist modular aufgebaut. Je nach Problemstellung können einzelne Bausteine im Programm durch Elemente ersetzt werden, die der Beschreibung der spezifischen Situation dienen. Basis ist immer die gleiche Struktur des Modells mit den Grundelementen von Flussarmen, Knoten und Querprofilen. Die folgende Aufzählung von Floris-Anwendungen dokumentiert die vielfältige Verwendbarkeit des Programms. Es handelt sich dabei grösstenteils um Forschungsaufträge, die die VAW für Dritte durchgeführt hat.

Hochwasserschutz

- Simulation des Ablaufs von Hochwasserwellen an der Thur zur Bemessung der Gerinnekapazität und zur Überprüfung der Wirksamkeit von Hochwasserrückhaltegebieten.
- Hochwasserwellen-Berechnung für die Emme (Kantone Bern und Solothurn) zur Bemessung der Gerinnekapazität.
- Simulation von Überflutungsszenarien des Ticino bei Bodio.
- Simulation der Retentionsverhältnisse im Unterbergental (Kanton Bern) bei extremen Hochwasserabflüssen.
- Stückweise Rekonstruktion des Ablaufs des Hochwassers in der Urner Reuss im Sommer 1987; Ermittlung des Einflusses der Retention auf den Ablauf extremer Hochwasser im Urner Reusstal [5].
- Abfluss-Simulation nach einem Dammbruch (im Rahmen einer Risikoanalyse) eines Speicherbeckens.

Schwall- und Sunkwellen in gestauten Flüssen

- Simulation einer Reihe von ausgewählten Betriebsfällen des Flusskraftwerks Rheinau.
- Berechnung von Schwall- und Sunkerscheinungen bei Turbinen-Schnellschluss am Flusskraftwerk Laufenburg.
- Flutwellenberechnung für die Aare im Bereich der Flusskraftwerke Mühleberg und Niederried.

- Berechnung von Schwallwellen im Unterwasser des geplanten Kraftwerks Amsteg.
- Simulation von Schwall- und Sunkwellen bei der raschen Absenkung von einzelnen oder mehreren Stauhaltungen im Hochrhein.

Schadstofftransport in Fliessgewässern

- Ermittlung von mittleren Abflussgeschwindigkeiten und Fliesszeiten im Rhein zwischen Bodensee und Basel und in der Aare vom Bielersee bis zur Mündung in den Rhein [6].
- Ausweitung auf ein zweidimensionales Stofftransportmodell mit Anwendungen im Rhein.

Flussgebietsmodelle und geregelte Systeme

- Simulation des hydraulischen Geschehens im Netz der Jurarand-Hauptgewässer unter Einbezug der Regulierung des Bielersee-Ausflusses (Bild 2).
- Modellrechnungen zum Bodensee-Ausfluss (Ursachenanalyse von Veränderungen der Bodenseewasserstände).
- On-line-Simulation von Fluss-Stauregelungen zur Analyse des Systemverhaltens.
- Simulation hydraulischer Systeme bei verschiedenen Kraftwerksgesellschaften im Ausland; Programmanpassung an konkrete Situationen.
- Simulation der Steuerung und Regelung eines wasserwirtschaftlichen Mehrzwecksystems im Ausland (Bild 1).

Möglichkeiten und Grenzen

Aufgrund der Erfahrungen darf Floris als sehr wirkungsvolles Modell bezeichnet werden. Es deckt ein breites Anwendungsfeld ab. Natürlich zeigen sich auch Grenzen, denn als ein mathematisches Modell ist es lediglich ein Bild für einen bestimmten realen Zustand oder Vorgang. Ob dieses Bild (Modell) genügt, die ihm entsprechende Wirklichkeit wiederzugeben, hängt von der Modelltechnik (d. h. von der mathematischen Beschreibung) und von der Modellgenauigkeit (d. h. vom numerischen Lösungsverfahren und von der Datengenauigkeit) ab. Gelegentlich können auch rein numerische Probleme Schwierigkeiten bereiten.

Floris beruht auf den eindimensionalen Strömungsgleichungen von de Saint-Venant. Natürliche Vorgänge, die die entsprechenden Voraussetzungen wesentlich sprengen, lassen sich mit diesem mathematischen Modell nur beschränkt beschreiben. Floris simuliert keine zweidimensionalen Strömungen und keine Sohlenbewegungen. Gewisse zweidimensionale Vorgänge, wie etwa Überflutungen von Flächen, können aber durch ein geeignet gewähltes, feines Netz von Fliesswegen (Flussarmen) und Knoten angenähert werden. Die Retentionswirkung von Überschwemmungsgebieten lässt sich häufig durch die den Flussarmen zugeordneten Querprofile erfassen.

Hydrodynamische Modelle, die implizite Differenzenverfahren verwenden, können mehrheitlich nur strömenden Abfluss simulieren. Floris bewältigt aber auch das Problem von Fliesswechseln von strömendem zu schiessendem Abfluss (und umgekehrt). Zu diesem Zweck ist ein Lösungsalgorithmus mit einer modifizierten Charakteristiken-Methode programmiert worden. Im Bereich von Fliesswechseln wählt das Programm selbständig das optimale Verfahren. Im weitern können auch geschlossene Querprofile mit Abfluss unter Druck oder mit freier Oberfläche berücksichtigt werden.

Als Differenzenverfahren berechnet Floris die gesuchten Grössen an vorbestimmten Stellen. Dort müssen die Flussgeometrie (Querprofile) und die Reibungsverhältnisse datenmässig definiert sein. Unregelmässigkeiten im Flussprofil lassen sich nur soweit erfassen, wie sie durch die Folge von Querprofilen repräsentiert sind. Mit Floris kann der Abfluss für ein ausgedehntes Flussnetz über einen langen Zeitbereich, auch unter wechselnden Voraussetzungen, simuliert werden. Darin liegt eine grosse Stärke des hydrodynamisch-numerischen Modells. Wenn aber Details im kleinräumlichen Bereich nachzubilden sind, wird der hydraulische Modellversuch mehr Information liefern. Numerische und physikalische Modelle ergänzen sich; in diesem Sinne werden beide an der VAW als unentbehrliche Forschungswerkzeuge eingesetzt [7].

Modellanwendung mit Sachverstand

Die numerische Simulation von instationären Abflussvorgängen in offenen natürlichen Gerinnen ist ein anspruchsvolles Unterfangen. Es scheint zwar, dass heute viele einschlägige Programme zur Verfügung stehen. Der potentielle Anwender wird aber gut daran tun, die Möglichkeiten der von ihm anvisierten Software sorgfältig zu prüfen. Der Nachweis über praktische Einsätze des Programms kann dabei wertvollen Aufschluss geben. Ein Vergleich von berechneten Ergebnissen mit vorhandenen Messdaten ist unerlässlich.

Aber nicht nur an die Software, sondern auch an den Benützer sind hohe Anforderungen zu stellen. Der Einsatz anspruchsvoller numerischer Modelle zur Abfluss-Simulation in natürlichen Gerinnen – wie z. B. Floris – verlangt vom Anwender hydrodynamischen Sachverstand. Dieser ist gefordert bei der Schaffung der Modellstruktur, wenn es gilt, durch eine geeignete Wahl von Querprofilen, Flussästen und Knoten die Wirklichkeit abzubilden. Die sich abspielenden physikalischen Vorgänge sollten verstanden werden, damit sich die berechneten Resultate richtig analysieren und interpretieren lassen. Das hydrodynamisch-numerische Modell ist zwar ein hochentwickeltes und sehr wirkungsvolles Werkzeug, das in kurzer Zeit eine Menge wertvoller Resultate liefern kann. Dem Ingenieur bleibt aber die sehr wichtige Aufgabe vorbehalten, die Möglichkeiten des Modells abzuwägen, die Ergebnisse sachgerecht zu werten und entsprechend nach aussen zu vertreten.

Literaturhinweise

[1] *Cunge, J. A.; Holly, F. M.; Verwey, A.:* Practical Aspects of Computational River Hydraulics. Pitman, London, 1980.

[2] *Chaudhry, H. M.:* Applied Hydraulic Transients. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1987.

[3] *Vreugdenhil, C. B.:* Computational Hydraulics. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1989.

[4] VAW: Floris – ein hydrodynamisches Modell zur Simulation instationärer Abflüsse in offenen Gerinnen. Interner Bericht, Rev. 1991.

[5] *Fäh, R.; Kölla, E.; Naef, F.:* The flood in the Reuss valley in August 1987: a computer aided reconstruction of a flood in a mountainous region. Int. Conf. on River Flood Hydraulics, Wallingford, 17–20 Sept., pp. 65–74, 1990.

[6] *Kühne, A.; Schneider, G.:* Fliesszeitbestimmung mit hydraulischen Modellen. Landeshydrologie und -geologie, Bern; Mitteilung Nr. 9, S. 29–62, 1991.

[7] *Vischer, D.:* Hydraulische Modellversuche im Computerzeitalter? «Neue Zürcher Zeitung», Beilage «Forschung und Technik», 29. April 1992.

Adresse des Verfassers: Dr. *Anton Kühne,* Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.