Sonderdruck aus

Deutsche
Gewässerkundliche
Mitteilungen

42. 1998, H. 4 – Seite 149–157

Qualitätssicherung beim praktischen Einsatz von zweidimensionalen Strömungssimulationen

Quality assurance in practical applications of two-dimensional flow simulation

von Jens W y r w a

DK 627.131:167.7:519.248

Basierend auf der mittlerweile 10jährigen Erfahrung, die beim Einsatz von 2-dimensionalen (tiefengemittelten) Strömungsmodellen für Oberflächengewässer in der Ingenieurpraxis des Wasserbaus vorliegen, untersucht der vorliegende Beitrag, wie die Qualität solcher Berechnungen beurteilt und verbessert werden kann. Dazu werden die Quellen von möglichen Ungenauigkeiten unter dem Schlagwort „Fehlermöglichkeiten kennen" im Detail in ihrer Herkunft erläutert und in ihren Auswirkungen diskutiert. Die Zusammenfassung dieser Fehlerursachen in Tabellenform ergibt eine Checkliste für die Auftragsabwicklung. Komplettiert wird die Ausführung durch einige praktische Hinweise unter der Überschrift „Überblick bewahren". Im Zusammenhang mit dieser auch bei anderen Planungs- und Untersuchungstätigkeiten wichtigen Forderung wird auf die Besonderheiten der 2-dimensionalen Strömungsberechnungen hingewiesen.
Es ist geplant, in einem Folgebeitrag von G. Steinebach das Projekt einer 2D-Simulation der Strömung des Rheins um die Insel Niederwerth vorzustellen. Darin steht die Anwendung in einem speziellen Fall im Vordergrund, während der vorliegende Beitrag allgemeine Hinweise zur Qualitätssicherung gibt. Dieses Projekt ist für die Qualitätssicherung deshalb so aufschlußreich, weil außergewöhnlich gute Vergleichsmöglichkeiten mit Messungen vorliegen.

Based on ten years experience with applications of two-dimensional (depth averaged) flow models of surface waters in hydraulic engineering practice, the paper examines how the quality of such computations can be evaluated and improved. Sources of potential inaccuracies are described in detail under the heading „to know possible errors" regarding their origins and their effects. A summary of these error sources in the form of a table may serve as a check-list in practical applications. The article is completed by some practical hints titled „don't lose the overview". This rule, that is essential in any planning or research effort, is used to highlight some specific features of two-dimensional flow computations.
In a planned follow-up paper, G. Steinebach will demonstrate a 2D simulation of the currents around the island of Niederwerth in the River Rhine. Then the application of the model to a special case will be in the foreground, while the present paper presents general recommendations for quality assurance. This project is particularly instructive in terms of quality assurance, because the possibilities of comparisons with measured data are extraordinarily good.

1 Einleitung

Zweidimensionale[1] Strömungsberechnungen von Oberflächengewässern haben seit ihrer Einführung in die Planungspraxis vor 10 Jahren (Pasche 1989) mittlerweile dort ihren Platz gefunden, wo eindimensionale Wasserspiegellagen-Berechnungen nicht mehr genau genug und physikalische Modelle zu aufwendig sind. Mehr

[1] Zweidimensional meint hier die vertikal über die Gewässertiefe gemittelte Berechnung flacher Oberflächengewässer.

und mehr werden auch physikalische Modelle durch numerische ersetzt.

Der Einsatz entsprechender numerischer Berechnungsverfahren ist inzwischen dem wissenschaftlichen Bereich entwachsen. 2-dimensionale Strömungsberechnungen werden in Deutschland seit einigen Jahren von einer Reihe von Fachbüros als Dienstleistung angeboten und auch zunehmend als Grundlage für Planungen im Wasserbau, bei der Beurteilung des Sedimenttransports, bei der Quantifizierung der Wasserqualität und bei der Eingriffsbeurteilung in der Gewässer- und Auenökologie genutzt. Parallel dazu wurden Programmsysteme entwickelt, die die EDV-Bearbeitung übersichtlich, problemangepaßt flexibel und derartig rationell ermöglichen, daß mittlerweile 2-dimensionale Berechnungen zu vertretbaren Preisen angeboten werden können.

Die im Titel aufgeworfene Frage nach der Qualität[2] der Ergebnisse und die Notwendigkeit der Qualitätssicherung hat zwei Ursprünge:

- Der Planer als Abnehmer einer Berechnungsleistung muß beurteilen können, ob die Simulation seine Fragestellung hinreichend genau beantwortet und ob sich der Aufwand dafür lohnt.
- Der Anbieter, der die Simulation durchführt, möchte darstellen können, daß sein Aufwand von der Qualität der Ergebnisse gerechtfertigt ist, und er will sich in der Konkurrenz behaupten.[3]

Grundsätzlich lassen sich Simulationen immer noch einfacher und preiswerter durchführen. Nur wird dann die Beantwortung der Frage, ob die Aussagequalität noch ausreicht, schnell aufwendiger als die Simulation selbst. Um diese Fragestellung sachgerecht diskutieren zu können, gibt dieser Beitrag konkrete Hinweise, worin die Ursachen für die Beeinträchtigung der Aussagequalität in den einzelnen Bearbeitungsschritten zu suchen sind.

Das folgende gilt allgemein für zweidimensionale Berechnungsverfahren, die mit vertikal-gemittelten Größen arbeiten, wobei der Autor aber seine Herkunft von der Finite-Elemente-Methode und der Anwendung von 2D-Modellen auf Flüsse im Binnenland nicht ganz verleugnen kann.

Leider ist es nicht möglich, kurz eine Berechnungsvorschrift abzuleiten, die als Ergebnis (vielleicht noch in Abhängigkeit von der Wasserspiegellage und dem Gebietsdurchfluß) 10 cm bei der Wasserspiegellage und 20 cm/s bei den Fließgeschwindigkeiten als maximales Fehlermaß von 2D-Simulationen ausweist. Daher müssen wir uns auf einen etwas längeren, aber sicher abwechslungsreichen und interessanten Gang durch die Niederungen der 2D-Simulation begeben.

2 Fehlermöglichkeiten kennen

Es ist eine gewisse Scheu – nicht nur bei Ingenieuren des Wasserbaus – feststellbar, über Fehler und Fehlermöglichkeiten zu sprechen. Dies ist individuell durchaus verständlich; niemand möchte die von ihm/ihr unter Aufbietung von viel Fachwissen und Expertise geleistete Arbeit durch billige Hinweise auf die gewissen Methoden inhärenten Fehlermöglichkeiten entwertet bekommen. Dieser Beitrag sieht sich aber auch als Plädoyer für einen offenen und bewußten Umgang mit Fehlern und Fehlermöglichkeiten. So definiert z. B. die ISO 9000 den verantwortlichen Umgang mit fehlerhaften Produkten[4] als eine Voraussetzung für die Produktion qualitativ hochwertiger Ergebnisse (Pfitzinger 1995, Sonyi 1996). Güte und Genauigkeit einer Berechnung lassen sich nur dadurch beschreiben, indem gezeigt wird, wie Ungenauigkeiten beschränkt und Fehler vermieden wurden.

2.1 Modellerstellungsfehler

2.1.1 Geländetopographie unzutreffend

Ein wesentlicher Schritt in der Aufstellung des Modells ist das Einbringen der Topographie. (An mancher Stellen wird auch von Morphologie gesprochen, meint beides die Gewässersohle, die Lage der überflossenen festen Erdoberfläche.) Die Vermessung ist heutzutage in fast beliebiger Genauigkeit und Feinheit möglich. Probleme ergeben sich aus den von der Vermessung verursachten Kosten und der korrekten Übertragung in das Strömungsmodell.

Grundsätzlich ist die überflossene Topographie ein wesentlicher Einflußfaktor, von dem der Strömungszustand hauptsächlich beeinflußt wird. Der Einfluß eines Fehlers sinkt aber mit zunehmender Wassertiefe. Z. B. können 5 cm Höhenfehler auf einem Vorland, das mit wenigen Dezimetern Wassertiefe überströmt wird, den Strömungszustand völlig verändern, während 5 cm Fehler in einem mehrere Meter tiefen Teil des Gewässers kaum nachweisbare Auswirkungen haben.

Auf welchen Wegen gelangen nun die Höhenfehler ins Strömungsmodell?

Zum einen, wenn auf ungenauen, unvollständigen oder veralteten Vermessungsdaten aufgesetzt wird.

Die andere Fehlergruppe liegt im Modellerstellungsprozess begründet. Die einfache manuelle Fehleingabe hat an Bedeutung verloren, da heute kaum noch Geländehöhen von Hand eingetippt werden. Zur Übertragung der gemessenen Geländehöhen auf die Stützstellen des Berechnungsnetzes[5] werden numerische Interpolationsverfahren benutzt. Diese benötigen Ansätze (Interpolationsfunktionen), um die Geländehöhe zwischen den Meßpunkten zu beschreiben. Die in vielen digitalen Geländemodellen verwendeten ebenen Dreiecke stellen z. B. einen solchen Ansatz dar. Genauso verwenden die hydraulischen Berechnungsverfahren Ansätze zur Beschreibung der Geländehöhe zwischen den Berechnungsstützstellen. Die reale Geländehöhe und die interpolierte müssen nun nicht übereinstimmen, ja können beträchtlich voneinander abweichen. Wenn zum Beispiel durch eine ungünstige Netztopologie die Durchflußfläche des Flußschlauches, in dem der Hauptabflußanteil abfließt, nicht richtig wiedergegeben wird, sind zutreffende Strömungsberechnungen gar nicht mehr zu erwarten.

Primär wird die Frage, wie gut sich das mathematische Modell des Geländes an das reale Gelände anschmiegt, durch die Dichte der Stützstellen bestimmt. D. h. gewisse kleinere Geländestrukturen wie Wälle, Abbruchkanten oder Gräben lassen sich nur dann darstellen, wenn im Modell an diesen Stellen eine ausreichende Dichte der Vermessungspunkte und Berechnungsknoten vorliegt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Darstellung eines Geländes mit einem diskreten Modell ist die Erfassung von Abbruchkanten in der Netztopologie (Zwangslinien). Z. B. kann die Linie der Böschungsoberkante eines Flußschlauchs in einem diskretisierten Modell nur sauber wiedergegeben werden, wenn sie nicht von Netzkanten geschnitten wird, also auch als Linie im Netz erscheint.

Völlig zweitrangig ist die Frage der verwendeten Interpolationsfunktionen. In der Praxis haben sich lineare Funktionen weitgehend durchgesetzt. Mit höheren Interpolationsfunktionen, die sich auf mehr als drei Punkten abstützen müssen, lassen sich glattere Oberflächen erzielen. Genauso wie Verfahren für das Ausrunden von Höhenlinien führt dies zu einem gefälligeren Erscheinungsbild des Modells, eine größere Naturähnlichkeit ist aber nicht nachweisbar.

Die Überprüfung einer einmal ausgearbeiteten Modelltopographie oder eines digitalen Geländemodells, das zur Modellerstellung benutzt wurde, ist im allgemeinen schwierig.

Als sehr hilfreich hat sich eine komfortable Visualisierung der Modelltopographie erwiesen, mit der es möglich ist, z. B. die im Modell realisierten Höhenlinien mit denen einer dahinter liegenden topographischen Karte zu vergleichen. Eine gute Ortskenntnis des Bearbeiters hilft beim Erkennen von Fehlern.

Morphodynamische Veränderungen der Sohle, d. h. Höhenänderungen infolge des Feststofftransports (Erosion und Sedimentati-

---

[2] Die Frage nach der Qualität bezieht sich in diesem Beitrag nur auf die Frage, wie nahe die berechnete Größe der in der Natur auftretenden kommt.

[3] Gerade international ist die deutsche Wirtschaft in diesem Bereich nicht wirklich führend.

[4] Im Kontext dieses Beitrages sind fehlerhafte Produkte Berechnungen, bei denen Ungenauigkeiten erkannt wurden.

[5] Erklärung im Abschnitt: 2.3.1 Diskretisierungsfehler

on) sind nicht Bestandteil dieses Artikels. Zu deren Simulation sind auf die Hydraulik aufsetzende Berechnungsverfahren notwendig, deren Beschreibung hier zu weit führen würde. Was aber den gutachterlich tätigen Ingenieur nicht aus der Verantwortung entläßt zu prüfen, ob etwa morphologische Prozesse in seinem Projekt eine Rolle spielen und ob die vorliegenden Höhenangaben überhaupt noch gültig sind.

2.1.2 Zonierung[6] der empirischen Parameter unzutreffend

Die empirischen Parameter für die Sohlreibung und die Wirbelzähigkeit sind im allgemeinen in größeren Modellen nicht im gesamten Berechnungsgebiet die gleichen. Daher wird üblicherweise das Modellgebiet in Zonen eingeteilt, in denen dann jeweils z. B. der gleiche Sohlreibungsbeiwert angesetzt wird. Nun kann neben der Annahme ungenauer Parameter (s. u.) auch die Zonierung unzutreffend sein. Ein Fehler ergibt sich daraus, wenn Bereiche, in denen sehr unterschiedliche Parameter angesetzt werden müßten, in die gleiche Zone gelegt werden.
Bei ausreichender Ortskenntnis der Modellersteller durch In-Augenscheinnahme des Projektgebietes, unterstützt durch Luftbilder, lassen sich derartige Fehler in der Regel zuverlässig vermeiden. Und sie werden bei einer sorgfältig ausgeführten Kalibrierung zumeist entdeckt.

2.1.3 Netztopologie falsch

Es ist möglich, fehlerhafte Netztopologien einzugeben. Die Anforderungen an die Netztopologie (strukturierte - unstrukturierte Netze, Element-/Zellenform) sind bei den verschiedenen Diskretisierungsverfahren (FVM, FDM, FEM) unterschiedlich. Bei der Finiten-Elemente-Methode ist es beispielsweise möglich, Elemente falsch zu verknüpfen oder Elemente mit verkehrter Drehrichtung einzugeben. Das führt zumeist zu Singularitäten, die den Berechnungsalgorithmus aussteigen lassen, und ist deshalb für die Berechnungsgenauigkeit unproblematisch. Für die Frage, mit welchem Aufwand solche Fehler beseitigt werden können, ist es aber von entscheidender Bedeutung, ob entsprechende Softwarewerkzeuge zum Auffinden vorhanden sind. Wird zusätzlich der Modellgebietsrand angezeigt, werden auch Netzlücken erkannt, die sonst als künstliche Inseln wirken würden. Fragen zur Netzfeinheit werden unter 2.3.1 diskutiert.

2.2 Mathematische Näherung der physikalischen Vorgänge

Die Abbildung physikalischer Vorgänge durch mathematische Gleichungen stellt immer in gewissem Sinne eine Näherung dar. Dieses weite Feld der Fluiddynamik soll im folgenden nur insoweit kurz gestreift werden, als es um die drei einschneidensten Näherungen geht, die in den Flachwassergleichungen[7] enthalten sind und über die sich der Anwender Gedanken machen muß.

2.2.1 Vernachlässigung der Vertikalgeschwindigkeiten

Bei der Herleitung der Flachwassergleichungen wird der Einfluß der Vertikalgeschwindigkeiten auf die Impulsbilanz vernachlässigt. Daraus resultiert die hydrostatische Druckverteilung. Experimentelle Untersuchungen zeigen, daß diese hydrostatische Druckverteilung auch noch bei mäßigen Vertikalbewegungen gerechtfertigt ist.
Recht offensichtlich ist es, daß in flachen Wasserkörpern (horizontale Ausdehnungen mehr als das 10-fache der Tiefe) für die Ausbreitung nennenswerter vertikaler Strömungskomponenten kein Platz ist. Es gibt aber dennoch Situationen, in denen sich selbst in flachen Oberflächengewässern nennenswerte Vertikalbewegungen ausbilden. Diese Stellen stehen immer im Zusammenhang mit starken Gradienten der Sohltopographie. Z. B. bei überströmten Wehren, Dämmen und Sohlschwellen, aber auch in der Umgebung von Brückenpfeilern treten stärkere Vertikalbewegungen auf, die zu deutlichen Verletzungen der hydrostatischen Druckverteilung führen. Auch wenn die exakte Strömungssituation in der unmittelbaren Umgebung solcher Störstellen z. T. nicht von Belang ist, sind die Flachwassergleichungen nicht in der Lage, die damit einhergehenden Fließwiderstände, die das Strömungsfeld auch in der weiteren Umgebung beeinflussen, annähernd zu ermitteln. Des weiteren läßt sich zeigen, daß durch Erfassen von Fließwiderständen, die z. B. von einem plötzlichen Sohlrücksprung hervorgerufen werden, mittels Sohlreibungsbeiwerten (d. h. wenn einfach „drüberkalibriert" wird) dazu führt, daß das Modell seine Prognosefähigkeit verliert (Wyrwa1994).
An Stellen, wo infolge großer Vertikalgeschwindigkeiten nennenswerte Fließwiderstände auftreten, ist daher eine Erweiterung des 2-dimensionalen Berechnungsverfahrens notwendig.

2.2.2 Schließen der Turbulenz- und Dispersionsberechnungen

Neben der Integration über die Tiefe wird bei der Herleitung der Flachwassergleichungen aus den Navier-Stokes-Gleichungen eine Kurzzeitintegration durchgeführt, um die turbulenten Schwankungsbewegungen herauszumitteln. In den Flachwassergleichungen wird also mit tiefengemittelten Geschwindigkeiten gearbeitet, aus denen auch noch die turbulente Fluktuation herausgemittelt wurde. In den Gleichungen führt dies dazu, daß sogenannte Reynolds-Spannungen (Zeitmittelung) und Dispersionsterme (Tiefenmittelung) hinzutreten. Um die so entstandenen Gleichungen überhaupt geschlossen lösen zu können, ist es notwendig, empirische Ansätze zu verwenden, die die Reynolds-Spannungen und die Dispersionsterme in Abhängigkeit von den gemittelten Geschwindigkeiten berechnen. (Schließung des Gleichungssystems) Physikalisch kann dies damit erklärt werden, daß die turbulente Schwankungsbewegung wie auch die Sekundärströmung Impulse übertragen zwischen Bereichen mit unterschiedlichen gemittelten Geschwindigkeiten. Wandert beispielsweise ein Fluidballen infolge turbulenter Schwankung von einer Zone geringer mittlerer Geschwindigkeit in einen Bereich höherer Geschwindigkeit, wirkt er dort bremsend. D. h. die Reynolds-Spannungen und die Dispersionsterme wirken zumeist ähnlich einer Zähigkeit, und sie werden daher auch gängigerweise mit Schließungsansätzen, die auf dem Wirbelviskositätskonzept basieren, berechnet. Die Strömungen in natürlichen Gewässern weisen üblicherweise sehr große Reynoldszahlen ($>10^7$) auf, so daß die Wirbelviskosität die molekulare Zähigkeit um Größenordnungen übersteigt.
Das Thema Turbulenzmodellierung kann hier nur angerissen werden und ist weiterhin ein Feld, das der Forschung unterliegt. Völlig universell einsetzbare Modelle, die mit heutiger Rechnerleistung bewältigbar sind, existieren leider nicht. Bei einer Anwendung mit strömungsmechanischem Sachverstand ist es aber möglich, selbst mit recht einfachen Ansätzen, wie dem nach Boussinesq, bereits technisch brauchbare Näherungslösungen zu erzielen. Dies setzt aber einige Sorgfalt und Erfahrung bei der Kalibrierung und der Übertragung auf andere Wasserstände voraus.
Die aus der Aerodynamik stammenden 2-Gleichungs-Turbulenzmodelle (zumeist das k-ε Modell), die eine größere Universalität aufweisen, werden auch im Wasserbau zunehmend eingesetzt. Es bestehen aber noch Wissenslücken, was z. B. die Interaktion von Turbulenzmodell und Großbewuchs betrifft. Zudem ist beim Einsatz von reinen Turbulenzmodellen in der zweidimensionalen Berechnung zu beachten, daß auch die Dispersionsterme, soweit sie nicht gesondert erfaßt werden, darunter fallen. Leider unterliegt aber die Sekundärströmung ganz anderen Gesetzmäßigkeiten als die Turbulenz. Und sie läßt sich daher mit Turbulenzmodellen nicht zutreffend simulieren. Wie die Arbeiten von Kawahara & Tamai

---

[6] Als Zone wird im folgenden ein Teil des Berechnungsgebiets bezeichnet. Das Berechnungsgebiet im 2D-Fall ist eine Fläche. Die Summe der Fläche aller Zonen ergibt dann wieder das Gesamtgebiet.

[7] Als Flachwassergleichung werden die nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen bezeichnet, die sich durch Kurzzeit- und Tiefen-Integration aus den Navier-Stokes-Gleichungen ergeben.

(1989) zeigen, ist der Einfluß der Sekundärströmung auf die Wirbelviskosität von gleicher Größenordnung wie der der Turbulenz. Somit ist absehbar, daß in der 2-dimensionalen Strömungssimulation das direkte Kalibrieren einer bereichsweise konstanten Wirbelviskosität (Boussinesq-Ansatz) eine gewisse Berechtigung behalten wird.
Die Nachrechnung von Labormessungen, die (nicht nur) vom Autor durchgeführt wurden (Wyrwa 1994), ergeben, daß mit einer sorgfältig kalibrierten konstanten Wirbelviskosität technisch brauchbare Geschwindigkeitsverteilungen berechnet werden können.
Zum einen handelt es sich dabei um die Nachrechnung der Versuche mit einem Freistrahl in flachem Wasser, die von Giger (1987) durchgeführt wurden. Zum anderen um die Versuche von Booij (1991), der die Scherzone vermessen hat, die sich ausbildet, wenn ein gerader flacher Laborfluß in rechteckigem Gerinne an einem Quadrathafen vorbeifließt. Diese Beispiele sind deshalb sehr aussagekräftig, weil die dort auftretenden Strömungsformen (Strahlausbreitung beim Freistrahl und Impulseintrag in den Hafen) allein von der Wirbelviskosität verursacht werden.
Das Fehlerpotential, das sich mit der Turbulenz- und Dispersions-Schließung verbindet, ist im Bereich von horizontalen Scherschichten besonders groß. Bei Strömungszuständen mit recht gleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilungen hat die Wirbelviskosität geringeren Einfluß.
Der Einsatz von Turbulenzmodellen ist ein Gebiet, das Experten mit vertieften strömungsmechanischen Kenntnissen vorbehalten bleiben sollte.

2.2.3 Modellierung der Sohlschubspannung

Ebenfalls als Folge der Tiefenmittelung sind Ansätze über die Spannungen an der Gewässersohle (und bei windgetriebenen Strömungen auch an der Gewässeroberfläche) erforderlich.
Bei den freifließenden Flüssen des Binnenlandes (Mittelgebirge), wie sie in weiten Teilen Deutschlands anzutreffen sind, stellt sich der Fließvorgang hauptsächlich infolge des Kraftgleichgewichts zwischen treibendem Wasserspiegelgefälle und bremsender Sohlschubspannung ein. Daraus erklärt sich die zentrale Rolle der Sohlschubspannungsmodellierung.
Es werden dafür die auch aus der eindimensionalen Wasserspiegellagenberechnung bekannten Ansätze verwendet (zumeist die nach Gauckler-Manning-Strickler, Chezy oder das Colebrook-White Gesetz).
Bei der zweidimensionalen Simulation fügen sich diese Sohlreibungsansätze aber anders in den Gesamtkontext der Simulation ein. Während im 1D-Fall damit der gesamte in einem Gewässerabschnitt auftretende Energieverlust oder Reibungswiderstand (je nach Formulierung der 1D-Gleichungen) quantifiziert wird, geht im 2D-Fall der flächenspezifische Reibungswiderstand ein (die Flachwassergleichungen sind eine Impulsbilanz in der horizontalen Fläche). Fließwiderstände, die sich aus der unterschiedlichen Verteilung der Geschwindigkeiten im Querprofil ergeben, werden im 2D-Verfahren infolge der flächigen Erfassung des Fließvorgangs durch das Turbulenzmodell berücksichtigt. (In erweiterten 1D-Verfahren wird z. T. versucht, dies durch Abschnittsweise unterschiedliche Beiwerte und Trennflächenreibungskonzepte zu erfassen.)
Die unterschiedlichen Sohlreibungsansätze haben unterschiedliche Eigenschaften, die die Prognosefähigkeit beeinflussen. Für den Ansatz nach Chezy spricht außer seiner mathematisch sehr einfachen Formulierung nichts. Er vermag die Sohlreibung nicht unabhängig vom Wasserstand zu berechnen. Auch der Ansatz nach Gauckler-Manning-Strickler kann für sich nicht in Anspruch nehmen, wasserstandsunabhängig zu sein. Zudem ist der verwendete Beiwert dimensionsbehaftet. In der eindimensionalen Wasserspiegellagenberechnung hat aber eine Parametrisierung der Fließverluste mit dem Manning'schen n oder dem Kehrwert, dem Strickler'schen K_{st}, eine weite Verbreitung gefunden. Dies ist darauf zurückzuführen, daß in der klassischen 1D-Berechnung der Sohlreibungsansatz auch die Reibungsverluste mit erfassen muß, die sich daraus ergeben, daß Gewässer eben nicht gerade Rinnen mit konstantem kompaktem Querschnitt sind. D. h. der Gauckler-Manning-Strickler Ansatz erfaßt den bei ansteigendem Wasserstand zurückgehenden Einfluß der Sohlreibung und den ansteigenden Einfluß der Wirbelviskosität in gängigen Gewässersituationen recht geschickt. (Allerdings wird in einer sorgfältigen Kalibrierung eines 1D-Modells eine Beziehung zwischen K_{st} und dem Wasserstand ermittelt.) Liegen also in einem Gewässerabschnitt 1D Berechnungserfahrungen mit dem K_{st}-Wert vor, sind diese oft eine wertvolle Informationsquelle. In 2D-Modellen ist aber eine explizite, getrennte Berücksichtigung der Einflüsse, die der Ansatz nach Gaukler-Manning-Strickler kombiniert, möglich und sinnvoll, weshalb von ihm eher abzuraten ist.
Als sehr zutreffend für die Berechnung von Wandschubspannungen in turbulenten Grenzschichten ohne Druckgradient haben sich die Ansätze herausgestellt, die auf der Prandtel'schen Mischungsweghypothese basieren. (Strömungen in flachen Gewässern haben über die ganze Tiefe Grenzschichtcharakter). Diese Annahme führt zu einer Funktion, die die Verteilung der Wirbelviskosität über die Tiefe angibt. Durch Integration ergibt sich ein logarithmisches Geschwindigkeitsprofil. Dieses enthält als einen Parameter die Sohlschubspannung. Nach Integration der Geschwindigkeitsverteilung über die Tiefe ergibt sich daraus ein Zusammenhang zwischen tiefengemittelter Geschwindigkeit und der Sohlschubspannung. Abhängig von der Sohlrauheit müssen dabei unterschiedliche Integrationskonstanten im logarithmischen Geschwindigkeitsprofil angesetzt werden, so daß sich unterschiedliche Widerstandsformeln für den hydraulisch glatten Bereich (kleine Rauheitshöhen, kleine Reynoldszahlen, die Rauheiten verschwinden vollständig in der von der molekularen Zähigkeit dominierten Schicht) und für den hydraulisch rauhen Bereich (große Rauheitshöhen, große Reynoldszahlen, die Wandreibung wird durch den Formwiderstand der Rauheiten verursacht) ergeben. „Eine Widerstandsformel, die den ganzen Übergangsbereich von hydraulisch glatt bis hydraulisch rauh gut interpoliert, ist von Colebrook und White angegeben worden" (Schlichting 1982). Andere Interpolationsformeln wurden z. B. von Zanke (1996) aufgestellt. Während im freifließenden Binnengewässer vor allem der voll rauhe Bereich von Belang ist, wird eine genaue Erfassung des Übergangsbereichs z. B. bei der Nachrechnung von Labormodellen wesentlich.
Zur Parametrisierung der Rauheitshöhe hat sich die äquivalente Sandrauheit nach Nikuradse eingebürgert. Wenn andere Rauheitsformen als die von Nikuradse getesteten Sandkörner betrachtet werden, ist die hydraulisch äquivalente Rauheitshöhe und die tatsächliche Unebenheit der Sohle nicht mehr identisch. Die beiden Werte bleiben aber ähnlich. D. h. wird in einer Kalibrierung ein Parameter erforderlich, der in keinem sinnvollen Zusammenhang mit den beobachteten Sohlunebenheiten steht, ist dies ein Anzeichen auf anderweitige Modellfehler.
Messungen in leicht beschleunigten und leicht verzögerten Strömungen von Cardoso et al. (1989) zeigen, daß das Colebrook-White'sche Gesetz auch dort noch praktisch brauchbar ist.
Bei einem abrupten Wechsel der Rauheitshöhe kann die Sohlschubspannung im Übergangsbereich nicht mit dem Colebrook-White'sche Gesetz berechnet werden. Die Strömung benötigt einen gewissen Fließweg, bis sich das Geschwindigkeitsprofil umgebildet hat (Nezu 1991). Dieser Übergangsbereich ist in flachen Gewässern aber klein gegenüber den horizontalen Abmessungen und daher im Sinne einer 2D-Simulation vernachlässigbar (Wyrwa 1994).
Die Fließwiderstände, die der Bewuchs verursacht, werden i.a. auch unter dem Stichwort Sohlreibung behandelt (so auch hier), obwohl z. B. Auwälder, die selbst im Hochwasserfall noch aus dem Wasserkörper herausragen, sich nicht mehr als Sohlunebenheit betrachten lassen.

Die Erfassung des Bewuchs, dessen Höhe sich im fließenden Wasser in der Größenordnung der Wassertiefe befindet, kann natürlich auch mittels der Abflußbeiwerte nach Chezy oder Gauckler-Manning-Strickler geschehen. Da aber das Widerstandsverhalten von Großbewuchs in Abhängigkeit von der Wassertiefe stark von dem in den genannten Verfahren abweicht, setzt dies der Prognosefähigkeit der Berechnung enge Grenzen.
In der Berechnungspraxis des Autors hat sich das Verfahren nach Pasche bewährt, das in seiner Anwendung für 1D-Berechnungen im DVWK-Heft 220 beschrieben ist. Dabei werden die Bewuchselemente als prismatische, stumpfe Störkörper betrachtet, deren Fließwiderstand der Sohlreibung hinzuaddiert wird. Die Parametrisierung geschieht über die geometrischen Größen Bewuchsdurchmesser und Bewuchsabstand. Neben der inzwischen recht guten Fundierung des Verfahrens im Laborexperiment (Schuhmacher 1995) sind auch die mittlerweile umfänglichen Erfahrungen in der praktischen Anwendung widerspruchsfrei. Bei der Erhebungsmethodik und der Verknüpfung der hydraulischen Parameter mit biologischen Beschreibungen besteht jedoch noch Forschungsbedarf.

2.3 Fehler der numerischen Lösung

Es würde hier zu weit führen, die breite Palette der numerischen Verfahren zur Lösung der Flachwassergleichungen durchzugehen. Weiterführende Informationen sind z. B. bei Hirsch (1988) zu finden.
Als Nutzer und Anwender ist man auf die Verwendung eines bewährten und robusten Algorithmus angewiesen, d. h. auf ein Berechnungsverfahren, das ausgiebig validiert wurde, dessen Eigenschaften gutmütig und hinlänglich bekannt sind und zu dem eine professionelle Benutzerumgebung existiert. Der Grund dafür ergibt sich am allerwenigsten aus der Endlichkeit der intellektuellen Fähigkeiten des Anwenders, sondern aus ökonomischen Zwängen.
Wenn auch der Anwender keine umfassende Validierung seines Berechnungsverfahrens durchführen kann und muß, ist es aber doch ratsam, es gelegentlich auf Testfälle anzuwenden, die anhand von Natur- oder Labormessungen einen guten Vergleich erlauben. Die dabei gewonnenen Erfahrungen steigern auch die Sicherheit im Umgang mit dem jeweiligen numerischen Algorithmus.

2.3.1 Diskretisierungsfehler

Allen numerischen Berechnungsverfahren gemeinsam ist die Notwendigkeit, den Raum (und die Zeit) zu diskretisieren, d. h. in Raum und Zeit kontinuierlich verteilte Größen in diskrete Werte zu fassen (das Erzeugen von Berechnungsnetzen).
Für die o. g. robusten und bewährten Algorithmen, die sich schon eine Weile im praktischen Einsatz befinden, kann die Frage nach Konsistenz als hinlänglich geklärt gelten. Konsistenz liegt vor, wenn die numerische Lösung mit zunehmend feiner werdender Diskretisierung, d. h. bei immer kleiner werdenden Raum- und Zeitschritten, gegen die exakte Lösung strebt.
Hier ist es nun erforderlich, daß der Anwender Erfahrung damit hat, was bei dem von ihm benutzten Verfahren hinlänglich fein ist. Mit Diskretisierungen, die entscheidende Strömungsdetails nicht auflösen können, sind Berechnungsergebnisse mit großen Abweichungen von der Realität möglich.
Oftmals lassen sich Fehlermaße aus dem Verfahren heraus ausgeben, die auf Diskretisierungsprobleme hinweisen und eine gezielte Verfeinerung unterstützen. Wirkliche Sicherheit darüber, ob eine Diskretisierung fein genug ist, läßt sich nur dann erzielen, wenn bei der Berechnung mit einem verfeinerten Berechnungsnetz das gleiche Ergebnis herauskommt. Da aber die Rechenzeit überproportional mit der Knoten/Stützstellen-Anzahl ansteigt, sind Verfeinerungstests sehr aufwendig. Vielfach genügt es aber, sich durch eine teilweise Verfeinerung in dem jeweiligen Problembereich Gewißheit zu verschaffen.

2.3.2 Berechnungsverfahren instabil

Als Instabilität bei numerischen Berechnungsverfahren wird ein Vorgang verstanden, bei dem sich kleine Störungen im Verlauf der Berechnung aufschaukeln und bis ins nahezu unendliche anwachsen.[8] Dem Autor sind keine Berechnungsverfahren bekannt, in denen dieses Phänomen nicht auftreten könnte. Die Beschreibung der Ursachen für Instabilitäten würde den Rahmen dieses Artikels bei weitem sprengen, sie sind zudem sehr verfahrensspezifisch. Instabilitäten haben in der praktischen Berechnungstätigkeit schon viel Ärger, Mühe und Kosten verursacht. Für die Qualitätssicherung sind Instabilitäten aber unproblematisch, da ihr Auftreten offensichtlich ist. Das Strömungsfeld, das nach dem Eintreten einer Instabilität ausgegeben wird, ist derart kraus, daß es leicht als fehlerhaft erkannt wird.

2.3.3 Fehlerhafte Software

Bekanntermaßen gibt es keine völlig fehlerfreie Software. Fehlerhafte Umsetzungen eines Algorithmus in eine Programmiersprache führen zwar glücklicherweise meistens zu Programmabbrüchen oder erkennbar unsinnigen Ergebnissen, aber leider nicht immer. Die heute verwendeten Berechnungscodes sind so umfangreich, daß sie nicht mehr Zeile für Zeile kontrollierbar sind. Neben der kritischen Durchsicht der Ergebnisse schaffen gelegentlich durchgeführte Testrechnungen und die Verwendung bewährter Verfahren eine relative Sicherheit.

2.4 Fehlerhafte Randbedingungen

Der eine Teil des Modellgebietsrandes wird durchströmt. Die Randbedingungen an den überströmten Rändern beschreiben die Interaktion mit benachbarten Gewässerabschnitten, die nicht im Modellgebiet enthalten sind. Bei strömenden Fließvorgängen in Binnen-Flüssen handelt es sich dabei um den Zufluß, der sich ins Modellgebiet ergießt und den Rückstau ins Modellgebiet aus unterstromig liegenden Gewässerabschnitten. D. h. Randbedingungen stammen nicht aus der Simulation selbst, sondern müssen anderen Berechnungen, Messungen oder Ansätzen entnommen werden, die fehlerhaft sein können. Die gängige Kombination der Randbedingungen sind die Vorgabe von Geschwindigkeiten am Zuflußrand und von Wasserspiegellagen am Ausflußrand.
Der nicht überströmte Rand des Berechnungsgebiets sind die Ufer des Gewässers. Die Ermittlung der Lage der Uferlinie und ihre Darstellung im Berechnungsverfahren stellt hierbei das Hauptproblem dar.

2.4.1 Zuflußmenge falsch

Modelle von Flußabschnitten werden von dem als Zufluß angesetzten Volumenstrom üblicherweise insgesamt durchflossen. Daher wirkt sich eine falsch angesetzte Zuflußmenge im gesamten Berechnungsgebiet aus. Einem solchen Fehler kann nur durch sorgfältige Ermittlung des zufließenden Volumenstroms begegnet werden.
Die Möglichkeit, einen fehlerhaft angesetzten Volumenstrom bei der Kalibrierung zu entdecken, ist nur dann gegeben, wenn der Fehler entweder recht groß ist oder aber wenn eine große Anzahl an Messungen (insbesondere Geschwindigkeitsmessungen) für die Kalibrierung zur Verfügung stehen. Dies ist aber in praktischen Anwendungen in aller Regel leider nicht der Fall.

2.4.2 Zufluß falsch verteilt

Die Besonderheiten der 2-dimensionalen Berechnung bringen es mit sich, daß nicht nur der zufließende Volumenstrom, sondern auch die Verteilung der tiefengemittelten Geschwindigkeiten entlang des Zuflußrandes vorgegeben werden müssen. Diesen Schritt

[8] Nicht zu verwechseln mit der Instabilität des Strömungsvorgangs selbst, wie sie beispielsweise beim laminar-turbulenten Umschlag auftritt.

muß der Bearbeiter zwar heutzutage meist nicht mehr explizit von Hand auszuführen. Auf der Basis von plausiblen Ansätzen wird diese Aufgabe von den dafür zur Verfügung stehenden Software-Werkzeugen übernommen. Es ist aber notwendig, sich über die Konsequenzen im klaren zu sein.
Die gängige Annahme geht davon aus, daß das Energiegefälle senkrecht zum Zuflußrand konstant ist. Diese Annahme ist aber nur bei langen geraden Gewässerabschnitten gut erfüllt. In anderen Fällen kann die Verteilung des Abflusses beträchtlich davon abweichen.
Der Einfluß dieser Verteilung klingt aber entlang des Fließweges schnell ab. D. h. auch bei unterschiedlichen Zuflußverteilungen stellt sich nach einer gewissen Fließstrecke immer der gleiche „richtige" Strömungszustand von selbst ein. Wird nun das Berechnungsgebiet entsprechend größer als das Untersuchungsgebiet gewählt, läßt sich dieser Fehler, der leider a priori unumgänglich ist, in den Teil des Berechnungsgebietes verlagern, zu dem keine Aussagen getroffen werden müssen. Die Sensitivitätsuntersuchungen des Autors ergaben, daß in Binnen-Flüssen mit üblichen Sohlrauheiten die zweifache Länge des Zuflußrandes einen guten Anhaltswert für das Abklingen dieser Randstörung darstellt.

2.4.3 Wasserspiegel im Unterwasser falsch

Die gängigerweise am Ausflußrand vorgegebene Lage des Wasserspiegels kann ungenau sein. Der Einfluß dieses Fehlers ist stark von der Länge der Staukurven in der betreffenden Gewässersituation, also von der Froudezahl, abhängig. So entfällt diese Randbedingung bei schießenden Abfluß z. B. gänzlich. In sehr langsamen, stark rückgestauten Gewässersituationen ist aber die Wasserspiegellage im Modellgebiet z. T. mehrere 10 km vom Unterwasserspiegel beeinflußt. Dementsprechend sorgfältig muß dieser bestimmt werden. Wie stark der Einfluß in der konkreten Situation tatsächlich ist, läßt sich anhand einer Sensitivitätsuntersuchung recht einfach ermitteln. Zudem sind Wasserspiegellagen mit deutlich weniger Aufwand meßbar als Geschwindigkeiten oder Abflüsse, was ebenfalls das Fehlerpotential vermindert.
Die Frage nach einer möglichen Querneigung des Wasserspiegels im Ausflußrand ist ähnlich gelagert wie die nach der Verteilung des Zuflusses. Der Einfluß klingt ebenfalls mit zunehmender Entfernung vom Rand ab. Deshalb ist es auch im Unterwasser notwendig, das Berechnungsgebiet größer als das Untersuchungsgebiet zu wählen.

2.4.4 Uferlinie ungenau erfaßt

Natürliche Gewässer laufen an ihren Rändern üblicherweise flach aus. Die Begrenzung durch senkrechte Wände ist eher die Ausnahme. Das numerische Verfahren muß bei der zweidimensionalen Strömungsberechnung die Uferlinie ermitteln, weil zum einen der Wasserstand vor der Berechnung noch unbekannt ist und zum anderen bei instationären Vorgängen sich die Uferlinie bewegt.
Die Randbedingungen an dieser Uferlinie werden im allgemeinen vom Verfahren automatisch so gesetzt, daß die Strömung parallel zum Ufer verläuft. Die Geschwindigkeit in den ufernahen Bereichen flach auslaufender, natürlicher Gewässer wird von der Sohlreibung bestimmt, weswegen eine Vorgabe des Betrages der Geschwindigkeit am Rand nicht sinnvoll ist.
Beachtung vom Anwender verlangt das Verfahren zur Darstellung der Uferlinie. Diese Linie teilt das Berechnungsgebiet in nasse und trockene Bereiche und kann das Berechnungsnetz völlig willkürlich schneiden. Somit existieren nicht nur Elemente oder Zellen, die ganz naß oder ganz trocken sind, sondern auch teilbenetzte Bereiche. Einfachere Verfahren schalten diese ganz trocken. Dies führt unweigerlich zu gezackten Rändern, an denen in ungünstigen Fällen auch noch große Wassertiefen vorliegen können. Fortgeschrittenere Verfahren versuchen die Berechnung teilbenetzter Elemente. Aber auch damit ist nicht die Berechnungsgüte erzielbar, die sich erreichen ließe, wenn Modellgebietsrand und Uferlinie exakt aufeinander liegen würden. Der Anwender ist also gezwungen zu prüfen, ob das verwendete Uferabbildungsverfahren seine Erfordernisse im speziellen Fall erfüllt. Desweiteren kann durch eine geeignete Diskretisierung in den Zonen des Berechnungsnetzes, die von der Uferlinie überstrichen werden, viel für die Genauigkeit und die Stabilität der Berechnung getan werden. Dabei ist eine feinere Diskretisierung die günstigere. Bei dem dafür erforderlichen Aufwand gilt es aber zu überlegen, inwieweit die damit genauer modellierten Uferbereiche auf das Gesamtgeschehen Einfluß haben und ob in diesen Uferbereichen eine genaue Prognose gefordert wird.

2.5 Kalibrierungsfehler

Bei der Kalibrierung, die vielfach auch als Eichung bezeichnet wird, werden die empirischen Parameter für die Sohlrauheiten und die Wirbelviskosität so eingestellt, daß das Modell in der Lage ist, einen (oder mehrere) vermessene Strömungszustände gut wiederzugeben.

2.5.1 Meßwerte ungenau

Beim Kalibrieren wird davon ausgegangen, daß die Messungen die Realität genau wiedergeben. Somit steigt der Kalibrierungsfehler mit den Meßfehlern.
In dem Fall, in dem die empirischen Parameter beim Kalibrieren Werte annehmen, die zu den Gegebenheiten im Modellgebiet überhaupt nicht mehr passen, liegt natürlich der Verdacht auf Meßfehler nahe. Genausogut könnten aber auch Modellierungsungenauigkeiten die Ursache sein.
Es ist daher erforderlich, daß sich der Anwender eines 2-dimensionalen Strömungsmodells im Detail darüber informiert, wie, wann und warum die Messungen durchgeführt wurden, die seiner Kalibrierung zugrunde liegen. Dies ist auch deshalb notwendig, weil in praktischen Anwendungen gut dokumentierte Meßwerte meist Mangelware sind.

2.5.2 Werte für die empirischen Parameter ungenau

Recht deutliche Abweichungen zwischen Modell und Realität sind möglich, wenn unzutreffende empirische Parameter verwendet werden. Dies kann z. B. dann passieren, wenn ein unerfahrener Modellierer sich etwas wahllos Zahlen aus der Fachliteratur besorgt.
Wenn die Werte der empirischen Parameter aber an genügend aussagefähigen Meßwerten kalibriert werden können, ist die Gefahr, das Modell zu verstellen, weitgehend gebannt.

2.5.3 Zuordnung der empirischen Parameter nicht eindeutig

Der Prozeß der Kalibrierung stellt einen Optimierungsprozeß dar, bei dem ein Satz von empirischen Parametern (in jeder Zone die Sohlrauheit und evtl. Wirbelviskosität und gegebenenfalls auch Bewuchsparameter) so optimiert werden soll, daß eine Anzahl von Meßwerten vom Modell möglichst gut nachgebildet wird. Dieses mathematische Problem kann erst dann Lösungen haben, wenn die Anzahl der Meßwerte die Anzahl der empirischen Parameter übersteigt. Dies ist in praktischen Anwendungen oft nicht realisierbar.
Zudem ergibt sich das Problem der Uneindeutigkeit. D. h., daß eine unterschiedliche Einstellung der empirischen Parameter nicht dazu führt, daß sich die Berechnungsergebnisse an den Punkten ändern, die mit der Messung verglichen werden können. Wenn z. B. in einem Gewässerabschnitt die Meßwerte ein Wasserspiegelgefälle in Längsrichtung ausweisen, kann dies mit Hilfe der Sohlreibung aber auch durch Anpassen der Wirbelviskosität eingestellt werden. Im konkreten Projekt kann hier eine Sensitivitätsuntersuchung hilfreich sein.

Daraus folgert, daß bei der Festlegung der empirischen Parameter neben der reinen Kalibrierung weitere Informationen in den Modellierungsprozeß mit einfließen müssen. Als Informationsquellen bieten sich dabei vor allem Erfahrungen mit Modellanwendungen in vergleichbaren Strömungssituationen an. Dies ist auch der Grund, warum bei der Kalibrierung Augenmaß, Erfahrung und strömungsmechanisches Wissen des Anwenders gefragt ist. Der Rückgriff auf numerische Optimierungsalgorithmen führt leider nicht zum Ziel.

Zwei Punkte lassen sich aus o. g. ableiten:

Zum einen ist bei der Zonierung des Modellgebietes Augenmaß gefordert. Eine übergroße Anzahl an verschiedenen Zonen führt zu einer Unzahl an emp. Parametern, die durch Meßwerte meist nicht festgelegt werden können. Es ist also durchaus geboten, Bereiche des Modellgebiets mit ähnlicher Sohlstruktur und ähnlicher Lage im Strömungsgeschehen in der gleichen Rauheitszone zu erfassen (Z. B. Wiesen / Äcker auf dem Vorland). Die Erfassung eines reich strukturierten Modellgebiets in z. B. nur einer Zone aufgrund eines Meßwertemangels ist aber ebenfalls realitätsfern.

Der zweite Punkt ist die Erkenntnis, daß jenes letzte Quentchen Naturnähe, daß eine gute Berechnung von einer exzellenten trennt, nur dann aus einem numerischen Strömungsmodell herausgeholt werden kann, wenn genügend gute Messungen (insbesondere Geschwindigkeitsmessungen) vorliegen. (Ein Umstand, der sich in der Praxis meist über den Preis regelt.)

Nicht unerwähnt bleiben soll an dieser Stelle die weiterführende Erkenntnis, daß auch die Weiterentwicklung der in den numerischen Berechnungsverfahren enthaltenen empirischen Annahmen (vor allem Turbulenzmodell und Sohlschubspannungsansatz) eng mit der Verfügbarkeit aussagefähiger Messungen verknüpft ist.

2.5.4 Strömungszustand Messung-Vorhersage sehr unterschiedlich

Dies ist nun die Frage nach der Prognosefähigkeit des kalibrierten Modells. Sie ist nicht unbegrenzt, weil das Turbulenzmodell und das Sohlschubspannungsmodell auf einen gewissen empirischen Input angewiesen sind. Näheres wurde bereits weiter oben in Abschnitt 2.2 Mathematische Näherung der physikalischen Vorgänge ausgeführt.

D. h. wenn die Wahl besteht, sollte mit dem Strömungszustand kalibriert werden, der der Prognosesituation am nächsten kommt. Wenn der Abstand zwischen der kalibrierten Situation und dem Prognosezustand sehr groß wird (z. B. die Wassertiefe um mehr als 50% zunimmt), ist es ratsam, die Wirbelviskosität aufgrund plausibler Ansätze zu extrapolieren, da das Turbulenzmodell nach Bousinesq einen nicht allzu großen Prognoseradius besitzt. Der Vorteil des Colebrook-White-Gesetzes gegenüber anderen Ansätzen für die Sohlschubspannungen besteht gerade in dem großen Prognoseradius, es sollte deshalb nicht dem Strömungszustand angepaßt werden.

Fehlermöglichkeiten bei der 2-dimensionalen Strömungssimulation		
Ursachen	*Fehlerpotential*	*Gegenmaßnahme*
Modellerstellungsfehler (Abschn. 2.1)		
Geländetopographie unzutreffend	hoch, sinkt mit zunehmender Wassertiefe	visualisieren, kritische Durchsicht
Zonierung der empirischen Parameter unzutreffend	mäßig	Ortskenntnis, aufmerksam kalibrieren
Netztopologie falsch	gering, da zumeist Berechnungsabbruch	automatisch prüfen und visualisieren
mathematische Näherung der physikalischen Vorgänge (Abschn. 2.2)		
Vernachlässigung der Vertikalgeschwindigkeiten	hoch an Stellen mit starken Vertikalbewegungen	Strömungen in flachem Gewässer über flacher Sohle simulieren oder Verfahren erweitern
Turbulenz-/Dispersionsschließung	von der Kalibrierung der empir. Parameter abhängig	zutreffende Ansätze verwenden, sorgfältig kalibrieren, Sensitivitätsuntersuchung
Sohlschubspannungsmodellierung	Hauptursache für die Notwendigkeit zu kalibrieren	s. o.
Fehler der numerischen Lösung (Abschn. 2.3)		
Diskretisierungsfehler	hoch	Fehlermaße auswerten, Verfeinerungstests durchführen
Berechnungsverfahren instabil	gering, da offensichtlich	Berechnungsverlauf und Ergebnisse kritisch beobachten
fehlerhaft implementierter Code	hoch!	Testrechnungen, Anwendungsverfahren
fehlerhafte Randbedingungen (Abschn. 2.4)		
Zuflußmenge falsch	nicht behebbar	sorgfältige Evaluierung
Zufluß falsch verteilt	klingt ab	Modelgebiet ausreichend groß, Sensitivitätsuntersuchung
Wasserspiegel im Unterwasser falsch	steigt mit abnehmender Froudezahl an	sorgfältige Evaluierung, Modellgebiet ausreichend groß, Sensitivitätsuntersuchung
Uferlinie ungenau erfaßt	steigt mit der Bedeutung flacher Uferbereiche für das Gesamtgeschehen	geeignetes Verfahren verwenden, problemangepaßt diskretisieren
Kalibrierungsfehler (Abschn. 2.5)		
Meßwerte ungenau	steigt mit dem Ausmaß der Meßfehler	Messungen „beleuchten"
Werte für die empirischen Parameter ungenau	deutlich – selbst bei Verwendung plausibler Werte; gering – bei Vergleich mit aussagefähigen Meßwerten	genügend geeignete Meßwerte verwenden, Messungen durchführen (Geschwindigkeiten)
Zuordnung der empirischen Parameter nicht eindeutig	steigt an mit abnehmender Dichte der Meßwerte	Messungen durchführen, Sensitivitätsuntersuchung
Strömungszustand Messung-Vorhersage sehr unterschiedlich	steigt mit dem Abstand Messung-Vorhersage	geeignete Meßwerte verwenden, geeignete Modelle verwenden, notfalls empirische Parameter extrapolieren

3 Überblick bewahren

Dieser Punkt spielt bei vielen Berechnungsdienstleistungen und gutachterlichen Stellungnahmen eine wichtige Rolle und soll deshalb hier kurz angesprochen und um seine Besonderheiten bei der 2D-Simulation erweitert werden.
Kerngedanke in diesem Abschnitt ist es, bei der im Detail oft verwirrenden Bearbeitung in jeder Phase den Sinn der Bearbeitung noch klar vor Augen zu haben. Das Bewahren eines klaren Überblicks ist qualitätssteigernd, weil damit Lücken in der Bearbeitung frühzeitig erkannt werden.

3.1 Umfassende Projektkenntnis und Evaluierung

Es hat sich als wichtig für den Berechnungsdurchführenden herausgestellt, sich einen Überblick über das Gesamtprojekt zu verschaffen. Zum einen, um eine Dienstleistung erbringen zu können, die in den Projektrahmen paßt. Zum anderen ist es wichtig, schon am Anfang eines Projektes die notwendige Bearbeitungstiefe und die benötigten Daten und Messungen festzulegen. Nacharbeitungen sind meist aufwendig und mindern daher die Qualität.
Durch eine sorgfältige Evaluierung lassen sich manchmal auch aus recht nebensächlichen Informationen wichtige Rückschlüsse auf die zu berechnende Strömung oder deren Randbedingungen ableiten. So ist zum Beispiel eine In-Augenscheinnahme des Projektgebiets immer unerläßlich. Ältere Anwohner eines Gewässers und Angler sind dabei oft eine unersetzliche Informationsquelle. Vielfach läßt sich aus Flora und Fauna auf die Strömung rückschließen. Und manche schrullig anmutende historische Unterlage enthält bei näherer Betrachtung interessante Informationen.

3.2 Sichtbare Modellerstellung

Der noch vor einigen Jahren übliche „Blindflug im Zahlendschungel" bei den numerischen Simulationstechniken ist zwar heute dank fortgeschrittener Visualisierungstechniken im EDV-Bereich (CAD, GUI, GIS) kaum noch anzutreffen. Selbst Menschen, die den Umgang mit Zahlen gewohnt sind, können sich von einem Vorgang leichter ein zutreffendes Bild machen, wenn er bildlich dargestellt wird.
Für die zweidimensionale Strömungssimulation von Oberflächengewässern bedeutet das, daß bei der Modellerstellung der Lagebezug entscheidend ist, da die überströmte Topographie die maßgebliche Randbedingung für den Strömungszustand ist. Die Hinterlegung von Lageplänen beim Netzaufbau hat sich dabei bewährt. Beim Erstellen solcher Lagepläne in der Evaluierungsphase eines Projektes ist deshalb darauf zu achten, alle strömungsbestimmenden Strukturen mit zu erfassen. Dabei kann sich dann schon einmal ein kleiner Wiesengraben, der mühsam vermessen worden war, im Hochwasser eines größeren Flusses als völlig unbedeutend herausstellen, und eine wilde Bauschuttdeponie ist in einer topographischen Karte meist nicht als der Querriegel verzeichnet, als der sie im Strömungsgeschehen wirkt.

3.3 Sichtbare Berechnungsergebnisse

Ähnliches wie für den Zahlendschungel Eingabedaten gilt auch für den Zahlendschungel Ergebnisdaten. Neben dem Bestreben nach einer ansprechenden und informativen Präsentation für den Nutzer ist die sorgfältige Begutachtung der Ergebnisse durch den Berechnungsdurchführenden wichtig. Nur so können z. T. Diskretisierungsfehler oder fehlerhafte Randbedingungen erkannt werden. Auch erleichtert eine gute Visualisierung der Ergebnisse den sorgfältigen Vergleich von Messung und Kalibrier-Berechnung, was vielfach Rückschlüsse auf Ungenauigkeiten bei der Modellerstellung zuläßt.

3.4 Darstellungsmöglichkeiten nutzen

Mit Darstellung ist hier nun nicht nur das bildgebende Verfahren des Computers gemeint, sondern darüber hinaus die Vermittlung/Kommunikation des Berechnungsprojekts. So führt z. B. der Kurzvortrag im Kollegenkreis vielfach dazu, jenen gedanklichen Kurzschluß aufzubrechen, der sich infolge allzu intensiver Projektbearbeitung eingestellt hatte. Die Möglichkeiten der Darstellung von Zwischenergebnissen vor anderen Projektbeteiligten sollten genutzt werden, weil manchmal erst dabei bislang übersehene Aspekte zutage treten.

3.5 Übersichtliches Projektmanagement

Auch das Management, d. h. der Vorgang des Zusammenbringens von Aufgaben und Mitteln/Kapazitäten, hat einen Einfluß auf die Bearbeitungsqualität. Dabei gehen Wirtschaftlichkeit und Bearbeitungsqualität interessanterweise oft Hand in Hand. Nur durch ein Management, das den gesamten Prozeß des Berechnungsprojekts überblickt, läßt sich sicherstellen, daß Mittel nicht für weniger wichtige Details verwendet werden, die nachher für qualitätsentscheidende Bearbeitungsschritte fehlen. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, einen Abarbeitungsplan bereits in der Angebotsphase zu erstellen. Sehr schädlich nicht nur für die Qualität, sondern auch für die Wirtschaftlichkeit eines Projekts sind personelle Diskontinuitäten.

Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Qualitätssicherung beim praktischen Einsatz von zweidimensionalen, tiefengemittelten Strömungssimulationen von Oberflächengewässern.
Die Ursachen für Qualitätseinbußen, d. h. Abweichung zwischen Natur und Berechnung, lassen sich in fünf Gruppen zusammenfassen:
- Der Simulation ist ein ungenaues Abbild des Berechnungsgebietes zugrundegelegt, z. B. wenn die Daten zur Topographie fehlerhaft sind.
- Die Flachwassergleichungen, die bei der 2D-Simulation eingesetzt werden, enthalten Vernachlässigungen und empirische Annahmen, die nicht immer zutreffen müssen.
- Auf numerischem Wege wird lediglich eine Näherung an die Lösung der Flachwassergleichungen berechnet.
- Die an den Rändern des Untersuchungsgebietes vorzugebenden Bedingungen haben meist nur begrenzte Genauigkeit.
- Beim Kalibrieren des Modells werden die empirischen Parameter an die lokalen Gegebenheiten mehr oder weniger gut angepaßt.

Dieser Beitrag geht davon aus, daß pauschale Abschätzungen der Qualität nicht möglich sind und diskutiert daher die Fehlerursachen, das in ihnen enthaltene Fehlerpotential und die Möglichkeiten der Prüfung und Vermeidung im Detail.
Der mathematisch-naturwissenschaftliche Hauptteil wird ergänzt durch Betrachtungen über den Einfluß von Projektplanung, Darstellung, Kommunikation und Projektmanagement. Dabei wird die Forderung „Überblick bewahren" in den Vordergrund gestellt.

Summary

The paper treats quality assurance in practical applications of two-dimensional, depth-averaged flow simulations of surface waters.
The causes of quality losses, i. e. discrepancies between nature and computation can be summarized in five groups:
- The simulation model is based on a false picture of the study area, e.g. if topographic data are inadequate.
- The equations for shallow water zones in the 2D simulation use simplifications or empirical assumptions which are not necessarily correct.
- The numerical computation yields merely an approximation to the solution of the shallow-water equations.
- The conditions defined for the boundaries of the study area mostly have limited accuracy.
- In calibrating the model, the empirical parameters are more or less correctly fitted to the local conditions.

This paper is based on the assumption that it is not possible to give an overall quality assessment and discusses consequently in more detail the causes of errors, the inherent error potential and the possibilities of error checks and error prevention.
The mathematical-scientific main text is supplemented by a consideration of the influences of project planning, presentation, communication and project management, while putting the demand „don't lose the overview" into the foreground.

Anschrift des Verfassers:
Dipl.-Ing. J. Wyrwa
c/o Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover, Appelstraße 9A
30167 Hannover
Tel.: 0511/762-4786, email: wyrwa@hydromech.uni-hannover.de

Literaturverzeichnis

Booij, R. (1991): Eddy viscosity in a harbour. pp. C-83 (refined Flow Modelling), XXIV IAHR Congress, Madrid

Cardoso, A. H., W. H. Graf & G. Gust (1989): Spatially accelerating flow in smooth open channel. pp. A-7, XXIII IAHR Congress, Ottawa

DVWK (1991): Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. DVWK Heft 220, Bonn

Giger, M. (1987): Der ebene Freistrahl in flachem Wasser (Dissertation). ETH Zürich, Inst. f. Hydromechanik

Hirsch, C. (1988): Numerical computations of internal and external flows, Vol. I and II. – John Wiley & Sons, Chichester

Kawahara, Y. & N. Tamai (1989): Mechanism of lateral momentum transfer in compound channel flows, pp. B-463, XXIII IAHR Congress, Ottawa

Nezu, I. & H. Nakagawa (1991) Response of velocity and shear stress to abrupt irregularity of bed roughness in streams, pp A-234, 24th IAHR Congress, Madrid

Pasche, E. (1989): Ein Modell zur zweidimensionalen Strömungsberechnung von Fließgewässern, Teil I und II. – Wasser und Boden, Januar/Februar 1989

Pfitzinger, E. (1995): DIN EN ISO 9000 in der Softwareentwicklung. – Beuth Verlag, Berlin

Schlichting, H. (1982): Grenzschicht-Theorie. – Verlag G. Braun, Karlsruhe

Schuhmacher, F. (1995): Zur Durchflußberechnung gegliederter, naturnah gestalteter Fließgewässer. Mitteilung Nr. 127 des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Berlin

Sonyi, R. & H. P. Zinser (1996): Auf dem Weg zum Zertifikat (Qualitätsmanagementsysteme in kleineren und mittleren Unternehmen). – Teubner Verlag

Wyrwa, J. (1994): Zur Abschätzung der empirischen Parameter 2-dimensionaler Strömungsmodelle; Beitrag zum Seminar „Zweidimensionale Strömungsmodelle für Oberflächengewässer, sicher und gezielt einsetzen". – Björnsen Beratende Ingenieure GmbH, Koblenz

Zanke, U. C. E. (1996): Zum Übergang hydraulisch glatt - hydraulisch rauh. – Wasser und Boden, 48.Jg., 10/1996