



**ZUR BERECHNUNG DES WELLENABLAUFES IN NATÜRLICHEN UND KÜNSTLICHEN GERINNEN MIT BERÜCKSICHTIGUNG DES RETENTIONSEFFEKTES.**

**FLOOD ROUTING IN NATURAL AND ARTIFICIAL CHANNELS WITH REGARD TO RETENTION EFFECTS.**

H. BREINER

**Kurzfassung**

Es wird ein hydraulisches Wellenablaufmodell beschrieben, bei welchem für die notwendige Diskretisierung zur Lösung der Grundgleichungen nach de SAINT VENANT Transformationen vorgenommen wurden. Die transformierten Gleichungen erlauben eine anschauliche Darstellung der verwendeten mathematischen Beziehungen. Der Lösungsvorgang selbst erfolgt mit Hilfe eines speziellen Iterationsverfahrens, welches derart konzipiert wurde, daß die Berechnungen auf einem normalen PC durchgeführt werden können.

Auf Grund der Anfangswerte und der Randbedingungen kann eine Wellenablaufberechnung bei Vorliegen von kompakten und gegliederten Profilen vorgenommen werden. Die für gegliederte Profile mit Hochwasservorländern notwendige Modifikation der Grundgleichungen wird in einem künftigen Fachbeitrag dargelegt.

Es ist auch möglich, kontinuierlich erfolgende Zu- bzw. Abströmungen - z.B. Infiltrationsvorgänge im Zusammenhang mit dem Grundwasserregime - zu berücksichtigen. Im Falle der Notwendigkeit einer Einbeziehung örtlicher Zubringer wird diesem Umstand durch eine geeignete Abschnittstrennung mit erforderlichen Randbedingungen Rechnung getragen.

Alles in allem können mit Hilfe von vollständigen hydraulischen Wellenablaufmodellen - wie etwa dem hier beschriebenen - naturgemäß auch Prognoseberechnungen für infolge von Baumaßnahmen veränderte Abflußverhältnisse vorgenommen werden, was bei hydrologischen Verfahren im allgemeinen nicht möglich erscheint.

#### **Abstract**

A hydraulic flood routing model is described which is based on a discretized version of the de Saint Venant equations. In discretizing the equations transformations are made. The transformed equations allow an illustrative representation of the mathematics used. The solution is found by applying an iteration procedure which can be implemented using small PCs.

With initial and boundary conditions given, the flood propagation can be computed for uniform and composite river profiles. The modifications necessary for the analysis of composite channels with flood plains will be presented in a forthcoming paper.

Continuous inflow into and outflow from the channel, e.g. infiltration from flood plains, can be regarded. Local tributaries can be included in the model by modelling separate river sections with appropriate boundary conditions.

Complete hydraulic flood routing models like the one described in this paper can be used to predict changes in flood propagation due to structural measures, which can hardly be achieved by the application of hydrologic routing models.

## 1. Problemstellung

Die Kenntnis über den Ablauf von Wellen, insbesondere von Hochwasserwellen, ist in Bezug auf die Belange des Schutzwasserbaues von besonderer Bedeutung. Vermittelt doch diese Kenntnis die Grundlage für die Feststellung der Gefährdungsbereiche in den Abflußräumen sowie für die Abschätzung der Gefährdungspotentiale. Andererseits ergeben sich aus den daraus resultierenden Konsequenzen die Grundsätze für die Festlegung der vorzunehmenden Schutzmaßnahmen sowie für die Erhaltungsnotwendigkeiten von Überflutungs- bzw. Retentionsräumen.

Die Durchführung von Wellenablaufberechnungen gewinnt bei der Erstellung von schutzwasserwirtschaftlichen Konzepten sowie für die Planung und Ausführung von schutzwasserbaulichen Maßnahmen zunehmend an Bedeutung.

Es wird daher ein Überblick über die angewendeten Berechnungsmethoden vermittelt, wobei insbesondere auf das hydraulische Wellenablaufberechnungsverfahren nach B. de SAINT VENANT (1871) eingegangen wird.

## 2. Berechnungsverfahren

Grundsätzlich sind im Zuge der Wellenablaufberechnung zwei Kategorien zu unterscheiden, die sog. hydraulischen Verfahren und die hydrologischen Berechnungsmethoden.

### 2.1. Hydraulische Wellenablaufmodelle

Im Rahmen der hydraulischen Behandlung erfolgt die mathematische Beschreibung der Strömungsvorgänge in sog. "eindimensionaler Form" in Strömungsrichtung. Querströmungen müssen gesondert erfaßt und durch entsprechende Einflußgrößen berücksichtigt werden.

Die hydraulischen Berechnungsgrundlagen für instationäre Gerinneströmungen inkompressibler Flüssigkeiten sind gegeben

durch

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

der Kontinuitätsbedingung und mit

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial w}{\partial x} + g J_E = 0 \quad (2)$$

der Bewegungsgleichung nach B. de SAINT VENANT.<sup>1)</sup>

Das Energieliniengefälle  $J_E(x, t)$  wird bei Vorliegen einer turbulenten Strömung im sog. "hydraulisch rauhen" Bereich im allgemeinen mit Hilfe einer stationären Durchfluß-Widerstandsbeziehung

$$Q = K \sqrt{J_E} \quad (3)$$

berechnet.

K wird als "Hydraulischer Leitwert" (Conveyance; v.T. CHOW; 1959) bzw. als "Spezifischer Durchfluß" (NAUDASCHER; 1987) bezeichnet und hängt von der Höhenlage des Wasserspiegels, den geometrischen Profilkenngrößen und den Reibungs- bzw. Fließbeiwerten ab.

Die Gleichungen (1) und (2) - ein System von quasi-linearen Differentialgleichungen von hyperbolischem Typ - bilden nach Formulierung der Randbedingungen gemeinsam mit Gl.3 die Grundlage für die Berechnung des instationären Strömungsablaufes sowohl im überkritischen als auch im unterkritischen Fließzustand.

Für die nunmehr vorzunehmende Interpretation der Eigenschaften des durch die Gln. 1-3 dargelegten hydraulischen Modells wird die nachstehende Zusammenfassung und Umformung für Rechteckquerschnitte vorgenommen:

---

<sup>1)</sup> Anm.: Die hier und im folgenden verwendeten Symbole und Formelzeichen sind in Abschnitt 7 angeführt.

$$Q = A \cdot v = A \cdot C \sqrt{h \left( J_s - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \right)}. \quad (4)$$

Die drei letzten Terme im Klammerausdruck der Gl.4 bewirken, daß eine eindeutige Durchfluß-Wasserstandsbeziehung im allgemeinen nicht existiert. Dies trägt den tatsächlich beobachteten Verhältnissen Rechnung, daß bei ein- und demselben Wasserstand am Anstieg der Welle ein anderer Abfluß auftritt als am Abstieg.

Durch eine Vernachlässigung der vorhin angesprochenen Glieder in Gl.4 wird die Wasserstands-Abflußbeziehung eindeutig. Es liegt die mathematische Formulierung für die sog. "Kinematische Welle" vor, die theoretisch nicht gedämpft werden kann.

In Wirklichkeit tritt jedoch im allgemeinen eine Abflachung der Welle auf.

Werden nur die mit der Beschleunigung zusammenhängenden zwei letzten Glieder in Gl.4 nicht in Rechnung gestellt, so liegt eine "Diffusionswelle" vor, die der erforderlichen nicht-eindeutigen Wasserstands-Abflußbeziehung in Form der Durchflußschleife Rechnung trägt und die Wellenverformung berücksichtigt.

Eine anschauliche Darstellung der Zusammenhänge der in Gl.4 auftretenden Terme mit den Wellentypen wurde von D. GUTKNECHT (derzeit noch unveröffentlicht) gegeben.

## 2.2 Hydrologische Wellenablaufmodelle

Die hydrologischen Verfahren nehmen lediglich auf die Kontinuitätsbedingung (Gl.1) Bezug, was aber die Notwendigkeit der Formulierung einer Zusatzbeziehung anstelle von Gl.2 nach sich zieht. Bei dieser Zusatzbeziehung sind entsprechende Parameter zu bestimmen, die dem Abflußvorgang Rechnung tragen.

Im Rahmen der hydrologischen Flood-routing-Verfahren ist vor allem die MUSKINGUM-Methode (CUNGE, J.A.; 1969) sowie die Wellenablaufberechnung nach KALININ-MILUKOV (ROSEMANN, H.J. und VEDRAL, J.; 1970 und ROSEMANN, H.J.; 1971) zu erwähnen.

Beide Verfahren können auf die Anwendung von Linear-Speichern (NASH J.E.; 1960) in Form von "Einzelspeichern" bzw. "Speicher-kaskaden" zurückgeführt werden (EULER G. und KOUSSIS A. 1973, PLATE E.J. et al.; 1977, sowie KUNDZEWICZ Z.; 1982).

Da die hydrologischen Berechnungsverfahren auf einschneidenden Vereinfachungen der Grundannahmen beruhen und somit eine Konstanz der empirisch bestimmten - abflußabhängigen - Parameter nicht gegeben ist, erscheint analog zu den angeführten vereinfachten hydraulischen Modellen eine Anwendung für Prognoseberechnungen bei - ev. durch Baumaßnahmen oder durch die Betriebsführung etc. - geänderten Abflußverhältnissen nicht oder nur bedingt möglich (PLATE E.J. et al. 1977).

### 3. Hydraulische Berechnungsmethodik

#### 3.1 Allgemeine Voraussetzungen

Für das mit Hilfe der vorstehend angeführten Gl.1 und Gl.2 definierte hydraulische Wellenablaufmodell gelten nachstehende Voraussetzungen:

An äusseren Kräften wirken in Strömungsrichtung bzw. entgegengesetzt die Komponente der Schwerkraft, die Reibungskräfte an den Gerinnewandungen sowie die Druckkräfte an den zur Systemabgrenzung eingeführten Querschnitten;

Das Strömungsmedium (Wasser) ist inkompressibel;

Die Geschwindigkeit ist über den Querschnitt konstant;

Die Druckverteilung ist hydrostatisch und die Stromfadenkrümmung ist zu vernachlässigen;

Die Wandreibung des instationären Abflusses ist quasi - stationär, d.h. die Fließbeiwerte bzw. die Auswirkungen der Wandrauigkeit sind dieselben wie bei stationärem Abfluß; Die Neigung des Wasserspiegels ist gering, sodaß

$$|\sin \beta| \approx |\tan \beta| = \left| \frac{\partial w}{\partial z} \right| \quad \text{gilt.}$$

Aus den angeführten Voraussetzungen geht im weiteren hervor, daß, wenn erforderlich, Strömungsverluste infolge Querschnittsänderungen (insbesondere bei Verzögerungen) sowie örtliche Verluste infolge von Einbauten (z.B. Pfeilerstau etc.) in der Bewegungs- bzw. Energiegleichung explizit zu berücksichtigen sind.

### 3.2 Lösungsverfahren und Randbedingungen

Die Lösung des Differentialgleichungssystemes Gl.1 und Gl.2 besteht in der Ermittlung der Funktion  $w(x,t)$  und  $v(x,t)$  bzw.  $Q(x,t)$  unter gegebenen Randbedingungen (bzw. Anfangsbedingungen).

Die Funktionen  $w(x,t)$  und  $Q(x,t)$  kann man sich als Bildflächen über einer  $x,t$  Ebene dargestellt denken.

Zur konkreten Ermittlung der Funktionen bedarf es der Festlegung der Rand- bzw. Anfangsbedingungen.

Durch die Anfangswerte muß zur Zeit  $t=t_0$  der Verlauf des Durchflusses und der Spiegelhöhe im interessierenden Intervall  $(x_0, x_n)$ , d.h.  $Q=Q(x,t=t_0)$  und  $w=w(x,t=t_0)$  bekannt sein. Im Allgemeinen handelt es sich um den Momentanverlauf des instationären Zustandes zum Zeitpunkt  $t=t_0$ .

Was die Randbedingungen anbetrifft, soll zunächst auf die Frage des Fließzustandes eingegangen werden.

Störungen pflanzen sich als Primär- und Sekundärwellen - in der  $x,t$  Ebene gesehen - entlang der sog. "Charakteristiken" fort. (u.a. M.B. ABBOTT; 1966)

Mit  $\frac{dx}{dt} = v + c$  (V) bzw.  $\frac{dx}{dt} = v - c$  (R) (5)

$(c = \sqrt{g \frac{A}{B}}$  , Grenzgeschwindigkeit)

sind diese Charakteristiken gegeben.

Man unterscheidet zwischen den "Vorwärtscharakteristiken" (V) für die Primärwellen und den "Rückwärtscharakteristiken" (R) für die Sekundärwellen (siehe Abb.1).

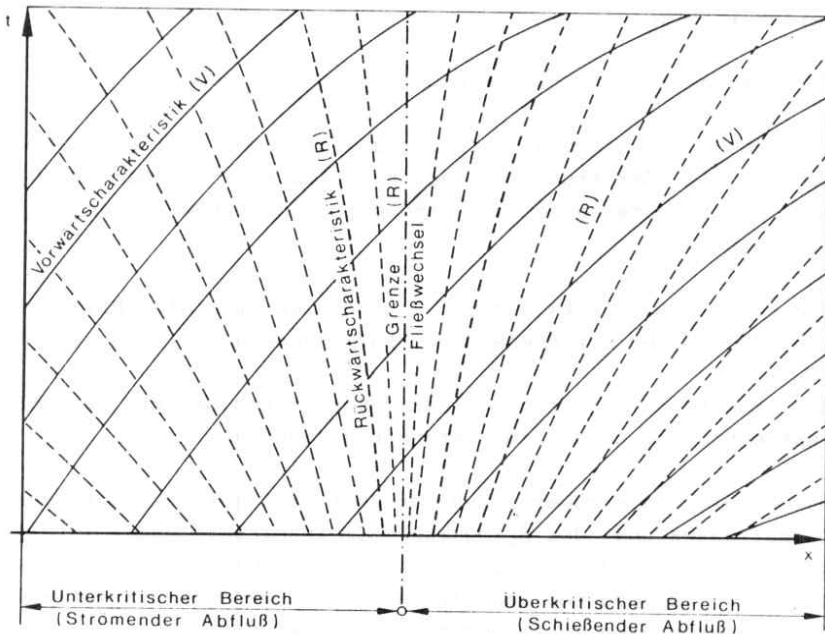


Abb.1: Darstellung der Charakteristiken

Fig.1: Characteristics diagram

Im Falle des überkritischen Fließzustandes (Schießender Abfluß) weisen beide Charakteristiken (V und R) einen Verlauf in Richtung der Strömung auf.



Bei unterkritischem Fließzustand (strömender Abfluß) zeigt die Vorwärtscharakteristik (V) in die Strömungsrichtung, während die Rückwärtscharakteristik (R) einen gegenläufigen Richtungsverlauf nimmt.

Im Grenzfall (Fließwechsel) verläuft die Rückwärtscharakteristik (R) senkrecht zur x-Achse. Daraus erhellt, daß bei Fließwechsel Störungen vom schießenden Fließzustand im Unterwasser nicht auf den strömenden Abfluß im Oberwasser übertragen werden.

Der Verlauf der Charakteristiken ist für die Anzahl der notwendigen Randbedingungen maßgebend.

Man benötigt außer den Anfangswerten, welche genauso als Randbedingung zum Zeitpunkt  $t=t_0$  bezeichnet werden können, bei strömenden Fließzustand je eine zeitabhängige Randbedingung am oberen (linken) und am unteren (rechten) Rand. Bei schießendem Fließzustand benötigt man zwei zeitabhängige Randbedingungen am oberen (linken) Rand.

Findet an einem Rand des Intervalles ständig ein Fließwechsel statt, so ist dort eine zeitunabhängige Randbedingung zu formulieren, da in diesem Fall die Rückwärtscharakteristik (R) parallel zur Zeitachse verläuft.

#### 4. Berechnungsdurchführung

##### 4.1 Transformierte Grundgleichungen und ihre Anwendung bei kompakten und gegliederten Profilen

Zunächst soll noch auf die Möglichkeit einer Erweiterung der Kontinuitätsbedingung Gl.1 hingewiesen werden:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (6)$$

wodurch mit  $q=q(x,t)$  kontinuierliche Zu- bzw. Abflüsse berücksichtigt werden. Die Funktion  $q(x,t)$  (Zufluß pro Längeneinheit bzw. bei negativem Vorzeichen Abfluß von Oberflächen- bzw. Grundwasser) ist als bekannt vorauszusetzen.

Im Gegensatz zu der üblicherweise unmittelbar vorgenommenen Diskretisierung der Gl.1 und Gl.2 wird hier die Diskretisierung im Zuge einer Integration nach t bzw. x vorgenommen, wodurch die Ergebnisse der transformierten Gl.1 und Gl.2 eine anschauliche Interpretation gestatten.

Die Integration der Kontinuitätsbedingung Gl.1 nach x ergibt

$$\int_i^{i+1} \frac{\partial A}{\partial t} dx + Q \Big|_i^{i+1} = \frac{\partial}{\partial t} \int_i^{i+1} A dx + Q_{i+1} - Q_i = 0. \quad (7)$$

Mit  $Adx = dV$  folgt die bekannte Kontinuitätsbedingung für Retentionsvorgänge:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{zu} - Q_{ab} \quad (8)$$

$$\left( Q_i = Q_{zu}, \quad Q_{i+1} = Q_{ab}, \quad \frac{dV}{dt} = \frac{dV_{i+1}}{dt} - \frac{dV_i}{dt} \right).$$

Die Integration von Gl.1 nach t ergibt

$$A \Big|_k^{k+1} + \int_k^{k+1} \frac{\partial Q}{\partial x} dt = A \Big|_k^{k+1} + \frac{\partial}{\partial x} \int_k^{k+1} Q dt = 0. \quad (9)$$

Mit  $\int_k^{k+1} Q dt = F$  und Übergang auf endliche Größen gemäß

$F = \frac{1}{2}(Q_k + Q_{k+1})\Delta t$  - diese Mittelbildung ist zulässig bei linearem Verlauf von Q - erhält man zunächst

$$A \Big|_k^{k+1} + \frac{\partial F}{\partial x} = A \Big|_k^{k+1} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial Q_k}{\partial x} + \frac{\partial Q_{k+1}}{\partial x} \right) \Delta t = 0$$

bzw.  $(A_{k+1} - A_k)\Delta x + \frac{1}{2} (Q_k^{i+1} - Q_k^i + Q_{k+1}^{i+1} - Q_{k+1}^i)\Delta t = 0.$

Mit  $A\Delta x = V$  und  $Q_{m,i+1} = \frac{1}{2} (Q_k^{i+1} + Q_{k+1}^{i+1})$  sowie  $Q_{m,i} = \frac{1}{2} (Q_k^i + Q_{k+1}^i)$  folgt letztlich

$$\Delta V_{k+1,k} = (Q_{m,i} - Q_{m,i+1})\Delta t. \quad (10)$$

Diese Beziehung - sie geht mit  $\Delta t \rightarrow 0$  in Gl.8 über - erlaubt die - im Falle der Seeretention bekannte - anschauliche Darstellung für den Zusammenhang zwischen dem Retentionsvolumen und der Differenz der Durchflußfrachten im Ort i bzw. i+1 im Zeitschritt  $\Delta t$  (Schraffierte Fläche in Abb. 2).

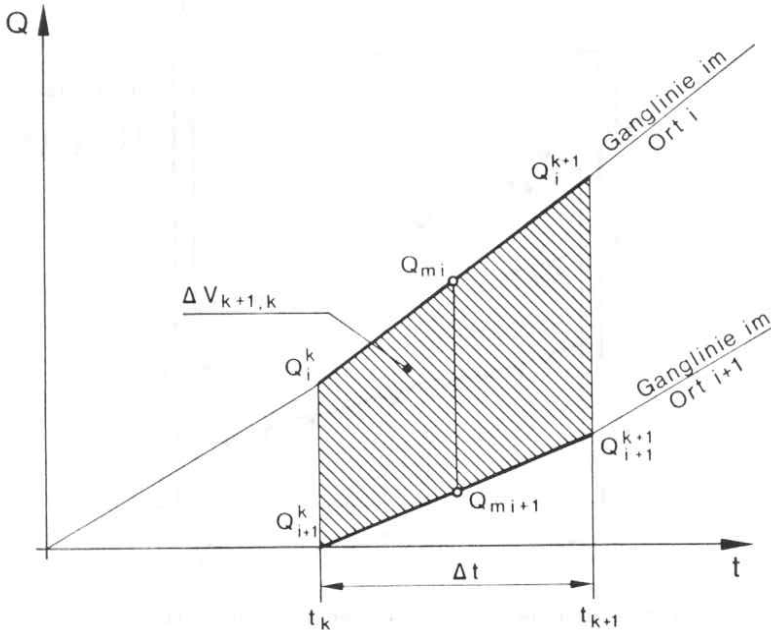


Abb.2: Zusammenhang zwischen Durchflußfracht und Retentionsvolumen

Fig.2: Discharge-retention volume relationship

Nach geringer Umformung von Gl.(2) ergibt die Integration in Strömungsrichtung:

$$\frac{1}{g} \int_i^{i+1} \frac{\partial v}{\partial t} dx + \frac{v^2}{2g} \Big|_i^{i+1} + w \Big|_i^{i+1} + \int_i^{i+1} J_E dx = 0 \quad \text{bzw. mit} \quad v = \frac{Q}{A}$$

$$\frac{1}{g} \int_i^{i+1} \frac{\partial v}{\partial t} dx + \frac{Q^2}{2gA^2} \Big|_i^{i+1} + w \Big|_i^{i+1} + \int_i^{i+1} J_E dx = 0. \quad (11)$$

Mit einer analog wie in Gl.10 vorgenommenen Mittelbildung unter der Annahme eines im Intervall  $\Delta x$  linearen Funktionsverlaufes folgt

$$\frac{Q_i^2}{2gA_i^2} + w_i = \frac{Q_{i+1}^2}{2gA_{i+1}^2} + w_{i+1} + \frac{1}{2g} \left( \frac{\Delta v_i}{\Delta t} + \frac{\Delta v_{i+1}}{\Delta t} \right)_{k+1,k} \Delta x + \frac{1}{2} (J_{E_i} + J_{E_{i+1}}) \Delta x, \quad (12)$$

wofür ebenfalls eine anschauliche Darstellung möglich ist (siehe Abb.3).

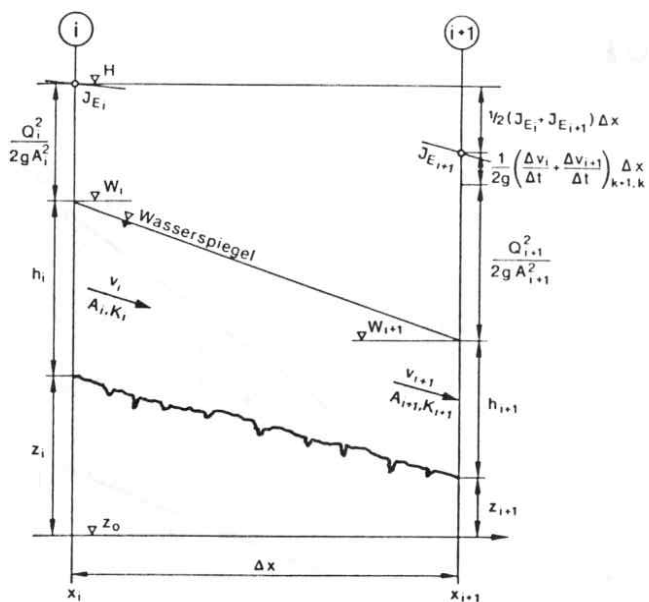


Abb.3: Darstellung der integrierten Bewegungsgleichung

Fig.3: Integrated equation of motion

Gl.10 und Gl.12 sind Resultat einer auf Grund von speziellen Transformationen vorgenommenen Diskretisierung der Gl.1 und Gl.2.

Etwaige Auswirkungen vom im Diskretisierungsintervall linearen Verlauf der der Mittelbildung unterworfenen Funktionen ergeben naturgemäß Abweichungen von der mit dem Gewicht 1/2 vorgenommenen Mittelbildung.

Es ist daher das für die Mittelbildung anzuwendende Gewicht als "Formbeiwert" anzusprechen (KUNDZEWICZ, 1982).

Gemäß der angewendeten "eindimensionalen" hydraulischen Berechnungsmethodik mit Hilfe der Saint Venant'schen Gleichungen ist der über dem Querschnitt unterschiedlichen Geschwindigkeitsverteilung durch die Anwendung des Geschwindigkeitshöhenausgleichsbeiwertes

$$\alpha = \frac{\int_A v^3 dA}{v_m^3 A} = \frac{\int_A v^3 dA}{v_m^2 Q} \quad (13)$$

und des Impulsausgleichsbeiwertes

$$\alpha' = \frac{\int_A v^2 dA}{v_m^2 A} = \frac{\int_A v^2 dA}{v_m Q} \quad (14)$$

Rechnung zu tragen.

Diese Vorgangsweise entspricht dem Umstand, daß es sich bei instationären Wellenablaufvorgängen und den damit verbundenen Retentionen um Energietransportvorgänge verbunden mit Energiespeicherungen handelt.

Im Falle von sog. "kompakten" Profilen mit nicht allzu sehr vom örtlichen Mittelwert abweichenden Geschwindigkeiten kann  $\alpha$  bzw.  $\alpha'$  gleich 1 gesetzt werden.

Bei sog. "gegliederten" Profilen, Abflußprofilen mit Hochwasservorländern, wo deutliche Unterschiede in den Abflußgeschwindigkeiten des "Stromschlauches" und der "Vorländer" auftreten, kann man entweder gesonderte Ablaufberechnungen für Stromschlauch und Vorland mit entsprechenden Verknüpfungsbedingungen vornehmen oder es muß der Versuch einer für Stromschlauch und Vorländer vereinheitlichten Wellenablaufberechnung unternommen werden.

Da das diesbezügliche Verfahren einer gesonderten Veröffentlichung vorbehalten ist, soll hier nur die Vorgangsweise der mathematischen Behandlung beschrieben werden.

Zunächst erscheint es zweckmäßig, den Durchflußanteil des Vorlandes in Form eines fiktiven Flächenanteiles, welcher dem Vorlandabfluß mit der Abflußgeschwindigkeit des Stromschlauches entspricht, dem Durchfluß des Stromschlauches zuzuschlagen.

Dadurch liegt entsprechend dem vorliegenden Abflußmodell ein Gesamtabfluß mit der Abflußgeschwindigkeit des Stromschlauches, jedoch mit einer fiktiven Querschnittsfläche  $\bar{A}$  vor

(z.B. SCHMUTTERER J.; 1950). Durch entsprechende Rauheitswerte und Annahmen betreffend die hydraulischen Radien in Vorland - und Stromschlauch werden natürlich auch Interaktionswirkungen berücksichtigt.

Naturgemäß gibt es auch anderweitige Möglichkeiten der Transformation der Abfluvvorgänge bei gegliederten Profilen auf die Berechnungsgrundsätze einer eindimensionalen Behandlung.

Jede dieser Vorgangsweisen bedingt im besonderen eine Berücksichtigung des Geschwindigkeitshöhenausgleichsbeiwertes (Gl.13) sowie des Impulsausgleichsbeiwertes (Gl.14).

#### 4.2. Zur Formulierung der Randbedingungen

Als Randbedingungen eignen sich zeitabhängige Wasserstands- bzw. Abfluvbeziehungen ( $w=w[x_R, t]$  bzw.  $Q=Q[x_R, t]$ ), die auch als Regelungsfunktionen vorgeschrieben werden können.

Bei unterkritischem (strömenden) Fließzustand ist, wie schon angeführt, je eine Bedingung am oberen und am unteren Rand anzugeben.

Im Falle des Fließwechsels ist eine zeitunabhängige Bedingung anzuwenden (Überfall- bzw. Ausfluvbedingung).

Die Vorgabe konstanter Spiegelhöhe am unteren Rand bedeutet entweder, daß der Fluß in einen großen Wasserspeicher mündet, dessen Wasserspiegelhöhe keinen großen Änderungen unterworfen ist, oder, daß für den Wasserspeicher eine vom Unterwasser unabhängige Abfluvregelung für  $w(x_n)=const$  vorgenommen wird.

Für den Fall, daß bei strömenden Fließzustand an einem Rand kein Fließwechsel auftritt und daß keine zeitabhängige Randbedingung formuliert werden kann, ist der Berechnungsbereich entsprechend weit über den eigentlichen, zu untersuchenden Bereich hinausgehend zu erstrecken und dort eine Randvorschreibung vorzunehmen. Dies gilt im speziellen für den relativ häufig vorkommenden Fall, daß am oberen Rand eine Wasserstandsganglinie vorliegt und am unteren Rand bei

strömenden Fließzustand z.B. eine Wasserstands-Durchflußbeziehung in Form eines stationären Pegelschlüssels verwendet wird. Dies ist natürlich nur eine Näherungsannahme.

Gebiets- bzw. Bereichsverknüpfungen sind unter Beachtung der Verknüpfungsbedingungen an den Rändern vorzunehmen.

Im Falle des Vorliegens von Zubringern ist der Berechnungsbereich entsprechend den Örtlichkeiten der Zubringermündungen zu unterteilen. Für die nun vorliegenden Schnittstellen - möglichst nahe der Zubringermündung - sind entsprechende Randbedingungen gemäß den durch den Zubringer veränderten Abflußverhältnissen zu berücksichtigen. Der oberhalb liegende Bereich ist in der Berechnung mit einer entsprechenden Verknüpfungsbedingung (z.B. Wasserstände) anzuschließen.

#### 4.3. Numerische Lösungsmethodik

Die Lösung des durch die Diskretisierung entstandenen nicht-linearen Gleichungssystems (Gl.10 und Gl.12) wird zweckmäßig mit Hilfe eines geeigneten Iterationsverfahrens vorgenommen.

Da die Lösungsdurchführung das Vorhandensein reeller Charakteristiken zu berücksichtigen hat, sind die Zeitschritte nach Wahl der örtlichen Schrittweite gemäß der Courant-Bedingung festzuliegen. (RICHTMYER, R.D. und MORTON K.W.; 1967 und u.a. W. BAUCH; 1969).

Zur Beschleunigung des Iterationsvorganges erscheint es unter Umständen zweckmäßig, für Randbedingungen, die mit Hilfe von Terminwerten formuliert sind, durch die Anwendung des Spline-Interpolationsverfahrens (z.B. BÖHMER, K.; 1974) einen stetigen Funktionsverlauf auch der Ableitungen sicherzustellen.

Für die konkrete Anwendung des beschriebenen hydraulischen Wellenablaufmodelles wurden Programme entwickelt, mit welchen die Berechnungen auf einer Tisch-Computer-Anlage (z.B. ATARI 1040 ST mit 1 MB Arbeitsspeicher und einer 20 MB Fest-

platte) durchgeführt werden können.

Vergleichsberechnungen von Wellenabläufen für eine 19 km lange Gerinnestrecke, welche an der Großrechenanlage der Österreichischen Donaukraftwerke AG. mit Hilfe des hydraulischen Rechenmodelles nach A. URBAN; 1973 durchgeführt wurden, zeitigten in den Ergebnissen geringfügige Abweichungen, die lediglich auf die unterschiedliche Diskretisierung sowie Mittelbildung beider Modelle zurückzuführen sind.

#### 5. Hinweise für die Anwendung bei praktischen Problemstellungen

Außer den erforderlichen geodätischen Unterlagen mit allen berechnungsspezifischen Angaben über Bewuchs, Bewirtschaftung, Verbauung etc., die sich möglichst über den eigentlichen Untersuchungsbereich hinaus erstrecken sollen, sind insbesondere ausreichende hydrologische Angaben, wie Wasserstands- bzw. Durchflußganglinien, Regelungsbedingungen bei Wasserkraft- oder sonstigen hydrotechnischen Anlagen, Angaben über Geschiebeführung sowie, wo erforderlich, Angaben über die Zusammenhänge zwischen dem Oberflächenwasserabfluß und dem Grundwasserregime notwendig.

Auf Grund dieser Angaben erscheinen zunächst stationäre Wasserspiegellagenberechnungen im Bereich der in Frage kommenden Wasserstände bzw. Durchflüsse von Vorteil. Was die Berechnungsmethodik anbetrifft, wird auf die Ausführungen von R. SCHRÖDER; 1972 und G. SEUS und O. USLU; 1974 sowie - bei der Berechnung von Absenkungskurven in Nähe der Grenztiefe - auf die Anmerkung von H. PIRCHER und W. HAAS; 1984 verwiesen.

Im Falle mehrteiliger Profile sind entsprechende Berechnungen betreffend den Gerinne- und den Vorlandabfluß vorzunehmen. Im Falle einheitlicher Berechnung von Gerinne- und Vorlandabfluß sind die Interaktionswirkungen zu berücksichtigen.



Im Zuge dieser Wasserspiegellagenberechnungen ist zunächst aus stationären Wasserstands-Abflußbeziehungen in den Kontrollpegeln eine Anpassung der Rauigkeitswerte in den Profilen vorzunehmen, um so schrittweise die Grundlagen der Eichung für die durchzuführenden Wellenablaufberechnungen zu erlangen.

Im weiteren sind im Zuge des Eichungsvorganges naturgemäß auch die Örtlichkeiten von Abschnittsgrenzen mit Formulierung der Randbedingungen sowie eventuelle Modellbereichsverknüpfungen festzulegen.

Im Falle von Prognoseberechnungen ist den geänderten Abflußverhältnissen infolge von baulichen Veränderungen oder sonstiger Maßnahmen durch Berücksichtigung der geänderten Belange betreffend die Abflußgeometrie und die Rauigkeitsbeiwerte etc. Rechnung zu tragen. Insbesondere ist auf einen genügend weit über den veränderten Abflußbereich sich hinaus erstreckenden Untersuchungsbereich zu achten.

Unter Umständen ist es auch von Nutzen, das hydraulische Wellenablaufmodell bei Retentionsuntersuchungen von Speicher- bzw. Hochwasserrückhaltebecken mit größerer Längserstreckung anzuwenden.

## **6. Zusammenfassung und Ausblick**

Es wurde versucht, in einer Gesamtschau die Grundlagen, die Berechnungsmethodik und die Probleme der Berechnungsdurchführung vor allem für die Anwendung des hydraulischen Wellenablaufmodelles nach de SAINT VENANT darzustellen.

Die vorgenommene Transformation der Grundgleichungen zeitigt nicht nur Auswirkungen im Rahmen der Diskretisierung, sondern es wird im weiteren auch eine anschauliche Darstellung der den instationären Abflußvorgängen zu Grunde liegenden Beziehungen in Hinblick auf den Energietransport und die Energiespeicherungsvorgänge möglich.

Im weiteren erscheint, wie aus den vorliegenden Ausführungen hervorgeht, nunmehr der Einsatz eines hydraulischen Wellenablaufmodelles, welchem die de SAINT VENANT'schen Gleichungen zu grunde liegen, auf Grund der Möglichkeit, daß die notwendigen Berechnungen mit Hilfe einer Tisch-Computer-Anlage vorgenommen werden können, im vermehrten Ausmaße gegeben.

## 7. Verwendete Abkürzungen und Symbole

$A$	Durchströmte Querschnittsfläche
$\bar{A}$	Durchströmte Ersatzquerschnittsfläche
$B$	Wasserspiegelbreite
$c$	Ausbreitungsgeschwindigkeit kleiner Störungen
$C$	Reibungsbeiwert nach de Chezy
$F$	Durchflußfracht
$g$	Konstante der Fallbeschleunigung
$h$	Abflußhöhe
$H$	Niveauhöhe der mechanischen Energie pro Gewichtseinheit
$J_E$	Gefälle der mechanischen Energie pro Gewichtseinheit
$i$	Index für den Ort
$K$	Spezifischer Durchfluß, Conveyance
$k$	Index für die Zeit
$q$	Zufluß pro Längeneinheit
$Q$	Durchfluß
$Q_{zu}$	Zufluß
$Q_{ab}$	Abfluß
$t$	Zeit
$V$	Speichervolumen
$v$	Strömungsgeschwindigkeit
$v_m$	Örtlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeiten
$w$	Wasserspiegelhöhe
$x$	Ort
$z$	Ortshöhe
$\alpha$	Geschwindigkeitshöhenausgleichsbeiwert (Coriolis-Beiwert)
$\alpha'$	Impulsausgleichsbeiwert (Boussinesq-Beiwert)
$\beta$	Neigungswinkel des Wasserspiegels zur Horizontalen

## 8. Literaturverzeichnis

- ABBOTT, M.B.: An Introduction to the Method of Characteristics, New York, 1966.
- BAUCH, W.: Die Hochwasserwelle im ungestauten und gestauten Fluß. Bericht Nr.16 der Versuchsanstalt für Wasserbau der Technischen Hochschule München - Oskar v. Miller-Institut; 1969.
- BÖHMER, K.: Spline-Funktionen; Stuttgart, Teubner Verlag 1974.
- CHOW, V.T.: Open-Channel Hydraulics; Mc. Graw-Hill, Book Company, 1959.
- CUNGE, J.A.: On the Subject of a Flood Propagation. Computation Method (Muskingum Method); Journal of Hydr. Research, Vol.7; 1969, No.2.
- EULER, G. u. KOUSSIS, A.: Berechnung von Hochwasserabläufen mit Näherungsverfahren und ihre Anwendung; Die Wasserwirtschaft Nr.63 (1973), 8, S.235-S.240.
- GUTKNECHT, D.: Wellenablauf in Flüssen; Buchprojekt "Ingenieurhydrologie"; derzeit unveröffentlicht.
- KUNDZEWICZ, Z.: Parameteruntersuchungen zur Berechnung des Hochwasserablaufs in Gerinnen; Mitteilungen des Institutes für Wasserbau III, Heft 23, Karlsruhe 1982.
- NASH, J.E.: A Unit Graph Study with Particular Reference to British Catchments  
Proc. Inst. Civil Eng. 17, (1960), S.249-282.

- NAUDASCHER, E.: Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke; Springer Verlag Wien - New York; 1987, S.316.
- PIRCHER, H. u. HAAS, W.: Die Anwendung computerorientierter Berechnungsmethoden im konstruktiven Wasserbau. Helmut Simmler Gedenkschrift, Institut für Wasserwirtschaft und konstruktiven Wasserbau; TU Graz 1984; S.211-233.
- PLATE, E.J. et al.: Ablauf von Hochwasserwellen in Gerinnen; Schriftenreihe des Kuratoriums für Wasser und Kulturbauwesen; Heft 27 (1977) Teil 1, S.1-S.114.
- RICHTMYER, R.D. und MORTON, K.W.: Difference Methods for Initial Value Problems; Interscience, 1967.
- ROSEMANN, H.J.; VEDRAL, J.: Das Kalinin-Miljukov-Verfahren zur Berechnung des Ablaufs von Hochwasserwellen; Schriftenreihe der Bayrischen Landesstelle für Gewässerkunde; München; Heft 6, 1970.
- ROSEMANN, H.J.: Das Muskingum - und Kalinin-Miljukov-Verfahren zur Berechnung des Ablaufs von Hochwasserwellen; III.Fortbildungslehrgang für Hydrologie, DVWW; Braunschweig 1971.
- de SAINT VENANT, B.: Theorie du mouvement non permanent des eaux (aus Sekundärliteratur) Paris, 1871.
- SEUS, G. u. USLU, O.: Berechnung der Wasserspiegellagen bei stationär-ungleichförmigem Abfluß in natürlichen Gerinnen und die Optimierung der Ermittlung der Fließbeiwerte; Elektronische Berechnung von Rohr- und Gerinneströmungen; Erich Schmidt Verlag 1974.

- SCHMUTTERER, J.: Berechnung von Rückstau- und Absenkungslinien in Doppel- und Mehrfachprofilen. Österr. Wasserwirtschaft Jg.2; H.6 (1950); S.109, 110.
- SCHRÖDER, R.: Strömungsberechnungen im Bauwesen Teil II: Instationäre Strömungen; Bauingenieur Praxis; W. Ernst u. Sohn 1972.
- URBAN, A.: Erstellung eines mathematischen Abflußmodells an der österreichischen Donau; 7. Konferenz der Donauländer für hydrologische Vorhersagen in Varna; Mai/Juni 1973.

**Anschrift des Autors:**

A.o.Univ.Professor  
Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinrich Breiner  
Abteilungsleiter für Hydraulik  
am Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und  
Wasserwirtschaft an der Technischen Universität  
Wien.  
1040 Wien, Karlsplatz 13.