

# Versuch einer dynamischen Flutwellenberechnung am Beispiel des Staudammes Bolgenach

(A case study of calculating the flood-hydrograph resulting from a break  
of the earth-dam of the Bolgenach reservoir)

von

Siegfried RADLER

mit 2 Abbildungen

Anschrift des Verfassers:

O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Techn. Siegfried RADLER  
Institut für Wasserwirtschaft  
Universität für Bodenkultur  
Gregor Mengel-Straße 33  
A-1180 Wien

Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr.	33	S. 187–197	Wien 1986
---------------------------------------	----	------------	-----------

### Inhalt

Zusammenfassung, Abstract . . . . .	188
1. Einleitung . . . . .	188
2. Berechnungsannahmen . . . . .	189
3. Berechnung der Förderfähigkeit . . . . .	189
3.1. Breschenform . . . . .	189
3.2. Hydraulische Annahmen . . . . .	191
3.3. Hydrologische Annahmen . . . . .	191
4. Geschieberegung . . . . .	192
4.1. Berechnung nach DU BOYS . . . . .	192
4.2. Berechnung nach MEYER-PETER und MÜLLER . . . . .	192
4.3. Berechnung nach EINSTEIN . . . . .	193
5. Diskussion der Ergebnisse . . . . .	193
5.1. Variation der Anfangsbresche . . . . .	193
5.2. Abbaufunktion nach SCHÖBER . . . . .	194
5.3. Abbau nach geschiebetheoretischen Überlegungen . . . . .	194
6. Schlußfolgerung . . . . .	196

### Zusammenfassung

Im Zuge der Erfassung der möglichen Auswirkungen eines Staudammbruchs wurde für den Speicher Bolgenach der Vorarlberger Kraftwerke AG (VKW) eine dynamische Ablaufberechnung durchgeführt. Das Ziel dieser Untersuchung war die Ermittlung einer Abflußganglinie, welche sich nach Bildung einer genügend großen Anfangsbresche einstellt. Die Abflußganglinie wurde sowohl nach einer vorgegebenen Abbaufunktion als auch nach verschiedenen geschiebetheoretischen Überlegungen ermittelt. Unter ungünstigsten Annahmen ist ein etwa säkulares Hochwasserereignis zu erwarten.

### Abstract

A model is present for the break-flood of the earth-dam of the Bolgenach reservoir (Vorarlberger Kraftwerke AG. (VKW)) to determine the possible effects of a dam-break. The calculation yields a dynamic flood-hydrograph that results from an initial breach of known size. Inputs of the calculation are a predetermined degradation function and varying bedloads. Even under most unfavourable conditions, according to the model, a dam-break would not surpass the event of a once in a century occurring natural flood.

### 1. Einleitung

Bei der Errichtung von Speichern ist der Behörde (in Österreich: der Staubeckenkommission des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft) prinzipiell eine sogenannte „Flutwellenberechnung“ vorzulegen. Für diese Berechnung sind je nach Art und Form der Talsperre verschiedene Annahmen zu treffen. Bei sehr schlanken

Mauern wird mitunter angenommen, daß plötzlich der gesamte Talquerschnitt durch eine Katastrophe freigesetzt wird (dies entsprach auch etwa der Katastrophe von Malpasset, Frankreich, im Jahre 1959), bei stärkeren Mauerquerschnitten wird eine Bresche im oberen Mauerteil angenommen. Bei derartigen Fällen handelt es sich um die Ermittlung des statischen Ablaufgeschehens, welche die Entleerung durch eine vorgegebene, zeitunabhängige Bresche beschreibt. Bei geschütteten Dämmen wird eine Anfangsbresche angenommen und die durch den Materialabtrag bedingte Vergrößerung der Bresche in zeitlicher Abhängigkeit festgelegt, so daß ein dynamisches Ablaufgeschehen simuliert wird.

Der vorliegende Bericht ist die Zusammenfassung der Ergebnisse einer diesbezüglichen Untersuchung am Institut für Wasserwirtschaft an der Universität für Bodenkultur für den Speicher Bolgenach der Vorarlberger Kraftwerke AG. Es wurde dabei der Versuch unternommen, den dynamischen Vorgang streng den hydraulischen und hydrologischen Gegebenheiten anzupassen. Neben dem hydraulischen Abflußvorgang des freien Überfalles spielte somit der Aufbau des Zonendamms mit den verschiedenen Kornzusammensetzungen am oberwasser- und unterwasserseitigen Stützkörper und dem Dichtungskern bei Anwendung verschiedener Geschiebetheorien eine ausschlaggebende Rolle. Der Vorarlberger Kraftwerke AG. sei an dieser Stelle für die Genehmigung dieser Publikation bestens gedankt.

## 2. Berechnungsannahmen

Für die Flutwellenberechnung des Staudammes Bolgenach wurde aufgrund der topographischen, geologischen, hydrologischen und bautechnischen Gegebenheiten angenommen, daß im Falle einer Talsperrenkatastrophe die Ausbildung einer trapezförmigen Vollbresche, ähnlich der des Teton-Dammes (Idaho, 1976), das Vorhandensein einer Anfangsbresche vorausgesetzt und für den Abbau eine Zeit von mehreren Stunden benötigt wird.

Der erste Teil der Ausarbeitungen befaßte sich mit der Erstellung der Abflußganglinie unter Berücksichtigung einer 2-stündigen Abbauphase des Damms, wobei eine von SCHÖBER (1977) vorgeschlagene Breschenform und Abbaufunktion des Damms zugrundegelegt wurde (Abb. 1). Da hier die Abbaufunktion in ihrem zeitlichen Verlauf bekannt war, galt es lediglich, den Durchfluß ohne Berücksichtigung auf die Schleppspannungsverhältnisse zu ermitteln. Der Breschendurchfluß hängt hier lediglich von der Energielinienhöhe über der Breschenkrone und einem in engen Grenzen schwankendem Abflußkoeffizienten ab.

Im zweiten Teil wurden nach Annahme einer Anfangsbresche mit Hilfe verschiedener Geschiebetheorien die tatsächlichen Erosionen errechnet.

## 3. Berechnung der Förderfähigkeit

### 3.1. Breschenform

Der in Abb. 1 dargestellte Querschnitt der Bresche wurde jeweils auf den Sperrhauptschnitt bezogen, bei der Annahme verschiedener Neigungen der Breschensohle mußten somit verschiedene Förderfähigkeiten resultieren. Die Wahl der Sohlneigung

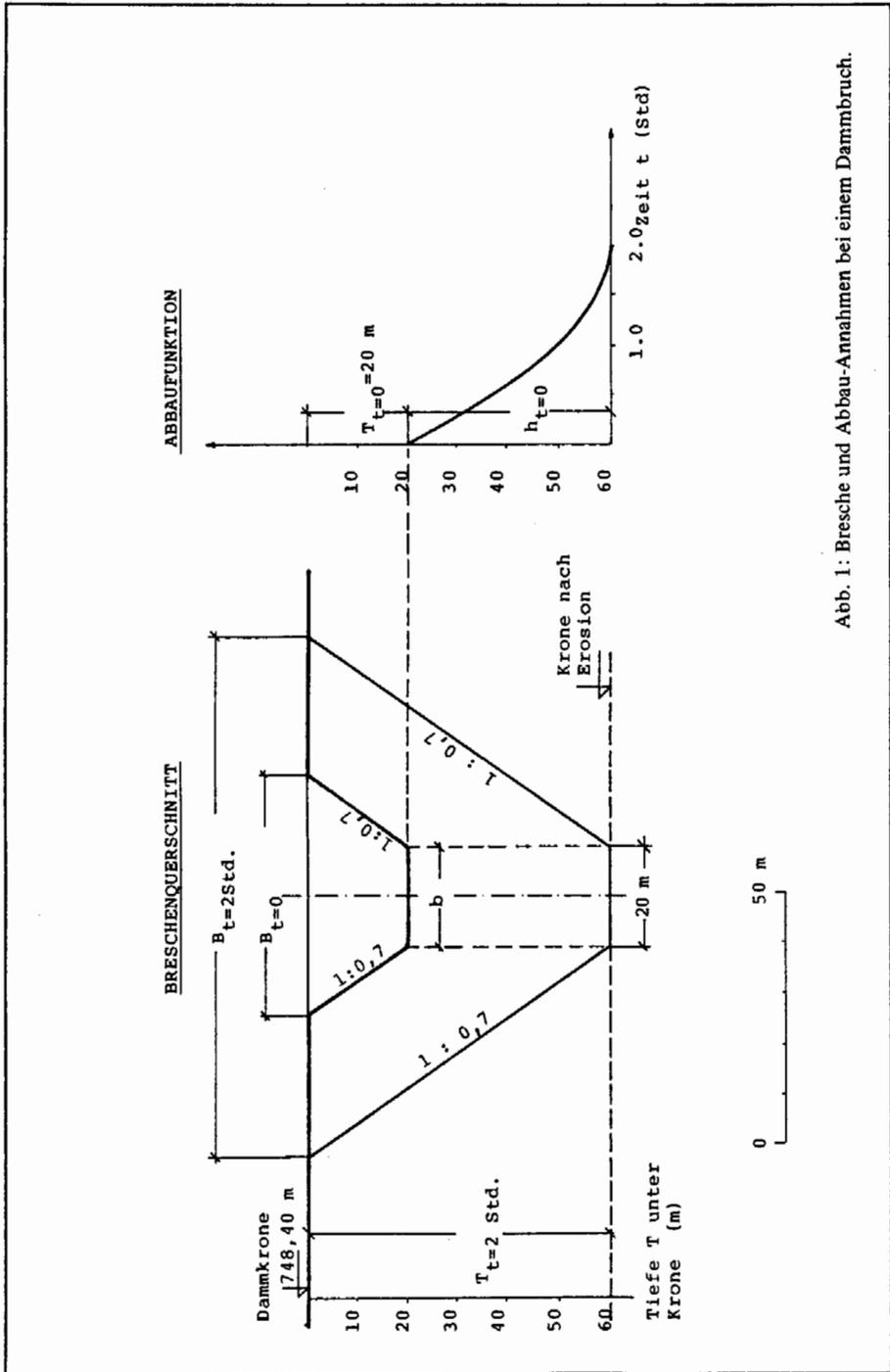


Abb. 1: Bresche und Abbau-Annahmen bei einem Dambruch.

der Bresche in Fließrichtung erfolgt unter Berücksichtigung der Energielinie, wobei der Maximalabfluß bei minimaler Energiehöhe dann gegeben ist, wenn unmittelbar über der oberwasserseitigen Breschenkante der Fließwechsel von Strömen auf Schießen stattfindet und allein der Reibungsverlust ausschlaggebend für die Sohlneigung ist. Als Rauigkeitsmaß wurde der Mittelwert  $d_m$  der Körnung der benetzten Breschenfläche herangezogen. Es zeigte sich, daß auch bei verschiedenen Sohllagen nahezu gleichbleibende Anteile von Stützkörper, Moränenkern und Steinschüttung resultierten, so daß mit einem einheitlichen  $d_m = 0,12$  m gerechnet werden konnte.

### 3.2. Hydraulische Annahmen

Als Ausgangswasserspiegel wurde das Stauziel 744,2 m ü. A. angenommen und der ständige Zufluß eines einjährigen Hochwassers  $HQ_1 = 92 \text{ m}^3/\text{s}$  angesetzt.

Der Durchfluß wird mit der Formel für Trapezquerschnitt berechnet:

$$Q = C \cdot H^{1.5} \cdot (b_0 + 4/5 n \cdot H)$$

es bedeuten: C . . . Abflußbeiwert nach FRANK (1951)

H . . . Energiehöhe über Breschenkrone

$b_0$  . . . Sohlbreite der Bresche

n . . . Böschungsneigung der Bresche

Der Abflußbeiwert C ist vom Verhältnis der Stauraumbreite zur mittleren Breschenbreite abhängig.

Er nimmt generell mit zunehmender Speicherentleerung ab und kann mit genügender Genauigkeit von anfangs

$$C_0 = 1,49 \text{ (bei Stauziel)}$$

bis schließlich

$$C_e = 1,27 \text{ (bei Entleerung)}$$

linear über die Zeit abnehmend angesetzt werden.

Nicht berücksichtigt wurde hingegen die Trägheit des Wassers, die sich als flußauflaufender Sunk auswirkt und den Nachschub der Wassermassen für den rechnerisch ausgewiesenen Überfall verringert.

### 3.3. Hydrologische Annahmen

Ein Teil der Strömungsenergie des Wassers wird zum Geschiebetransport verwendet. Zur Vereinfachung wird vorausgesetzt, daß der Abtrag gleichmäßig über die gesamte Bresche erfolgt, wobei die Sohlerosion stark ausgeprägt ist. Hier bieten sich verschiedene Formen der Breschenausbildung an.

Anhand von bekannten Laborversuchen, sowie beobachteten Damnbrüchen (JOHNSON & ILLES, 1978) wurden verschiedene Böschungsneigungen und Sohlverbreiterungen untersucht.

Böschungsneigungen 1:0,4 und 1:0,7

Sohltiefung 2:3

Verbreiterung 1:3

Im Zuge des 2. Untersuchungsabschnittes wurde lediglich die

Böschungsneigung 1:0,7

jedoch keine Verbreiterung der Böschungssohle angenommen.

Bei der Berechnung der Geschiebebewegung wurde angenommen, daß sich das Material lose auf der Gerinnesohle befindet. Es wurde also weder die Verdichtung des Schüttmaterials noch die Verzahnung berücksichtigt. Die Steinschüttung an der Wasserseite wurde ebenfalls nicht gesondert berücksichtigt, sie ging nur über die Mittelwertbildung in die Berechnung mit ein. Weiterhin unberücksichtigt blieb die Tatsache, daß diese Steinschüttung innerhalb der Bresche eine Barriere bildet, die einen Sekundärabsturz mit anschließender Auskolkung verursachen wird. Die damit verbundene Seitenerosion wurde nur insofern berücksichtigt, als die Transportenergie für diese seitlich abgleitenden Massen aufgebracht werden mußte.

#### 4. Geschieberegung

Die Abtragsberechnungen wurden nach folgenden Geschiebetheorien durchgeführt: DU BOYS – EINSTEIN – MEYER-PETER.

Für die Handhabung all dieser Formeln ist die Definition des das Korngemisch charakterisierenden Korndurchmessers notwendig. Aufgrund der Siebkurven wurde, übereinstimmend mit 3.1, der mittlere Korndurchmesser für jedes der drei verschiedenen Einbaumaterialien bestimmt.

##### 4.1. Berechnung nach DU BOYS

Bei DU BOYS wandert das Geschiebe in Schichten, die Bewegung wird durch die Schleppspannung

$$\tau = \rho \cdot g \cdot h \cdot I \quad \text{in (N/m}^2\text{)}$$

hervorgerufen. Das Geschiebekorn mit dem Durchmesser  $d$  wandert erst, wenn  $\tau$  eine bestimmte kritische Größe erreicht hat, d. h. wenn das Energieliniengefälle  $I$  groß genug wird. Für diese kritische Größe  $\tau_0$  liegt eine graphische Auswertung vor (ZELLER, 1963). Die Tatsache, daß es sich im gegebenen Falle mit einer Strömung über vier Zonen verschiedener mittlerer Korndurchmesser handelte und überdies die graphischen Auswertungen über Gebühr extrapoliert werden mußten, hatte unverhältnismäßig hohe Transportwerte zur Folge, so daß auf die Wiedergabe dieser Ergebnisse verzichtet wird.

##### 4.2. Berechnung nach MEYER-PETER & MÜLLER (1949)

Die Geschiebeformel nach MEYER-PETER wurde experimentell in einem Kanal von 50 m Länge und einem Querschnitt von 2,0 m x 2,0 m gefunden. Beim Geschiebe handelte es sich um Material mit Korndurchmesser von 5 bis 30 mm und einer spezifischen Dichte von  $2,68 \text{ t/m}^3$ . Die Formel berücksichtigt die spezifische Dichte des Geschiebes, den Abfluß pro Breitereinheit, das Energieliniengefälle und den einheitlichen Korndurchmesser.

Um die Formel für praktische Aufgaben anwendbar zu machen, müssen statt den einheitlichen Korngrößen Geschiebegemische verwendet werden. Das vorhandene Energiegefälle wird in 2 Komponenten zerlegt, und zwar in einen reinen Reibungsanteil  $I_r$  und einen von der Sohlkonfiguration abhängigen Anteil  $I_w$ , welcher durch Wir-

belbildung hervorgerufen wird. Über die Beziehung zwischen Schubspannungsintensitätsparameter und REYNOLDS'scher Zahl  $Re$  (ZIPPE, 1973 und EINSTEIN, 1950) läßt sich feststellen, um welche Bettform es sich handelt und, sofern Flachbettaußbildung vorliegt, kann  $I_r \approx I$  gesetzt werden.

#### 4.3. Berechnung nach EINSTEIN (1950)

Die Untersuchungen von EINSTEIN beruhen auf der Theorie, daß die Geschiebebewegung durch „Gleiten“, „Rollen“ und „Hüpfen“ der Einzelkörner charakterisiert werden kann. Aufgrund vieler Versuche stellte EINSTEIN fest, daß sich ein Korn gegebenen Durchmessers in einer Reihe von Einzelbewegungen konstanter mittlerer Länge fortbewegt. Die Kornzahl, die aus einem Flächenelement pro Zeiteinheit abtransportiert wird, ist eine Funktion der Körner eines bestimmten Durchmessers und der Wahrscheinlichkeit ihres Wegtransportes. Mit Hilfe der Turbulenztheorien wurde diese Wahrscheinlichkeit formelmäßig erfaßt und ist unter dem Namen „EINSTEIN'sche Geschiebefunktion“ bekannt.

Unter diesen Annahmen werden Anlandung und Abtragung gegenübergestellt, wobei

$$\Phi = f(\Psi) \text{ ist.}$$

Es bedeuten:  $\Phi$  . . . die Transportintensität;  $\Psi$  . . . die Fließintensität.

Diese beiden „Intensitäten“ sind dimensionslose Größen und berücksichtigen Dichte, Korndurchmesser und spezifische Dichte des Transportmediums und die hydraulischen Kennwerte des Gerinnes ( $R, I$ ).

Bei uneinheitlichen Korndurchmessern wird der von EINSTEIN repräsentative Korndurchmesser  $d_{35}$  verwendet.

Diese Gleichung ist universell anwendbar und lieferte auch in unserem Fall die glaubwürdigsten Ergebnisse.

### 5. Diskussion der Ergebnisse

Zur Berechnung der Abflußganglinie und der diversen anderen Zeitfunktionen wurde ein FORTRAN-Programm für die CYBER 74 geschrieben.

Es zeigte sich, daß mit der vereinfachten Speichergleichung bei einem Intervall von 10 bis 20 sec. der Vorgang ausreichend genau beschrieben werden kann.

#### 5.1. Variation der Anfangsbresche

Folgende Faktoren wurden untersucht:

- Auswirkung des Gefälles
- Auswirkung der Anfangstiefe
- Auswirkung der Anfangsbreite
- Auswirkung der Seitenerosion

Bei Anwendung der Formel von EINSTEIN und Berücksichtigung der Seitenerosion mußte, um innerhalb einer Zeit von etwa 2 Stunden die Erosionsbasis erreichen zu können, ein Minimalgefälle von 6% angesetzt werden, nahezu unabhängig davon, wel-

che Anfangsbresche gewählt wurde.

Wenn auch die Abmessungen der Anfangsbresche nicht sonderlich auf die Ausbildung der Endsohle einwirken, so waren sie für das Abflußmaximum ausschlaggebend. Es zeigte sich, daß sowohl nach EINSTEIN als auch nach MEYER-PETER die Anfangsbreite für den nachfolgenden Erosionsvorgang einen wesentlich größeren Einfluß hatte als die Anfangshöhe.

Auf diese Weise wurden 10.000 Sekunden nach Dambruch bei einer Breiten- und Tiefenvariation der trapezförmigen Anfangsbresche zwischen 20 m und 10 m bzw. 20 m und 5 m Erosionssohlen zwischen Kote 693,4 m ü.A. und 690,6 m ü.A. und Maximalabflüsse zwischen  $2.500 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $3.700 \text{ m}^3/\text{s}$  errechnet.

Die offensichtliche Diskrepanz, daß Ereignisse mit kleinerer Anfangsbresche größere Spitzenabflüsse, nach 10.000 sec. jedoch noch eine höhere Erosionsbasis aufwiesen, hat mehrere Ursachen:

- Zunächst erfolgt durch eine kleinere Bresche (insbesondere durch Verringerung der Breschenhöhe) eine Verlagerung des Erosionsvorganges. Dadurch kommt es durch die Annahme des ständigen Zuflusses von  $HQ_1$  zu einer geringfügigen Spiegelerhöhung. Der Erosionsvorgang beginnt tangentiell von Null.
- Durch die willkürliche Annahme der Seitenerosion ( $\Delta B/\Delta H = 1/3$ ) wirkt sich die Zunahme der Breschenbreite trotz des linearen Auftretens im Abflußgeschehen wesentlich stärker aus als die Höhenzunahme, die zur 1,5-ten Potenz wirkt.
- Der Vergleich von Geschiebefluß und Abfluß zeigt, daß hier in erster Linie der spezifische Abfluß ausschlaggebend ist (Abb. 2).

## 5.2. Abbaufunktion nach SCHOBER

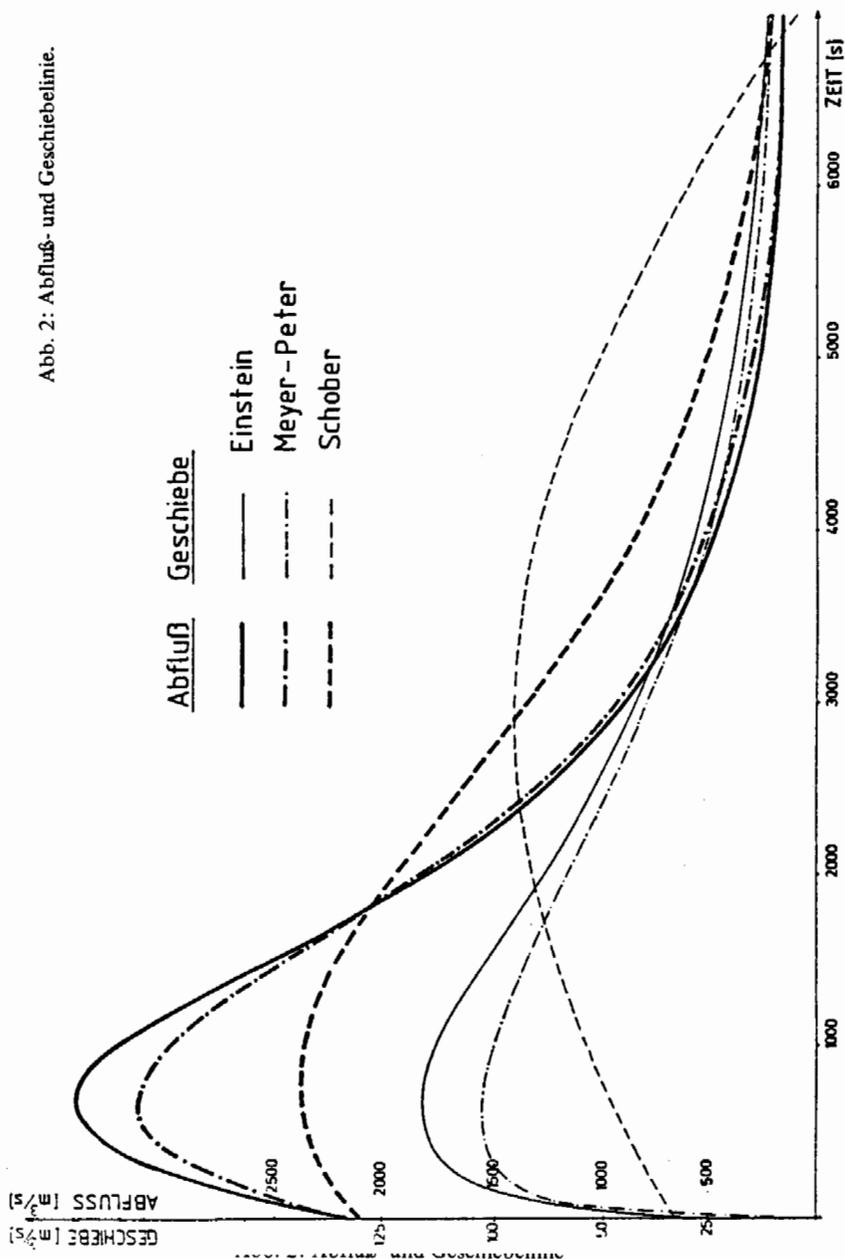
Da die Abbaufunktion in ihrem zeitlichen Verlauf bekannt ist, kann die Abflußganglinie aufgrund der hydraulischen Gegebenheiten errechnet werden; Die Neigung der Breschensohle wurde variiert und aus Vergleichszwecken mit 6 % dargestellt (Abb. 2). Der maximale Geschiebefluß beträgt gleichbleibend für alle Neigungen  $70,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 5.3. Abbau der geschiebetheoretischen Überlegungen

Der Vergleich der unter 5.2 gewonnenen Ergebnisse mit dem unter Verwendung der Formeln von EINSTEIN und MEYER-PETER resultierenden Abflußgeschehen läßt interessante Schlüsse zu: wiederum unter Variation des Sohlgefälles resultierten nach EINSTEIN folgende Maximalabflüsse und dabei gleichzeitig auftretende maximale Geschiebeabflüsse:

$I_S$	$Q_{\max}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	nach sec.	$G_{\max}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
4 %	2.878	550	56,5
5 %	3.146	680	74,5
6 %	3.407	710	91,3
7 %	3.690	750	116,8

Das Abflußgeschehen bei  $I = 6\%$  ist wiederum vergleichsweise in Abb. 2 dargestellt.



Einen ähnlichen Verlauf zeigt auch die Berechnung nach MEYER-PETER, wobei das Ergebnis von EINSTEIN jeweils bei einem etwa 1 % größeren Gefälle erreicht wird:

$I_S$	$Q_{\max}$ ( $m^3/s$ )	nach sec.	$G_{\max}$ ( $m^3/s$ )
4 %	2.477	500	38,2
5 %	2.788	600	56,2
6 %	3.142	700	77,6
7 %	3.501	750	101,8

Im Hinblick auf die diversen Randbedingungen und Berechnungsvereinfachungen (keine Verdichtung, gleichmäßige Körnung, gleichmäßiges Gefälle usw.) sind die nach der Geschieberegung ermittelten Werte sicherlich als oberste Grenzwerte zu betrachten. Die nach der Abbaufunktion von SCHOBER ermittelte Abflußganglinie hat trotz der physikalischen Unstimmigkeit zwischen Maximalabfluß und maximalem Geschiebefluß, vor allem aber wegen der rechnerisch nicht erfaßbaren Abbauvorgänge gerechtfertigten Anspruch auf Anerkennung.

## 6. Schlußfolgerung

Trotz der Notwendigkeit, eine Reihe von hydraulischen, hydrologischen und bodenmechanischen Berechnungsvereinfachungen anzunehmen, ist es im Zuge dieser Untersuchung gelungen, eine mehrfach verknüpfte Haushaltsbeziehung zwischen Speichereinhalten, Abtragskubatur, Schleppspannung und Abflußganglinie herzustellen.

Die Untersuchung hat gezeigt, daß nicht nur die Dimensionen der Anfangsbresche und das Sohlgefälle, sondern vor allem die Annahme der Entwicklung der Bresche eine sehr große Rolle spielen.

Die Geschiebetheorien nach EINSTEIN und MEYER-PETER zeigen gute Übereinstimmung, wobei der Ansatz nach SCHOBER aufgrund der zahlreichen Vereinfachungen realistischer erscheint.

Flußab der Sperrenstelle verläuft die Bolgenach bis zur Mündung in die Weißach und diese schließlich in die Bregenzerach bis Kennelbach, 7 km flußauf Bregenz, in einem engen, nahezu unbesiedelten Tal.

Das Abfuhrvermögen der Bregenzerach von Kennelbach bis zum Bodensee ist für ein  $HQ_{100} = 1200 m^3/s$  durch eine Regulierung gewährleistet (Freibord 1,6 m). Ohne Freiburg beträgt die Schluckfähigkeit zwischen  $2.250 m^3/s$  und  $2.670 m^3/s$ .

Unter Berücksichtigung der relativ kurz andauernden Abflußspitze bei der Sperrenstelle, der geringen Fracht der Flutwelle und der langen Fließstrecke im unbesiedelten Gebiet (ca. 25 km) kann angenommen werden, daß der Spitzenwert vom Speicher bis Kennelbach mindestens auf die Hälfte abgebaut wird. Nach Erfahrungswerten bei Flutwellenberechnungen nimmt die Maximalintensität von der Sperrenbruchstelle rasch mit der Entfernung von dieser ab, wobei die Faustformel gilt: in der Entfernung  $L = 1000 H$  (Sperrenhöhe) beträgt der Abfluß nur mehr 1/4 bis 1/8 des Initialflusses.

In Anbetracht der extrem ungünstigen Annahmen sind somit die Auswirkungen eines Dammbrechens mit einem saekularen Hochwasserereignis vergleichbar.

## Schrifttum

- EINSTEIN, H. A.: The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. – United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Bull., Nr. 1026, 1950.
- FRANK, J.: Betrachtungen über den Ausfluß beim Bruch von Stauwänden. – SBZ, 69, Nr. 29, 1951.
- GRAF, W.H.: Sedimenttransport in Gerinnen und Röhren. 100 Jahre Hochschule für Bodenkultur, Wien. – Fachveranstaltungen Bd. V, Teil 1, 1973.
- JOHNSON, F. A. & ILLES, P.: A classification of dam failures. – Water Power, 28, Nr. 12, 1976.
- MEYER-PETER, E. & MÜLLER, R.: Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebes. – SBZ, 67, Nr. 3, 1949.
- SCHOBER, W.: Gutachtliche Stellungnahme – Staudamm Bolgenach, dammbautechnische Gesichtspunkte für die Flutwellenberechnung. – 1977 (nicht veröffentlicht).
- ZELLER, J.: Einführung in den Sedimenttransport offener Gerinne. – SBZ, 81, Nr. 34, 1963.
- ZIPPE, H. J.: Praktische Anwendung einiger Geschiebegleichungen und Vergleich deren Resultate. – Wiener Mitt., H. 14, Hydrologie-Fortbildungskurs 1973.

Manuskript eingelangt am 10. April 1986  
angenommen am 17. Juni 1986