

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 80 (1962)  
**Heft:** 22

**Artikel:** Die Berechnung der Flutwellen bei Bruch von Talsperren  
**Autor:** Wackernagel, Andreas  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-66164>

### **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:** 22.02.2026

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

- en vertu des nouvelles normes fédérales, comme si l'ancienne concession n'existait plus,
- 2) calculer la redevance de l'ancien aménagement selon les nouvelles normes fédérales,
  - 3) faire la différence entre les deux montants ainsi obtenus; enfin
  - 4) ajouter à la différence ainsi trouvée le montant résultant de l'ancienne concession.

#### 4. Calcul des redevances lorsque l'usine a été en service pendant une partie de l'année seulement

Comment faut-il procéder lorsqu'il s'agit de déterminer la redevance maximum quand celle-ci n'est due que pour une partie de l'année seulement? C'est le cas notamment pour toute nouvelle usine, puisqu'il est bien rare que celle-ci commence son exploitation le premier janvier.

Il faut alors commencer par établir la courbe de durée de l'aménagement en question pour toute l'année considérée, comme si l'usine avait été mise en service le 1<sup>er</sup> janvier de

celle-ci. Cette courbe donne les débits caractéristiques: Q 3 mois, Q 8 mois,  $\frac{3}{4}$  Q. On établit ensuite la courbe de durée pour la seule période astreinte à redevance, et ce sont alors les valeurs trouvées précédemment pour Q 3 mois, Q 8 mois et  $\frac{3}{4}$  Q qui déterminent les zones de cette deuxième courbe auxquelles s'appliquent les taux de 10, 8 et éventuellement 6 fr. par cheval théorique.

A noter que si les arrêts dans la marche de l'usine ne devaient pas être dus à celle-ci, mais à des raisons afférentes au cours d'eau utilisé, par exemple à un manque complet de débits utilisables pendant une partie de l'année, le mode de faire ci-dessus ne serait guère applicable sans autre. Il faudrait alors rechercher plutôt une solution s'inspirant des principes sur lesquels a été fondée la nouvelle réglementation.

Adresse de l'auteur: Ing. F. Chavaz, sous-directeur du Service fédéral des eaux, Bollwerk 27, Berne.

## Die Berechnung der Flutwellen bei Bruch von Talsperren

DK 627.891

Von Andreas Wackernagel, dipl. Ing. ETH, im Ingenieurbureau Gebrüder Gruner, Basel

### 1. Einleitung

Die wachsende Zahl grosser Speicherbecken, die oberhalb bewohnter Gebiete angelegt sind, erfordert einerseits eine hohe Sicherheit und andererseits die ständige Ueberwachung der Talsperren im Betrieb. Es ist daher zur Selbstverständlichkeit geworden, dass in grössere Talsperren ausgedehnte Messanlagen eingebaut werden, um in jedem Betriebszustand des Bauwerkes das Kräftespiel und die Verformungen zu überprüfen. Beim Ergreifen dieser Massnahmen, welche unzulässige Bewegungen und Spannungen des Bauwerkes rechtzeitig erkennen lassen, und unter der Voraussetzung, dass die übliche Sorgfalt bei der Bauausführung eingehalten werde, sind Staumauerbrüche in Friedenszeiten so gut wie ausgeschlossen. Immerhin kann es angezeigt sein, sich Rechenschaft über die Auswirkungen eines Talsperrenbruches zu geben. Ein derartiges Ereignis rückt in Kriegszeiten in den Bereich der Möglichkeit.

Zeit und andererseits die Bestimmung des raumzeitlichen Verlaufes der Flutwelle im Flusstal unterhalb der Sperre.

Die Berechnung des Ausflusses aus einem Stausee bei plötzlichem Bruch einer Talsperre kann nach der Methode von Frank ausgeführt werden. Dabei ist eine gewisse Idealisierung der Form des Staubeckens erforderlich [1]. Der Verlauf der Flutwelle kann nach der Methode De Marchi berechnet werden, die nach verschiedenen Vereinfachungen aus den allgemeinen Gleichungen hervorgeht [2].

Nicht permanente Abflüsse des Wassers in einem schwach geneigten, fast geradlinigen Kanal mit freiem Wasserspiegel werden durch folgende Differentialgleichungen beschrieben

$$(1) \quad \frac{\partial}{\partial x} \left( h + \frac{v^2}{2g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v^2}{k^2 \cdot R^{4/3}} = J_s$$

$$(2) \quad \frac{\partial F \cdot v}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial t} = 0$$

Darin bedeuten:

- $h$  die Wassertiefe
- $F$  die Querschnittsfläche
- $v$  die Wassergeschwindigkeit
- $k$  den Reibungskoeffizienten nach Strickler
- $R$  den Hydraulischen Radius
- $J_s$  das Sohlengefälle

Es sind die Gleichungen von de Saint-Venant, wobei (1) die dynamische Gleichung und (2) die Kontinuitätsgleichung darstellt. Diese Gleichungen führen zu ziemlich verwickelten Rechnungen. De Marchi hat daher die Gleichungen so vereinfacht, dass für den praktischen Gebrauch ein einfaches Berechnungsschema entsteht. Ein Flusstal wird als fast geradliniger Kanal mit gleichmässigem Gefälle aufgefasst, also ohne starke Gefällsbrüche, Einengungen und Ausweitungen. In der dynamischen Gleichung werden die beiden ersten Glieder vernachlässigt, während in der Kontinuitätsgleichung ein Rückstaufaktor  $C$  eingeführt wird, der der natürlichen Form eines Flusstales Rechnung trägt und der von De Marchi experimentell zu  $C = 1,4$  bestimmt wurde. Damit sehen die beiden Gleichungen wie folgt aus:

$$(3) \quad \frac{v^2}{k^2 R^{4/3}} = J_s$$

$$(4) \quad \frac{\partial F \cdot v}{\partial x} + C \frac{\partial F}{\partial t} = 0$$

Diese Gleichungen werden numerisch mit endlichen Differenzen integriert. Das Flusstal wird durch Querprofile in

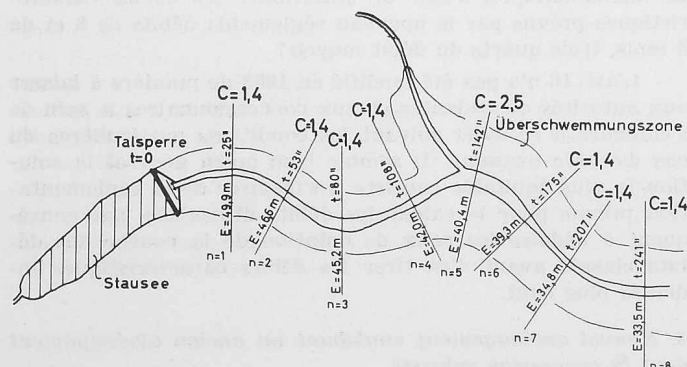


Bild 1. Ueberschwemmungsplan infolge Bruch einer Talsperre

Bei totalem Bruch grosser Talsperren können Abflussmengen bis zu mehreren 100 000 m<sup>3</sup>/s an der Sperrstelle entstehen, welche dann im Unterlauf auf einen Bruchteil dieser Grösse gedämpft werden. Eine Kenntnis der Gefahrenzone infolge der entstehenden Flutwelle ermöglicht es, Vorratslager, Schutzräume und Verbindungswege so anzulegen, dass sie bei Zerstörung einer Talsperre nicht gefährdet werden. Diesbezügliche Studien sind in letzter Zeit in der Schweiz (Bild 1) auf Veranlassung und in Zusammenarbeit mit dem Eidg. Amt für Wasserwirtschaft durchgeführt worden.

### 2. Berechnung der Flutwelle

Zur Berechnung der Flutwelle gehört einerseits die Bestimmung des Ausflusses aus dem Stausee in Funktion der

ungefähr gleich lange Abschnitte eingeteilt. Der Abfluss aus einem Talabschnitt in Funktion der Wassertiefe ist durch Gleichung (3) gegeben. Mit Hilfe der Gleichung (4) wird dann aus dem gegebenen Zufluss der Abfluss in Funktion der Zeit berechnet. Der Abfluss aus einem Talabschnitt ist gleichzeitig der Zufluss zum nächstfolgenden Abschnitt. In dieser Weise wird von oben nach unten für jedes Querprofil der Abfluss in Funktion der Zeit bestimmt. Die Differenzengleichungen sehen wie folgt aus:

$$(5) \quad Q_{n+1} = F_{n+1} \cdot k \cdot R^{2/3} \cdot J_s^{1/2}$$

$$(6) \quad \frac{1}{\Delta x} \left( \frac{Q_{n+1}^t + Q_{n+1}^{t+\Delta t}}{2} - \frac{Q_n^t + Q_n^{t+\Delta t}}{2} \right) + C \frac{1}{\Delta t} (F_{n+1}^{t+\Delta t} - F_{n+1}^t) = 0$$

Die Gleichung (5) ist der Abfluss in Funktion der Wassertiefe am unteren Ende des Talabschnittes und Gleichung (6) die Kontinuitätsgleichung für den Talabschnitt.

Diese Gleichungen können wie folgt umgeformt werden:

$$(7) \quad Q_{n+1} + 2C \frac{\Delta x \cdot F_{n+1}}{\Delta t} = F_{n+1} \left( k \cdot R^{2/3} \cdot J_s^{1/2} + 2C \frac{\Delta x}{\Delta t} \right)$$

$$(8) \quad Q_{n+1}^{t+\Delta t} + 2C \frac{\Delta x \cdot F_{n+1}^{t+\Delta t}}{\Delta t} = Q_n^t + Q_n^{t+\Delta t} - Q_{n+1}^t + 2C \frac{\Delta x \cdot F_{n+1}^t}{\Delta t}$$

Auf der linken Seite beider Gleichungen steht der gleiche Ausdruck, der eine Funktion der Wassertiefe ist und der mit  $A_{n+1}$  bezeichnet werden soll. — Es gilt dann:

$$(9) \quad Q_n^t + Q_n^{t+\Delta t} - Q_{n+1}^t + 2C \frac{\Delta x \cdot F_{n+1}^t}{\Delta t} = A_{n+1}^{t+\Delta t}$$

In dieser Gleichung sind alle Glieder auf der linken Seite bekannt. Die Grösse  $A_{n+1}^{t+\Delta t}$ , die eine Funktion von  $h_{n+1}$  ist, lässt sich damit berechnen. Aus  $A_{n+1}$  muss dann noch das zugehörige  $h_{n+1}$  und  $Q_{n+1}$  bestimmt werden. Dies geschieht praktisch, indem für jedes Querprofil ein Diagramm oder eine Tabelle erstellt wird, in denen die Querschnittsfläche  $F$ , die Wassermenge  $Q$  und der Ausdruck  $A$  in Funktion der Wassertiefe  $h$  aufgetragen werden. Ist dann eine der Grössen bekannt, so können alle anderen leicht abgelesen werden.

Betreffend die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle wird angenommen, dass die Wellenstirn mit der Maximalgeschwindigkeit des Wellenscheitels vor diesem hergeschoben wird. Auf diese Annahme soll weiter unten zurückgekommen werden.

### 3. Eigenschaften der Wellen

Das raumzeitliche Diagramm einer Flutwellenberechnung ist in Bild 2 dargestellt. Dort ist der Verlauf der Wassermenge in Funktion der Zeit für jedes Profil aufgetragen. Dabei nimmt die grösste Wassermenge von einem Profil zum folgenden ab. Jede Kurve stellt gleichzeitig den Abfluss aus einem Talabschnitt und den Zufluss zum nächst-

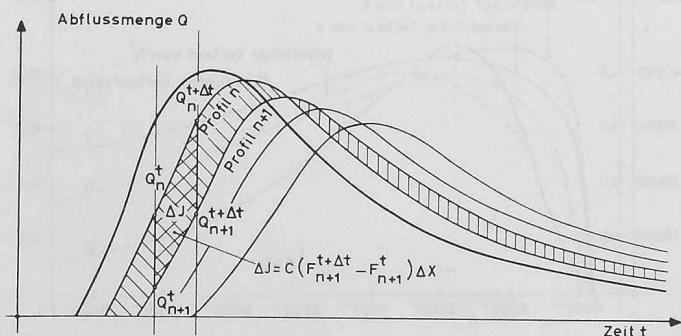


Bild 2. Raumzeitliches Diagramm der Welle

folgenden dar. Der Flächeninhalt der Kurve ist gleich dem Volumen des ausfliessenden Stausees. Die zwischen den Kurven eingeschlossene Fläche bedeutet dabei jederzeit das im betreffenden Talabschnitt rückgestaute Wasservolumen. Vor Erreichen der grössten Wassermenge am unteren Ende des Talabschnittes ist der Zufluss grösser als der Abfluss, und das rückgestaute Wasservolumen nimmt zu. Nach dem Ueberreiten der grössten Wassermenge am unteren Ende ist der Abfluss grösser als der Zufluss und das rückgestaute Wasservolumen nimmt wieder ab. Im Zeitpunkt des grössten Abflusses ist auch die rückgestaute Wassermenge am grössten und gleich  $C F_{max} \Delta x$ . Es ergibt sich daher als charakteristisches Bild derartiger Diagramme, dass der Scheitelpunkt jeder Kurve auf dem absteigenden Ast der vorhergehenden Kurve liegt und dass sich die Kurven in diesem Punkte schneiden. Denn in diesem Zeitpunkt beginnt das rückgestaute Wasservolumen abzunehmen.

Aus diesem Sachverhalt können wichtige Folgerungen für den Grad der Dämpfung der Flutwelle gezogen werden. Als Dämpfung wird die relative Abnahme der maximalen Wassermengen von einem Profil zum folgenden bezeichnet. Je grösser das Verhältnis der zwischen den Kurven eingeschlossenen Fläche zur gesamten Inhaltsfläche der Kurven ist, d. h. je grösser das Verhältnis des in einem Talabschnitt rückgestauten Wasservolumens zum Gesamtvolumen des ausfliessenden Stausees ist, desto stärker ist die Dämpfung der Flutwelle. Die Dämpfung wird also mit zunehmendem Volumen des ausfliessenden Staubeckens schwächer.

Das rückgestaute Wasservolumen ist von der Grösse des Rückstaufaktors  $C$  abhängig. Dieser wird bei nahezu prismatischer Talform gemäss experimentellen Ermittlungen zu  $C = 1,4$  angenommen. Bei starken Einengungen oder bei Rückstau in Seitentälern muss er aber im Verhältnis der Querschnittsfläche am unteren Ende des Talabschnittes zur Querschnittsfläche des Rückstaubeckens vergrössert werden. Die Dämpfung wird also mit zunehmendem Faktor  $C$  verstärkt.

Der Grad der Dämpfung wird ferner von der Fließgeschwindigkeit des Wassers beeinflusst. Bei wachsender Fließgeschwindigkeit vermindert sich die Querschnittsfläche und somit der Rückstau. Die Dämpfung wird daher bei grossen Geschwindigkeiten schwächer sein als bei kleinen Geschwindigkeiten.

### 4. Abschätzung des Anwendungsbereiches der Methode De Marchi

Die Gleichung (3) gibt die Geschwindigkeit am unteren Ende eines Talabschnittes in Funktion der Wassertiefe. Die anderen Glieder der dynamischen Gleichung, in denen Aenderung der Energielinienhöhe und die Trägheitskräfte berücksichtigt sind, werden vernachlässigt. Es möge im folgenden geprüft werden, unter welchen Bedingungen diese in der Methode De Marchi angenommenen Vereinfachungen zulässig sind.

Die Funktion der Wassergeschwindigkeit ohne Vereinfachung kann auch wie folgt angeschrieben werden

$$(10) \quad v^2 = k^2 \cdot R^{4/3} \left[ \underbrace{J_s}_{\text{I}} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( h + \frac{v^2}{2g} \right)}_{\text{II}} - \underbrace{\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}}_{\text{III}} \right]$$

Es muss nun festgestellt werden, ob in gewissen Fällen die Glieder II und III gegen Glied I vernachlässigbar sind. Die Untersuchung bezieht sich auf den Bereich der Wellenstirn. Zu diesem Zweck wird als Abschätzung eine sinusförmige Verteilung der Wassertiefe und der Geschwindigkeit auf der Stirnseite der Flutwelle angenommen. Dabei wird der Einfachheit halber im Wellenscheitel die Wassergeschwindigkeit gleich der Wellengeschwindigkeit gesetzt. Die Funktionen für Wassertiefe  $h$  und Geschwindigkeit  $v$  lauten dann wie folgt (Bild 3):

$$(11) \quad h = H \sin \frac{\pi}{l} (x - Vt)$$

$$(12) \quad v = V \sin \frac{\pi}{l} (x - Vt)$$



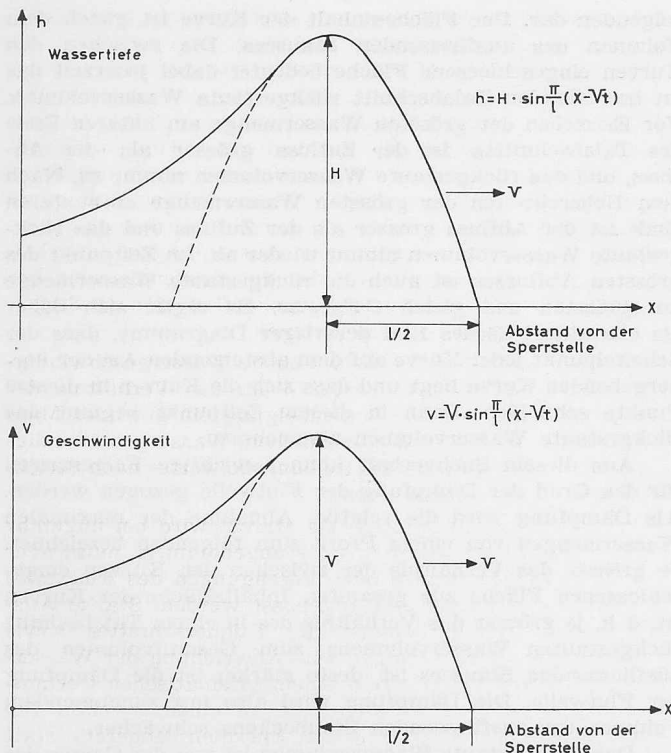


Bild 3. Annahme einer sinusförmigen Verteilung der Wassertiefen und Geschwindigkeiten in der Wellenstirn

wobei  $H$  die Wassertiefe im Wellenscheitel  
 $V$  die Wassergeschwindigkeit im Wellenscheitel  
 $l$  die Länge der Flutwelle bezeichnen

Es ergeben sich dann in der Mitte der Wellenstirn für  $(x - Vt) = \frac{3}{4} l$  folgende Werte:

$$(13) \quad \frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{H \cdot \pi}{l} \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$(14) \quad \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v^2}{2g} \right) = -\frac{v^2 \pi}{gl}$$

$$(15) \quad \frac{\partial v}{\partial t} = +\frac{v^2 \pi}{l} \frac{1}{\sqrt{2}}$$

und man erhält folgenden Ausdruck für die Geschwindigkeit in der Mitte der Wellenstirn:

$$(16) \quad v = k \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \sqrt{1 + \left[ H + \frac{V^2 (l^2 - 1)}{g} \right] \frac{\pi}{\sqrt{2} \cdot l \cdot J_s}}$$

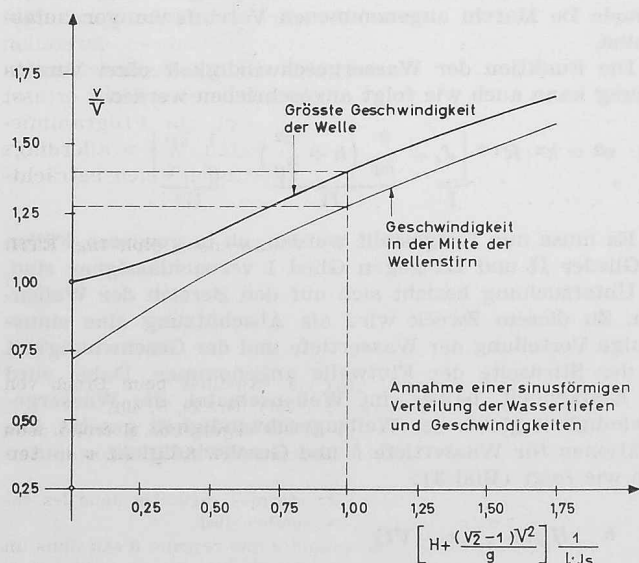


Bild 4. Vergleich der wirklichen Geschwindigkeit mit der grössten gerechneten Geschwindigkeit  $V$  gemäss Normalabfluss

Dies bedeutet, dass die Fliessgeschwindigkeit des Wassers an der Wellenstirn grösser wird. Die Vergrösserung der Geschwindigkeit in der Wellenstirn und im Wellenscheitel im Verhältnis zur Geschwindigkeit am Scheitel nach der Formel von Strickler ist in Bild 4 dargestellt. Sie hängt vom Wert einer Funktion ab, die auf der horizontalen Axe aufgetragen ist. In dieser Funktion figurieren die Wassertiefe, die Geschwindigkeitshöhe, die Wellenlänge und das Sohlengefälle.

Die Vergrösserung der Fliessgeschwindigkeit der Welle bedeutet eine Verminderung der durchflossenen Querschnittsfläche, somit eine Verminderung des Rückstaues und eine Abschwächung der Dämpfung. Um noch brauchbare Resultate zu erhalten, möge im Hinblick darauf, dass auch der Reibungsbeiwert und der Rückstaufaktor geschätzte Werte sind, die in weiten Grenzen variieren können, eine Vergrösserung der gerechneten Geschwindigkeit um 20 bis 40 % zugelassen werden. Es ergibt sich dann als Kriterium für die Zulässigkeit der Methode De Marchi folgende Ungleichung:

$$(17) \quad \frac{H + 0,82 (V^2/2g)}{l} < J_s$$

Es muss also das Verhältnis der Wassertiefe vergrössert um das 0,8-fache der Geschwindigkeitshöhe zur Länge der Flutwelle geringer sein als die Neigung der Flussole. Dies ist bei den meisten vorkommenden Flutwellen der Fall. Falls diese Ungleichung nicht erfüllt ist, sind die wirklich auftretenden Geschwindigkeiten in zu starkem Mass verschieden von den nach der Formel von Strickler gerechneten. Die Maxima der Geschwindigkeit, der Abflussmenge und der Wassertiefe fallen nicht mehr zusammen wie in der Methode De Marchi, sondern folgen aufeinander. Zuerst kommt die grösste Geschwindigkeit, sodann folgt die grösste Abflussmenge und schliesslich die grösste Wassertiefe (Bild 5). Im Augenblick des Durchganges der grössten Wassermenge ist also der Wasserspiegel noch geneigt und somit die Geschwindigkeit auch im Bereich der grössten Wassermenge grösser als bei Normalabfluss nach der Formel von Strickler.

Die Methode De Marchi trägt der erhöhten Geschwindigkeit in der Wellenstirn einzig dadurch Rechnung, dass für die Wellenstirn die gleiche Geschwindigkeit angenommen wird wie für den Wellenscheitel. Für Flutwellen, die der obigen Ungleichung nicht genügen, könnte die erhöhte Fliessgeschwindigkeit durch Erhöhung des Reibungsbeiwertes  $K$  berücksichtigt werden. Ob derartige Anpassungen die Anwendbarkeit der Methode De Marchi erweitern, müsste durch Modellversuche abgeklärt werden. Andernfalls müsste zu den weit langwierigeren Methoden von Favre [5] und Craya [3], [4] geschritten werden. Jedenfalls hat die Methode De Marchi sich in Vergleichen mit Modell und Wirklichkeit gut bewährt, liefert also brauchbare Resultate. In vielen praktischen Fällen wird auch nur die Kenntnis einer Grössenordnung der Wassermengen genügen. Beispielsweise verursachen in breiten Flusstälern starke Unterschiede in den Wassermengen nur geringe Unterschiede in der Wassertiefe. Umgekehrt sind die Verhältnisse am Wellenrücken. Hier werden die Geschwindigkeiten gegenüber der Formel von Strickler vermindert. Da jedoch die Ankunftszeit der

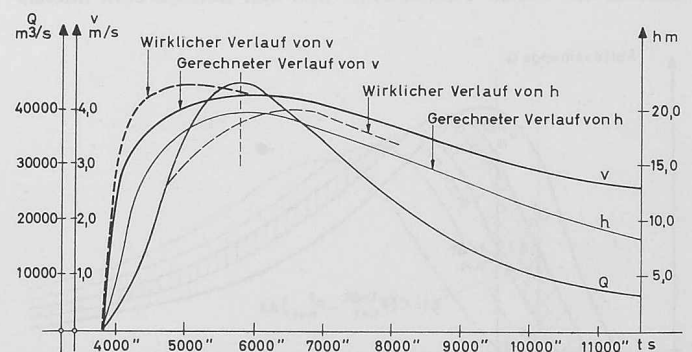


Bild 5. Wirkliche und gerechnete Werte von Wassertiefe und Geschwindigkeit

Welle und die maximale Ueberschwemmungstiefe im Vordergrund des Interesses steht, braucht über die Verhältnisse am Wellenrücken nicht weiter gesprochen werden.

## 5. Programmierung für elektronische Rechenautomaten

Die schrittweise Integration der Differenzgleichungen nach der Methode De Marchi eignet sich gut zur Programmierung für die Berechnung auf elektronischen Rechenautomaten. Es muss die Anlaufkurve an der Sperrstelle oder in einem beliebigen Profil bekannt sein. Sodann wird profilweise der zeitliche Verlauf der Flutwelle berechnet. Folgende Grössen müssen in die Maschine eingegeben werden:

### 1. Anfangswerte:

- $Q_{nmax}$  maximale Wassermenge im vorhergehenden Profil
- $F_{nmax}$  maximale Querschnittsfläche im vorhergehenden Profil
- $Q_0$  konstante Wassermenge im Flussbett
- $T_0$  Anfangszeit der Anlaufkurve

### 2. Profilstwerte:

- $\Delta x$  Abstand zum vorhergehenden Profil
- $k$  Reibungskoeffizient nach Strickler
- $C$  Rückstaufaktor nach De Marchi im Talabschnitt
- $J_s$  Sohlengefälle im Talabschnitt
- $\Delta t$  Zeitintervall, das für die Berechnung anzuwenden ist.

### 3. Variable Profilstwerte:

- $h_1, h_2, h_3 \dots$  = Wassertiefen
- $F_1, F_2, F_3 \dots$  = zugehörige Querschnittsflächen
- $P_1, P_2, P_3 \dots$  = zugehörige benetzte Umfänge

### 4. Anlaufkurve:

- $t_n^1, t_n^2, t_n^3 \dots$  = Zeiten
- $Q_n^1, Q_n^2, Q_n^3 \dots$  = zugehörige Wassermengen im vorhergehenden Profil

Das Programm ist so aufgestellt, dass zuerst die Anfangswerte und die Profilstwerte eingelesen und gespeichert werden. Nachher werden die Wassertiefen mit den zugehörigen Querschnittsflächen und den zugehörigen benetzten Umfängen eingelesen und die zugehörigen Wassermengen und Funktionen  $A$  berechnet. Alle fünf Werte werden in Tabellenform mit zunehmender Wassertiefe gespeichert. Sodann wird die Anlaufkurve im vorhergehenden Profil schrittweise eingelesen und mit Hilfe der Gleichung (9) die Funktion  $A$  berechnet. Durch Tabellenlesen wird die zugehörige Wassertiefe und Wassermenge am unteren Ende des Talabschnittes bestimmt. Als Kontrolle wird im Programm die Inhaltsfläche des zeitlichen Diagrammes der Wassermenge bestimmt, die immer gleich dem Volumen der aus dem Stausee ausgeflossenen Wassermenge sein muss. Am Schluss sind folgende Resultate verfügbar:

### 1. Zeitlicher Verlauf der Wassermenge am unteren Ende des Talabschnittes.

- $t_{n+1}^1, t_{n+1}^2, t_{n+1}^3 \dots$  Zeiten
- $Q_{n+1}^1, Q_{n+1}^2, Q_{n+1}^3 \dots$  zugehörige Wassermengen am unteren Ende des Talabschnittes

### 2. Maximalwerte am unteren Ende des Talabschnittes.

- $Q_{n+1, max}$  grösste Wassermenge
- $F_{n+1, max}$  grösste Querschnittsfläche
- $V_{n+1, max}$  grösste Geschwindigkeit
- $E_{n+1, max}$  grösste Energielinienhöhe
- $J$  Inhaltsfläche des zeitlichen Diagrammes (Volumen der ausgeflossenen Wassermenge)

Diese Resultate werden wieder als Eingabewerte für das nächstfolgende Profil verwendet. Im nächstfolgenden Profil müssen dann die neuen Profilstwerte und variablen Profilstwerte gegeben werden. In dieser Weise wird mit der Berechnung von einem Profil zum nächsten fortgeschritten.

## 6. Topographische Vorarbeiten und Auswertung

Zur Vorbereitung der Berechnung müssen die Querprofile ausgewählt werden. Die Abstände zwischen ihnen

werden zu 1 bis 3 km festgelegt, länger bei grossen Fließgeschwindigkeiten und kürzer bei kleinen. Die Hauptarbeit ist das Aufzeichnen der Querprofile aus geeigneten topographischen Karten und die Bestimmung der Querschnittsflächen und benetzten Umfänge in Funktion der Wassertiefe. Es hat sich gezeigt, dass diese Arbeit mit Vorteil mit Handrechnung ausgeführt wird, um den Besonderheiten der Topographie jedes einzelnen Querprofiles Rechnung tragen zu können. Es muss insbesondere festgestellt werden, ob starke Gefällsbrüche, Einengungen und Ausweitungen des Talquerschnittes vorhanden sind, die die Anwendbarkeit der Methode einschränken. Der Reibungskoeffizient nach Strickler wird zu  $k = 20$  bis 30 angenommen.

Wie oben erwähnt, ist die wirkliche Wassergeschwindigkeit grösser als die berechnete. Wenn das Verhältnis der Wasserspiegelneigung zur Sohlenneigung ein gewisses Mass überschreitet, so sollte der wirklichen Wassergeschwindigkeit durch Vergrösserung des Reibungsbeiwertes nach Strickler Rechnung getragen werden.

Der Rückstaufaktor nach De Marchi wird bei ungefähr prismatischer Talform zu  $C = 1,4$  angenommen, muss aber bei starken Ausweitungen oder Verengungen des Flusslaufes den örtlichen Verhältnissen angepasst werden. Starke Ausweitungen und Verengungen des Talquerschnittes sowie starke Gefällsbrüche bedingen eine Abweichung der Wasserspiegel vom Normalabfluss in einem prismatischen Gerinne. In solchen Fällen ist es angezeigt, in einem zweiten Berechnungsgang in die Formel das Energieliniengefälle statt des Sohlengefälles einzusetzen. Im Grenzfall kann eine Einengung oder ein Gefällsbruch so stark sein, dass als Ausflussfunktion am unteren Ende des Talabschnittes die Formel für vollkommenen Ueberfall eingesetzt werden muss. Dies ist aber ein Ausnahmefall.

Sind alle diese Fragen abgeklärt, so kann auf dem Rechenautomaten der zeitliche Verlauf der Wassermenge berechnet werden. Nachher können die gerechneten Wassertiefen, Geschwindigkeiten und Ankunftszeiten der Welle in die Querprofile und topographischen Karten eingetragen werden.

Es zeigt sich also, dass trotz Verwendung von Rechenautomaten der menschliche Arbeitsaufwand noch gross bleibt und nur die reine routinemässige Rechnung vom Automaten übernommen werden kann.

## 7. Zusammenfassung

Zur Planung der nötigen Sicherheitsvorkehrungen ist bei grossen Talsperren die Kenntnis der Folgen eines Bruches wertvoll. Die entstehenden Flutwellen können nach der Methode von De Marchi berechnet werden, wobei für deren Gültigkeitsbereich als Faustregel gilt, dass das Verhältnis der Energielinienhöhe zur Wellenlänge kleiner sein soll als das Sohlengefälle des Flusslaufes. Dabei ist es von vornherein klar, dass die Methode ein Näherungsverfahren darstellen muss, da die genaue Geländeform und die Veränderung in der Sohle infolge des mitgeführten Geschiebes nicht erfasst werden können. Die Methode eignet sich zur Programmierung auf elektronischen Rechenautomaten, wobei allerdings die Vorbereitungen und Auswertungen noch einen beträchtlichen Arbeitsaufwand bedingen.

Adresse des Verfassers: *Andreas Wackernagel*, dipl. Ing. ETH, bei Gebr. Gruner, Nauenstr. 7, Basel.

## Literaturverzeichnis

- [1] *J. Frank*: Betrachtungen über den Ausfluss beim Bruch von Stauwänden. SBZ, 69. Jahrgang (1951), Nr. 29, S. 401.
- [2] *G. De Marchi*: Sull'onda di piena che seguirebbe al crollo della diga di Cancano. «L'Energia Elettrica» Vol. XXII. Agosto - Settembre - Ottobre 1945.
- [3] *A. Craya*: Calcul graphique des régimes variables dans les canaux. «La Houille Blanche», Novembre 1945.
- [4] *R. Ré*: Etude du lacher instantané d'une retenue d'eau dans un canal par la méthode graphique. «La Houille Blanche», Mai 1946.
- [5] *H. Favre*: Etude théorique et expérimentale des ondes de translation dans les canaux découverts. Dunod, Paris, 1935.