Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 93 (2001)

Heft: 3-4

Artikel: Ein Parameterverfahren zur Bestimmung der flächigen Ausbreitung von Breschenabflüssen

Autor: Beffa, Cornel

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939878

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: 25.12.2025

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

Ein Parameterverfahren zur Bestimmung der flächigen Ausbreitung von Breschenabflüssen

■ Cornel Beffa

Zusammenfassung

Nach einem Sperrenbruch fliesst der Speicherinhalt durch die Bresche ab und breitet sich, sofern die topografischen Verhältnisse dies erlauben, flächig im Gelände aus. Das in diesem Beitrag vorgestellte Parameterverfahren ermöglicht die Bestimmung der dabei auftretenden Intensitäten in Abhängigkeit von Breschendistanz und Sohlengefälle. Berücksichtigt werden ferner der Einfluss der Breschengeometrie, des Speichervolumens und der Sohlenrauigkeit. Das Verfahren eignet sich zur raschen Beurteilung, ob und wie stark ein Standort unterhalb einer Sperre nach einem Sperrenbruch durch ausfliessendes Wasser gefährdet ist.

Abstract
Characteristic parameters to estimate dam break flow extension on inclined planes.

A method based on dimensional analysis is presented for the estimation of flood intensities after a dam failure given the volume of the storage and the geometry of the breach. It is assumed that the flood wave extends on an inclined plane where the flow field is two-dimensional and the influence of the boundaries can be ignored. Bed slope and bed friction are considered. The method allows for a short assessment whether a location downstream of a dam is endangered or not in case of a dam failure. The procedure is implemented as a computer program that can be downloaded from http://www.fluvial.ch/download.html.

Einleitung

Der neuen Stauanlagenverordnung (StAV 1998) unterstehen neben grossen auch kleinere Stauanlagen, sofern sie eine besondere Gefahr für die Unterlieger darstellen. Für die Beurteilung, ob dies für eine Stauanlage zutrifft oder nicht, werden quantitative Angaben über die Ausbreitung der Flutwelle und die Grösse der dabei auftretenden Abflussintensitäten benötigt (Müller 2001).

Versagt eine Sperre, so fliesst der Speicherinhalt als Flutwelle durch die sich bildende Bresche ab. In einem Talquerschnitt erfolgt die Wellenausbreitung primär eindimensional. Die Abflussmengen und -höhen sowie die Eintreffzeit lassen sich mittels Abschätzverfahren (CTGREF 1978, Westphal und Thompson 1987, Paquier und Robin 1997) oder eindimensionaler Abflussmodelle (Chervet und Dallèves 1970) bestimmen.

Bei der Ausbreitung der Flutwelle auf einer Fläche ist der Abflussvorgang zweidimensional und die Abnahme der Abflussintensität erfolgt schneller als im eindimensionalen Fall. Zur Simulation solcher Flutwellen werden üblicherweise zweidimensionale Abflussmodelle eingesetzt (Bechteler et al. 1992, Fracarollo und Toro 1995, Hervouet und Petitjean 1999).

Im Fall des Abflusses in eine Ebene ohne Längs- und Quergefälle breitet sich die Flutwelle näherungsweise radial aus (Broich et al. 1993). Massgebende Parameter sind dabei die Stauhöhe, die Breschenbreite, das Speichervolumen und die Rauigkeit der Oberfläche, ausgedrückt beispielsweise durch einen mittleren Korndurchmesser des Sohlenmaterials. Ab einem bestimmten Abstand von der Bresche tritt ein Wechsel von schiessendem zu strömendem Abfluss auf (Wassersprung). Unterhalb des Wassersprungs wird der Abfluss zusätzlich von den hydraulischen Randbedingungen der Überflutungsfläche beeinflusst.

Für den Abfluss auf einer geneigten Fläche kommt als weiterer Parameter das Längsgefälle der Sohle hinzu. Die daraus resultierende Wellenausbreitung ist achsensymmetrisch und näherungsweise linear: Die Symmetrieachse folgt der Falllinie der geneigten Fläche und verläuft durch die Mitte der Bresche. Für Gefälle grösser als ca. 0,5% bleibt der Abfluss überkritisch (schiessend) und wird von den hydraulischen Randbedingungen der Überflutungsfläche nicht beeinflusst.

Grundlagen

Für den eindimensionalen «idealen» Sperrenbruch (instantaner Bruch, ebene und reibungsfreie Sohle, hydrostatischer Druck) hat Ritter bereits 1892 eine analytische Lösung für die Flachwassergleichungen entwickelt, basierend auf der Theorie der Charakteristiken (z.B. Liggett 1994).

Im Speicher breitet sich nach dem Bruch eine negative Welle aus. Die Geschwindigkeit der Wellenfront entspricht der Geschwindigkeit einer Flachwasserwelle, das heisst:

$$C = \sqrt{gH} \qquad (1)$$

mit g = Erdbeschleunigung und H = Stauhöhe im Speicher. Die Bresche selbst stellt einen Kontrollquerschnitt dar. Die Fliessgeschwindigkeit in der Bresche beträgt

$$v_B = \frac{2}{3} C \qquad (2)$$

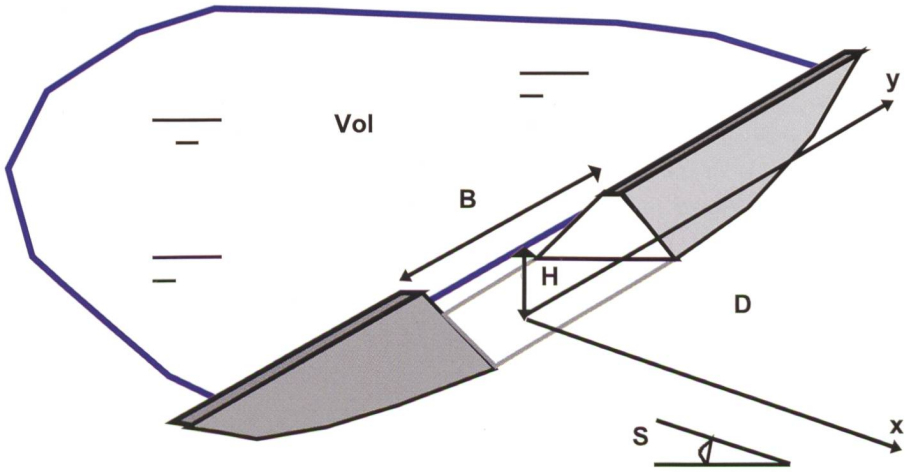

Bild 1. Abfluss aus einer Bresche auf einer geneigten Fläche: massgebende Parameter und Lage der Koordinatenachse.

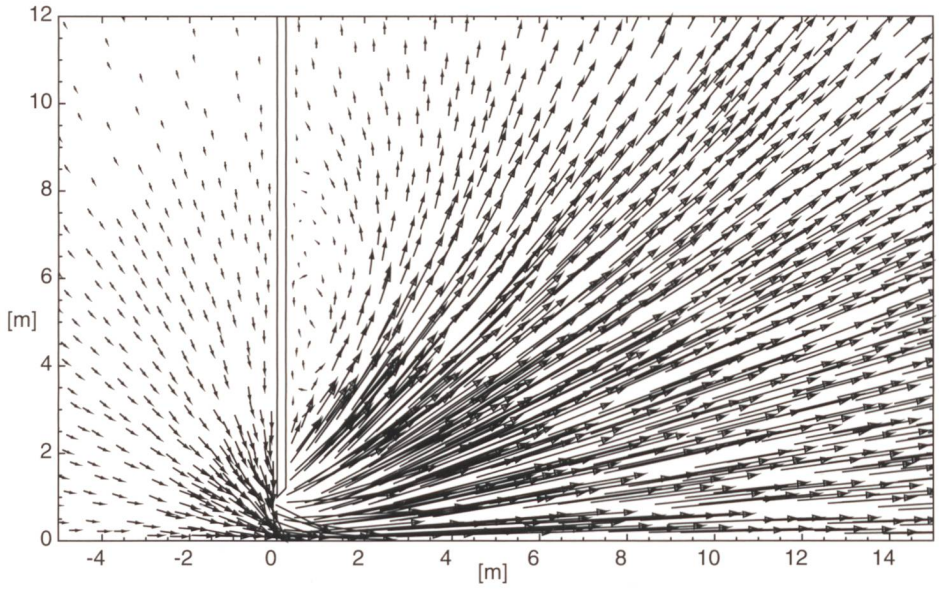

Bild 2. Berechnete Vektoren der Fliessgeschwindigkeit im Breschenbereich für eine Breschenbreite B = 2 m, Stauhöhe H = 1 m und Sohlengefälle 0,5%. Berechnet und dargestellt wird nur eine Symmetriehälfte. Ersichtlich ist der laterale Zufluss im Speicher, die Einschnürung des Strahles im Breschenquerschnitt sowie die Ausbreitung des Strahles in der Ebene verbunden mit der Ablösung und der Zirkulationszone.

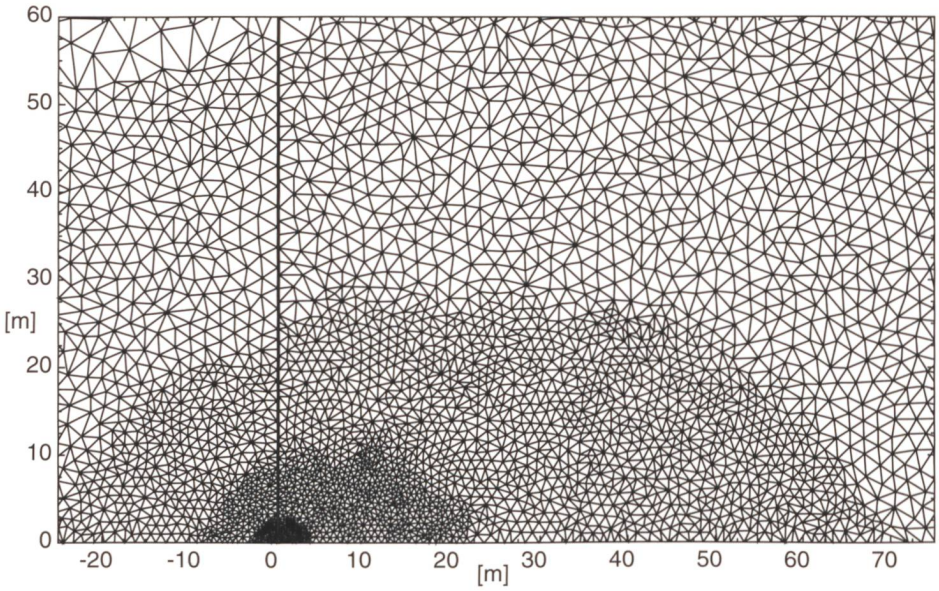

Bild 3. Verwendetes Berechnungsnetz für Dammbruchberechnung (Ausschnitt). Modelliert wird nur eine Symmetriehälfte. Die Bresche befindet sich bei x = 0 und ist 1 m breit. Die Fläche der Zellen variiert zwischen 100 m² (Fernbereich) und 0,1 m² (Breschennahbereich).

Parameter	Wert klein	Beschreibung	Wert gross	Beschreibung
B/H	0,5	schmale Bresche	4	breite Bresche
Vol/(BH²)	10	kleiner Speicher	∞	grosser Speicher
D/H	0,01	«glatte» Sohle	0,3	sehr raue Sohle
S	0,0025	flach	0,16	steil

Tabelle 1. Charakteristische Grössen und Wertebereiche.

und die Abflusshöhe

$$h_B = \frac{4}{9} H \qquad (3)$$

Für den spezifischen Abfluss aus der Bresche erhält man

$$q_B = v_B h_B = \frac{8}{27} CH \qquad (4)$$

Ist die Breschenbreite kleiner als die Breite des Speichers, wird die Bresche lateral angeströmt, was den spezifischen Abfluss erhöht. An den seitlichen Breschenrändern tritt eine Einschnürung des austretenden Strahles auf, was die Ausbreitung der Flutwelle beeinflusst (Bild 2). Die Einschnürung hängt dabei vom Verhältnis der Breschenbreite zur Stauhöhe ab und ist für schmale Breschen grösser als für breite Breschen. Einen weiteren Einflussfaktor stellen die Reibungskräfte an der Sohle dar, verursacht primär durch die Rauigkeit der Oberfläche. Diese Energieverluste können mittels logarithmischem Fliessgesetz in Funktion eines charakteristischen Korndurchmessers D beschrieben werden. In der Ingenieurpraxis ist auch die empirische Formel von Gaukler-Manning-Strickler verbreitet. Dieser Ansatz ist allerdings dimensionsbehaftet und deshalb für eine Parameterstudie ungeeignet.

Dimensionsanalyse

Wie die obigen Ausführungen zeigen, sind die physikalischen Zusammenhänge zwischen den Strömungsgrössen zum Teil bekannt, jedoch für unsere Fragestellung nicht direkt anwendbar. Die Dimensionsanalyse dient nun dazu, den Einfluss der freien Parameter auf die gesuchten Grössen möglichst einfach und allgemein gültig zu beschreiben, um so ein allgemein verwendbares Verfahren zu erhalten. Hierzu nehmen wir an, dass die Wellenausbreitung auf einer geneigten Fläche sich mittels folgender Parameter beschreiben lässt:

H = Stauhöhe am Fuss der Sperre
B = Breschenbreite
Vol = Volumen des Speichers
S = Längsgefälle der Sohle
D = mittlerer Korndurchmesser der Sohle
g = Erdbeschleunigung
ρ = Dichte von Wasser

Der Einfluss der Zähigkeit wird vernachlässigt, da turbulente Abflussbedingungen vorausgesetzt werden können. Zur Beschreibung der Strömungsgrössen wird ein kartesisches Koordinatensystem eingeführt (siehe Bild 1) mit:

x = Entfernung von der Sperre,
y = Entfernung von der Strahlachse.

Aus den freien Parametern lassen sich dimensionslose Produkte bilden, welche den Geltungsbereich des Verfahrens definieren (Tabelle 1). Die dimensionslosen Produkte

spannen einen Parameterraum auf, innerhalb dessen das gesuchte Verfahren eine sachlich richtige Lösung liefern soll.

Die abhängigen Strömungsvariablen

q = spezifischer Abfluss (d.h. Abfluss pro Längeneinheit)

v = Fliessgeschwindigkeit

weisen einen relativ glatten Verlauf auf und sind zur Beschreibung der Strömung gut geeignet. Betrachtet werden dabei nur die Maxima. Weitere Strömungsgrössen lassen sich aus den gewählten Variablen ableiten, z.B.

h = Abflusshöhe: $h = q / v$

h_e = Energiehöhe: $h_e = h + v^2 / (2g)$

Dabei wird angenommen, dass die Maxima der Strömungsgrössen an einer bestimmten Stelle gleichzeitig auftreten. Dies trifft zu für den Ausfluss aus einem grossen Speicher, wo sich nach dem Durchgang der Wellenfront quasistationäre Abflussverhältnisse einstellen. Für kleine Speicher ist dies zumindest näherungsweise erfüllt.

Simulationsrechnungen

Die noch unbekannten funktionalen Beziehungen zwischen den Strömungsgrössen und den freien Parametern lassen sich durch Simulationsrechnungen bestimmen. Das hierzu verwendete Modell FLUMEN (http://www.fluvial.ch/flumen.html/) basiert auf einem Zellenmittelpunkt-Finite-Volumen-Verfahren zur Lösung der tiefengemittelten Flachwassergleichungen (Beffa 1994). Die Flussterme werden nach dem Ansatz von Roe bestimmt (Roe 1981), womit eine gute Konvergenz sowohl für unter- als auch für überkritische Abflussbedingungen gewährleistet ist. Die Lösung der algebraischen Gleichungen erfolgt mit dem expliziten Euler-Verfahren. Zur exakten Abbildung der Strömungsgradienten im Breschenbereich wird das verwendete Dreiecksnetz lokal so weit verdichtet, dass numerische Fehlereinflüsse ausgeschlossen werden können (Bild 3).

Die Flachwassergleichungen stellen ein Anfangswertproblem dar. Für eine Dammbruchsimulation genügt als Anfangsbedingung die Vorgabe der Wasserspiegellage im Speicher. Alle übrigen Gitterzellen werden als trocken angenommen, d.h. Abflusshöhe und Fliessgeschwindigkeiten sind Null. Trifft der Abfluss auf den Modellrand, so sind geeignete Randbedingungen zu definieren. Für die vorliegende Untersuchung wird angenommen, dass am Modellrand kritischer Abfluss herrscht und deshalb vom Modellrand her kein Rückstau auftritt. Reibungsverluste können mit den üblichen empirischen Reibungsgesetzen beschrieben werden. Für die vorliegende Untersuchung wird das logarithmische Fliessgesetz verwendet. Zur Verifizierung des numerischen Modelles ist ein Vergleich mit den Ergebnissen von physikalischen Modellversuchen ausgeführt worden. Broich et al. (1993) untersuchten die Ausbreitung einer Flutwelle auf einer glatten Ebene nach einem instantanen Dammbruch. Die Masse der Versuchsanlage lauten: Stauhöhe H = 0,2 m und Breschenbreite B = 0,7. Die Abflusshöhen wurden mittels Drucksensoren bestimmt und die Ausbreitung der Flutwelle mittels Videokamera aufgezeichnet. Die Nachrechnung der Flutwellenausbreitung mit dem 2-D-Modell zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den beobachteten Grössen. Die Abnahme der Abflusshöhe entlang der Mittelachse (Bild 4a) wird korrekt reproduziert. Auch der Wellendurchgang an verschiedenen Messstellen sowie die Eintreffzeit der Wellenfront (Bild 4b) werden gut wiedergegeben. Zur Kontrolle der numerischen Fehlereinflüsse sind jeweils mindestens zwei Simulationsläufe auf unterschiedlich feinen Berechnungsnetzen durchgeführt worden.

Die Nachrechnung der hydraulischen Modellversuche von Chervet und Dallèves (1970) im geneigten Kanal zeigt, dass das Modell auch den Einfluss von Sohlengefälle und Reibung korrekt zu reproduzieren vermag. Das 2-D-Modell vermag somit die Abflusshöhen und die Eintreffzeit einer Dammbruchwelle gut zu reproduzieren. Die Nachrechnung der Versuche von Braschi et al. (1994) sowie Toro und Fracarollo (1995) weisen darauf hin, dass bei schmalen Breschen (B / H < 1) die Druckverteilung im Breschennahbereich nicht hydrostatisch ist, was im numerischen Modell zu einer Unterschätzung der effektiven Abflusshöhen in diesem Bereich führt. Das Modell ermöglicht jedoch insgesamt eine sachlich korrekte Bestimmung der Abflussintensitäten im vorgesehenen Anwendungsbereich.

Skalierungen

Zahlreiche Simulationen sind durchgeführt worden, um die Beziehung zwischen Strömungsvariablen und freien Parametern zu bestimmen. Dabei zeigte sich:

- Das Gefälle S hat auf alle Variablen einen grossen Einfluss.
- Das Verhältnis Breschenbreite zu Stauhöhe übt einen grossen Einfluss auf den spezifischen Abfluss aus.
- Die Reibungsverluste beeinflussen die Fliessgeschwindigkeit. Der Einfluss ist grösser für kleine Gefälle.
- Das Volumen des Speichers beeinflusst q und v. Der Einfluss ist grösser für kleine Gefälle.

Auswertung der Dimensionsmatrix in Anlehnung an Hughes (1993) und die Bestimmung der verbleibenden Exponenten mittels Simulationsrechnung führten auf folgende Bestimmungsgleichung für den spezifischen Abfluss entlang der Strahlachse:

$$q = \sqrt{gH^3}\, f\left(\frac{B}{H}; \frac{Vol}{BH^2}; \frac{D}{H}; S; \frac{x}{\sqrt{BH}}\right) \qquad (5)$$

Für die Fliessgeschwindigkeit erhält man analog:

$$v = \sqrt{gH}\, f\left(\frac{B}{H}; \frac{Vol}{BH^2}; \frac{D}{H}; S; \frac{x}{\sqrt{BH}}\right) \qquad (6)$$

Die verschiedenen Parameter werden nun einzeln analysiert.

Breschendistanz

Die Skalierung der Distanz von der Bresche führt auf die Längenskala

$$L = \sqrt{BH} \qquad (7)$$

und somit auf die dimensionslose Distanz

$$X = \frac{x}{L} \qquad (8)$$

Die Stauhöhe und die Breschenbreite wirken somit gleichermassen auf die Abflussausbreitung ein. Wie Bild 5 illustriert, lässt sich mit dieser Skalierung die Lage des Wassersprunges, der sich bei einem Abfluss in eine Ebene ausbildet, für beliebige Parameter bestim-

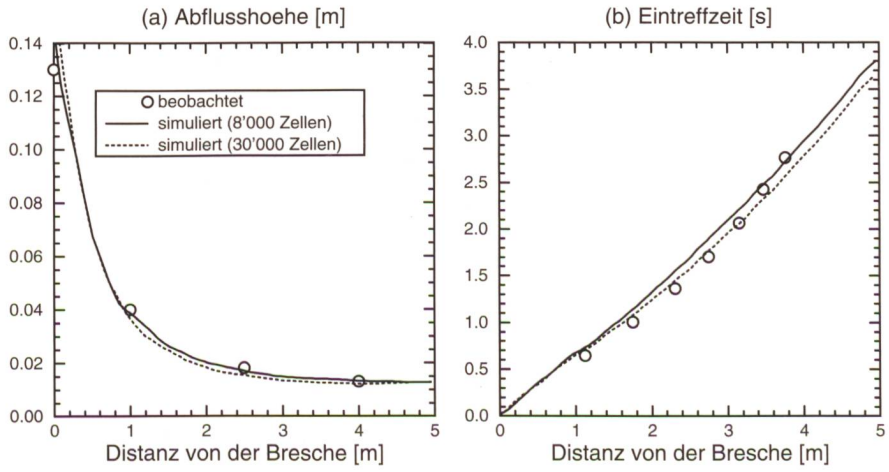

Bild 4. Beobachtete und berechnete Abflusshöhen (a) und Eintreffzeiten (b) für die Versuchsanlage von Broich et al. (1993).

men. Jede andere Skalierung liefert keine ähnlich gute Übereinstimmung.

Verhältnis Breschenbreite zu Stauhöhe

Das Verhältnis Breschenbreite B zu Stauhöhe H übt auf Grund der Einschnürung einen Einfluss auf die Strahlausbreitung aus. Für den spezifischen Abfluss erhält man auf Grund von Simulationsrechnungen die Abhängigkeit

$$q \propto \left(\frac{B}{H}\right)^{0,5} \qquad (9)$$

Der Einfluss auf die Fliessgeschwindigkeit ist weit geringer und kann im betrachteten Parameterraum vernachlässigt werden.

Sohlenrauigkeit

Die Fliessgeschwindigkeit ist bei kleiner Rauigkeit erwartungsgemäss höher als bei grosser Rauigkeit. Der Einfluss ist dabei geringer für den Breschennahbereich (X < 6), da hier die Druckgradienten die Strömungsverhältnisse weitgehend dominieren. Ein geeigneter Ansatz für die Fliessgeschwindigkeit lautet

$$v \propto \left(\frac{D}{H}\right)^{-n} \quad \text{mit } n = \begin{cases} 1/10 & \text{für } X < 6 \\ 1/4 & \text{für } X \geq 6 \end{cases} \qquad (10)$$

Der Einfluss der Sohlenreibung auf den spezifischen Abfluss ist relativ gering. Für den Breschennahbereich ist sogar überhaupt kein Einfluss festzustellen. Eine geeigneter Ansatz für den spezifischen Abfluss lautet

$$q \propto \left(\frac{D}{H}\right)^{-n} \quad \text{mit } n = \begin{cases} 0 & \text{für } X < 6 \\ 1/10 & \text{für } X \geq 6 \end{cases} \qquad (11)$$

Speichervolumen

Im Verfahren CTGREF zur Abschätzung der eindimensionalen Flutwellenausbreitung wird die Grösse des Speichers direkt zur Skalierung der geometrischen Länge verwendet, d.h. $X = x / Vol^{1/3}$ (CTGREF 1978). Die Verhältnisse im zweidimensionalen Fall sind komplizierter, da die Strömungsgrössen auch für den (hypothetischen) Fall eines unendlich grossen Speichers abnehmen. Zudem wächst der Einfluss des Speichervolumens mit zunehmender Entfernung von der Bresche an.

Neben der dimensionslosen Speichergrösse $Vol_o = Vol / (BH^2)$ werden zur Beschreibung des Einflusses der Speichergrösse zwei Hilfsgrössen definiert:

Vol_{max} = dimensionslose Grösse eines Speichers, welcher im Untersuchungsperimeter zu keiner relevanten Reduktion der Abflussintensitäten führt

X_{min} = dimensionsloser Abstand von der Bresche, wo ein Speichervolumen kleiner als Vol_{max} zu einer Reduktion der Abflussintensitäten führt

Der Einfluss der Speichergrösse wird durch eine Anpassung der Längenskala berücksichtigt (ähnlich dem Verfahren CTGREF). Die modifizierte Längenskala lautet

$$L' = L\left(\frac{Vol_{max}}{\min(Vol_o, Vol_{max})}\right)^{-\left(\frac{X - X_{min}}{X_{min}}\right)^n} \qquad (12)$$

mit X = dimensionslose Distanz für den unendlich grossen Speicher und der Minimumfunktion

$$\min(a,b) = \begin{cases} a & \text{für } a < b \\ b & \text{für } a > b \end{cases} \qquad (13)$$

Die beste Anpassung an die Simulationsresultate ist mit folgenden Werten erzielt worden:

- $Vol_{max} = 4000$
- $X_{min} = k\, Vol_o^{1/3}$
- n = 1/5 für die Skalierung des spezifischen Abflusses
- n = 1/7 für die Skalierung der Fliessgeschwindigkeit

Der Multiplikationsfaktor k zur Ermittlung von X_{min} hängt vom Sohlengefälle ab und ist in Tabelle 2 aufgeführt. Für Gefälle, welche nicht tabelliert sind, kann linear interpoliert werden.

Die Skalierung mit dem Speichervolumen kommt einer geometrischen Stauchung resp. einer Erhöhung der dimensionslosen Distanz gegenüber dem Fall mit unendlich grossem Speicher gleich. Der Unterschied zum Verfahren CTGREF besteht darin, dass die Skalierung auch für einen (hypothetisch) unendlich grossen Speicher gültig ist und der zunehmende Einfluss der Speichergrösse mit wachsendem Abstand von der Bresche berücksichtigt ist.

Diagramm A

Der funktionale Zusammenhang zwischen

Gefälle	0,25%	2%	4%	8%	16%
Koeffizient für spez. Abfluss	2,5	2,5	3,0	4,0	5,0
Koeffizient für Fliessgeschwindigkeit	3,0	3,0	3,0	4,0	5,0

Tabelle 2. Multiplikationsfaktoren k zur Ermittlung der Distanz X_{min}.

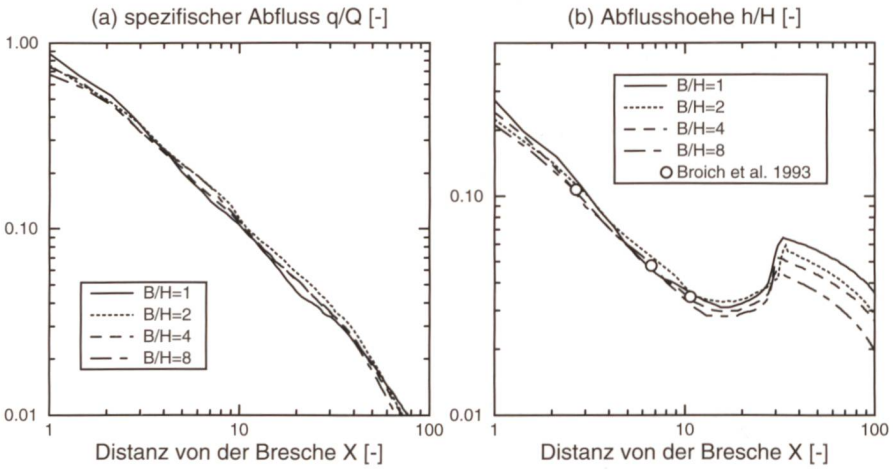

Bild 5. Breschenabfluss auf glatter, ebener Sohle: (a) spezifischer Abfluss und (b) Abflusshöhe für variable Verhältnisse von Breschenbreite B zu Stauhöhe H. Beobachtungen von Broich et al. (1993).

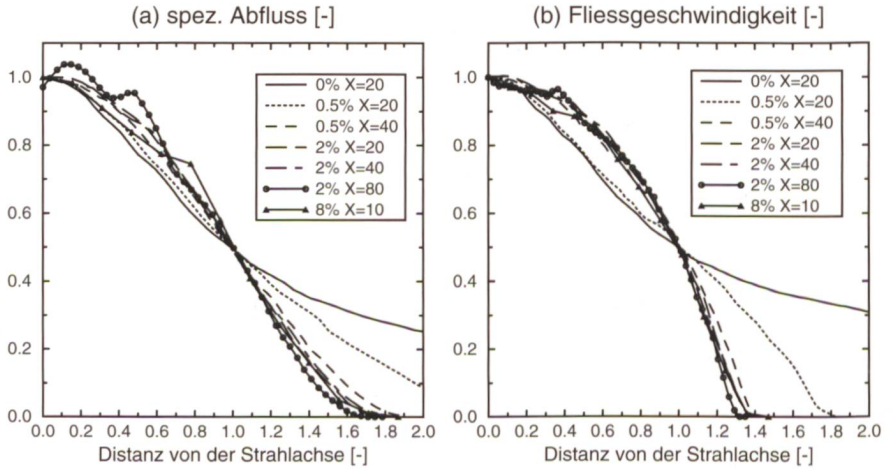

Bild 6. Querprofil der Abflussintensitäten für verschiedene Sohlengefälle und Abstände von der Bresche.

den freien Parametern und den Strömungsvariablen entlang der Strahlachse ist mittels Simulationsrechnungen bestimmt worden und in Diagramm A dargestellt. Dabei sind mittlere Werte für die charakteristischen Grössen gewählt worden (Tabelle 3).

Charakteristische Grösse	Wert
B/H	2
D/H	0,033
Vol/(BH²)	20 000

Tabelle 3. Dimensionen des Modelles, welches zur Erstellung der Diagramme verwendet wurde.

Die verwendeten Skalierungen bei der Erstellung der Diagramme lauten:

- für den spezifischen Abfluss:

$$Q = 0{,}32\sqrt{gB}\,H\left(\frac{H}{30D}\right)^n \qquad (14)$$

- für die Fliessgeschwindigkeit:

$$V = \sqrt{gH}\left(\frac{H}{30D}\right)^n \qquad (15)$$

Dabei sind die Beziehungen (5) bis (11) beachtet worden. Für SI-Einheiten gilt in Gleichung (14) für den spezifischen Abfluss $0{,}32\sqrt{g} = 1{,}0$, was die Handrechnung vereinfacht.

Laterale Ausbreitung des Abflussstrahles

Mit den bisher vorgestellten Angaben und dem Diagramm A können die Abflussintensitäten entlang der Strahlachse berechnet werden. Es interessiert nun, wie gross die laterale Ausbreitung des Abflussstrahles ist und wie sich die Abflussintensitäten entlang der y-Achse vom Maximalwert in Strahlmitte unterscheiden. In Bild 6 sind die Strömungsvariablen für verschiedene Gefälle und Abstände von der Bresche im Querprofil dargestellt. Die Abszisse ist dabei mit der Halbbreite skaliert worden. Dieser Wert entspricht der Distanz von der Strahlachse, in welcher die Strömungsvariable auf die Hälfte des Maximalwertes abgenommen hat. Die Ordinate ist mit dem Maximalwert auf der Strahlachse skaliert. Alle Kurven treffen sich deshalb in den Punkten (0; 1) und (1; 0,5).

Die Abbildung zeigt die recht gute Deckung der verschiedenen Kurven. Die Übereinstimmung ist umso besser, je grösser das Gefälle und die Distanz von der Bresche sind. Für kleine Gefälle und Distanzen von der Bresche ist die Strahlausbreitung primär radial. Die Abnahme der Strömungsvariablen in den Querprofilen erfolgt deshalb weniger rasch.

Die Abnahme der Abflussintensitäten quer zur Strahlachse folgt einem charakteristischen Verlauf. Die Intensitätswerte lassen sich somit bestimmen, wenn der Wert auf der Strahlachse und die Abminderung in Funktion der Entfernung von der Strahlachse bekannt sind.

Für diesen Zweck sind die Diagramme zur Bestimmung der lateralen Ausbreitung (Diagramm B) und der charakteristischen Querprofile für den spezifischen Abfluss und die Fliessgeschwindigkeit (Diagramm C) entwickelt worden.

Der Einfluss eines endlichen Speichervolumens auf die laterale Ausbreitung wird durch die geometrische Skalierung in analoger Weise wie bei der Distanz von der Bresche berücksichtigt. Massgebend ist dabei die Skalierung für den spezifischen Abfluss.

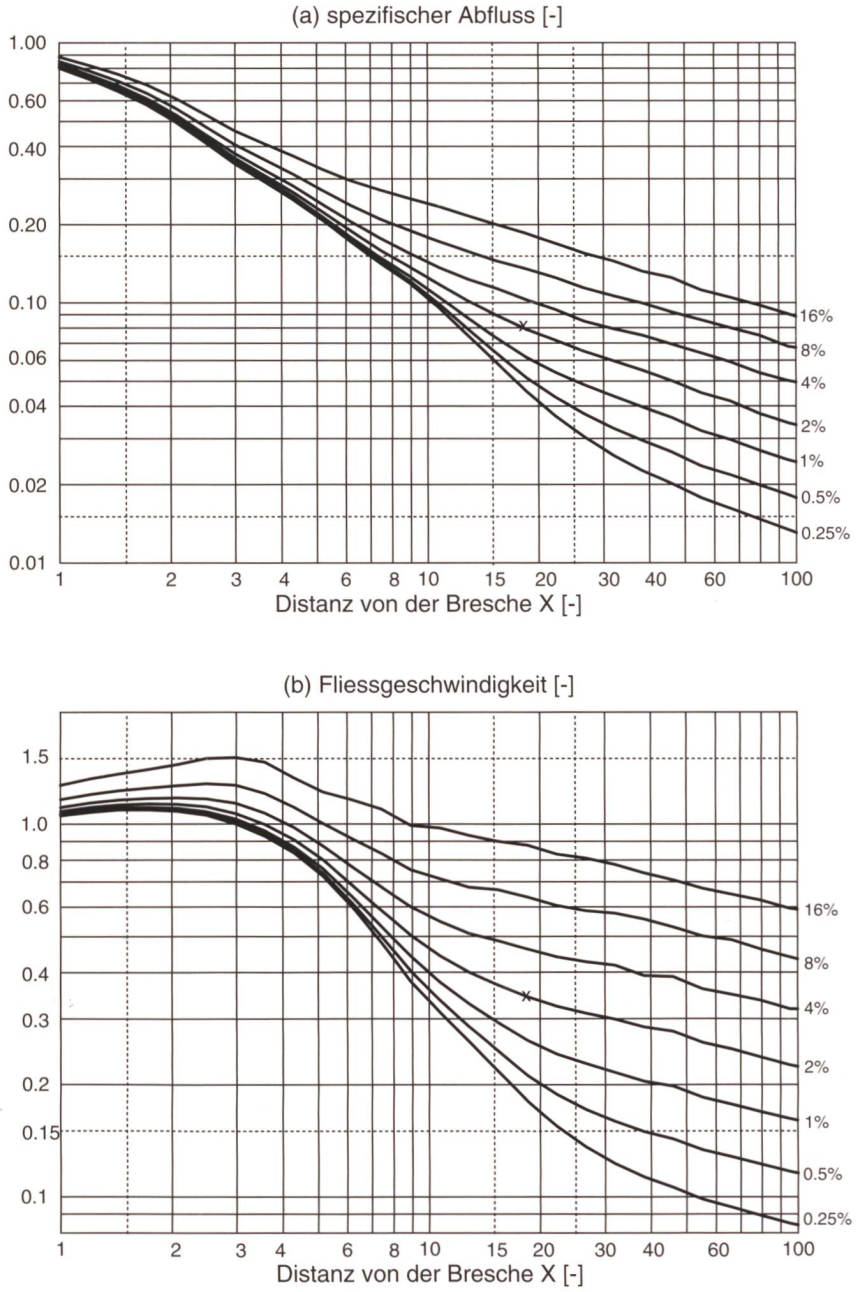

Diagramm A. Längenprofil entlang der Strahlachse für spezifischen Abfluss (a) und Fliessgeschwindigkeit (b).

Anwendung des Verfahrens

Das Verfahren bietet grundsätzlich zwei Einsatzmöglichkeiten:

1) Intensitätssuche: Bestimmen der Intensitäten für einen vorgegebenen Standort.
2) Standortsuche: Bestimmen des Abstandes von der Bresche, ab welchem die Intensitäten einen vorgegebenen Wert unterschreiten.

Liegen die gegebenen oder gesuchten Standorte auf der Strahlachse, so wird für die Suche das Diagramm A verwendet. Für Standorte fern der Strahlachse sind auch die Diagramme B und C einzusetzen. Ein iteratives Vorgehen wird dann nötig, wenn die Standortsuche fern der Strahlachse erfolgt.

Die Anwendung des Parameterverfahrens wird nun anhand eines Beispieles

gezeigt. Die frei gewählten Parameter des Testbeispiels sind:

- Stauhöhe H = 4 m
- Breschenbreite B = 8 m
- Korndurchmesser D = 0,12 m
- Sohlengefälle S = 2%
- Speichervolumen Vol = 10 000 m^3

Gesucht sind die Abflussintensitäten in 100 m Entfernung von der Bresche und 30 m Entfernung von der Strahlachse. Die Anwendung des Parameterverfahrens erfolgt mit Vorteil in folgenden Schritten:

1) Bestimmen der Abflussintensitäten in Strahlmitte für den unendlich grossen Speicher
2) Berücksichtigung des Speichervolumens, falls $Vol_o < 4000$
3) Berücksichtigung der lateralen Ausbreitung

Abflussintensitäten in Strahlmitte für den unendlich grossen Speicher

Wir bestimmen zuerst die Längenskala der Problemstellung $L = \sqrt{BH} = \sqrt{8 \times 4} = 5{,}7$ m und erhalten so den dimensionslosen Breschenabstand für den gesuchten Standort zu X = 100 / 5,7 = 17,5. Die Skala des spezifischen Abflusses lautet

$$Q = 0{,}32\sqrt{gB}\,H\left(\frac{H}{30D}\right)^n = \sqrt{8} \times 4\left(\frac{4}{30 \times 0{,}12}\right)^{1/10} = 11{,}4\,m^2/s$$

Die Skala für die Fliessgeschwindigkeit lautet

$$V = \sqrt{gH}\left(\frac{H}{30D}\right)^n = \sqrt{9{,}81 \times 4}\left(\frac{4}{30x0{,}12}\right)^{1/4} = 6{,}4\,m/s$$

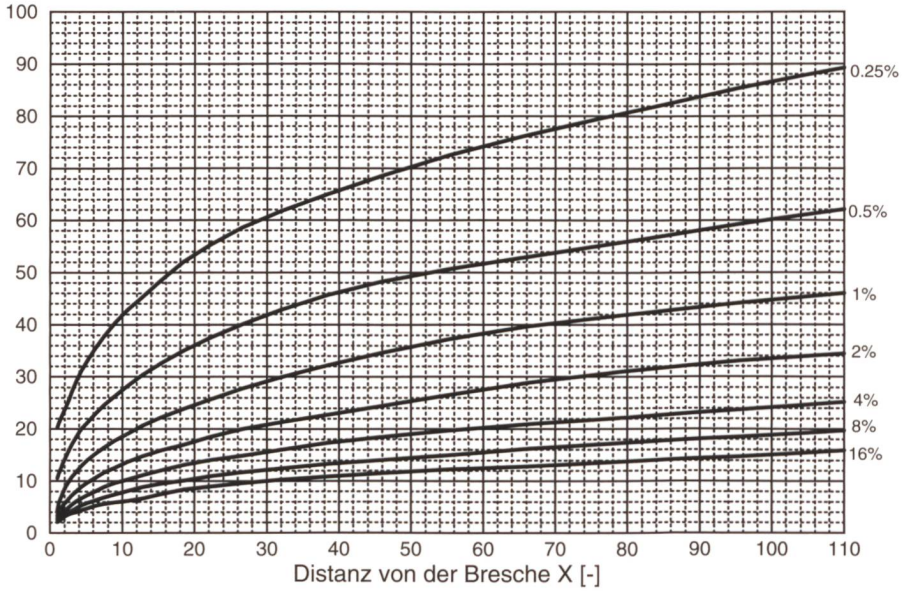

Diagramm B. Laterale Ausbreitung des Abflussstrahles für verschiedene Sohlengefälle.

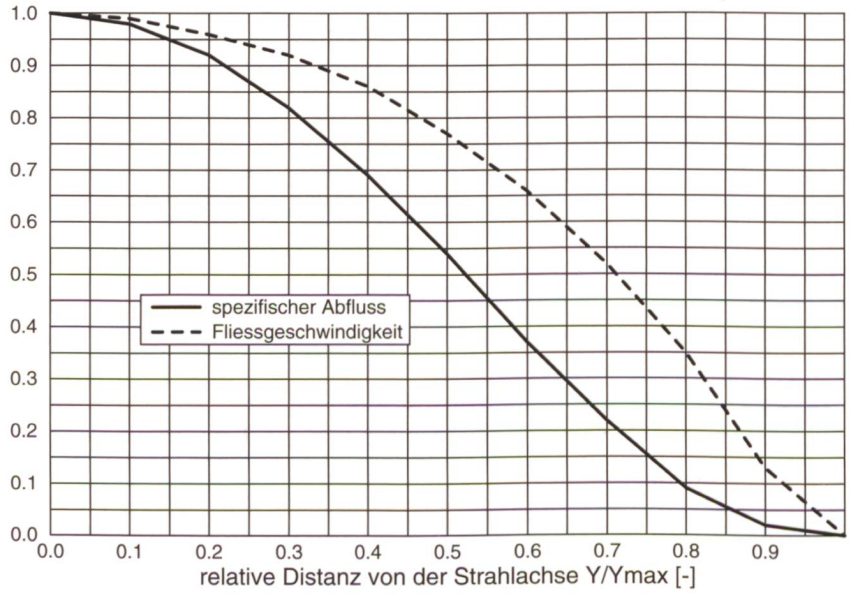

Diagramm C. Charakteristische Querprofile der Abflussintensitäten.

Aus Diagramm A entnehmen wir den Wert für den dimensionslosen spezifischen Abfluss q/Q (X=17,5; S=2%) = 0,08 und erhalten für den spezifischen Abfluss an der gesuchten Stelle den Wert $q = 0{,}08 \times 11{,}4 = 0{,}90\ m^2/s$.

Auf gleiche Art und Weise bestimmen wir in Diagramm A den Wert für die dimensionslose Fliessgeschwindigkeit v/V (X=17,5; S=2%) = 0,35 und erhalten für die Fliessgeschwindigkeit an der gesuchten Stelle den Wert $v = 0{,}35 \times 6{,}4 = 2{,}25$ m/s.

Aus den bekannten Strömungsvariablen lassen sich nun leicht die Abflusshöhe h = 0,9 / 2,25 = 0,40 m und die Energiehöhe $h_e = 0{,}40 + 2{,}25^2 / 19{,}6 = 0{,}66$ m bestimmen.

Berücksichtigung der Speichergrösse

Um den Einfluss der Speichergrösse auf die Abflussintensitäten zu bestimmen, berechnen wir zuerst das dimensionslose Speichervolumen

$$Vol_0 = \left(\frac{10'000}{8x4^2}\right) = 78$$

Mit dem Koeffizienten k = 2,5 aus Tabelle 2 erhalten wir für die Hilfsgrösse $X_{min} = 2{,}5 \times 78^{1/3} = 10{,}7$. Die Längenskala für den spezifischen Abfluss lautet somit

$$L = 5{,}7\left(\frac{4000}{78}\right)^{\left(\frac{17{,}5 - 10{,}7}{10{,}7}\right)\frac{1}{5}} = 3{,}45\,m$$

Daraus ergibt sich der dimensionslose Abstand von der Bresche zu X = 100 / 3,45 = 29. Für den dimensionslosen spezifischen Abfluss findet man in Diagramm A den Wert q / Q (X=29; S=2%) = 0,062 und daraus die gesuchte Grösse $q = 0{,}062 \times 11{,}4 = 0{,}70\ m^2/s$.

Für die Fliessgeschwindigkeit erhält man für die Hilfsgrösse den Wert $X_{min} = 3{,}0 \times 78^{1/3} = 12{,}8$ (mit k = 3,0 aus Tabelle 2). Die modifizierte Längenskala wird somit zu

$$L = 5{,}7\left(\frac{4000}{78}\right)^{\left(\frac{17{,}5 - 12{,}8}{12{,}8}\right)\frac{1}{7}} = 4{,}65\,m$$

Der dimensionslose Abstand von der Bresche beträgt folglich X = 100 / 4,65 = 22. In Diagramm A findet man für die dimensionslose Fliessgeschwindigkeit v/V (X=22; S=2%) = 0,33 und schliesslich für den gesuchten Wert $v = 0{,}33 \times 6{,}4 = 2{,}1$ m/s.

Aus den nun bekannten Grössen erhält man für die Abflusshöhe den Wert h = 0,70 / 2,1 = 0,35 m und für die Energiehöhe $h_e = 0{,}35 + 2{,}1^2 / 19{,}6 = 0{,}60$ m.

Berücksichtigung der lateralen Ausbreitung

Bei der Berechnung von Werten fern der Strahlachse kommen die Diagramme B und C zum Einsatz. Dazu berechnen wir die dimensionslose Distanz von der Strahlachse zu Y = 30 / 3,45 = 8,7, wobei die Längenskala für den spezifischen Abfluss verwendet wird.

Dem Diagramm B entnehmen wir die dimensionslose laterale Ausbreitung des Ab-

flussstrahles und erhalten Y_{max} (X=29; S=2%) = 20,5. Daraus berechnen wir die relative Distanz des gesuchten Standortes zu Y_{rel} = 8,7 / 20,5 = 0,42. Aus Diagramm C erhalten wir für die Querprofilwerte $c_q(Y_{rel} = 0{,}42) = 0{,}66$ resp. $c_v(Y_{rel} = 0{,}42) = 0{,}84$ und daraus für den spezifischen Abfluss q = 0,70 × 0,66 = 0,46 m^2/s und für die Fliessgeschwindigkeit: v = 2,1 × 0,84 = 1,76 m/s.

Aus den nun bekannten Werten gilt für die Abflusshöhe h =0,46 / 1,76 = 0,26 m und für die Energiehöhe $h_e = 0{,}26 + 1{,}76^2 / 19{,}6 = 0{,}42$ m.

Programmierung des Verfahrens

Die Ausführungen zeigen, dass die Anwendung des Verfahrens unter Zuhilfenahme eines Taschenrechners keine besonderen Schwierigkeiten bietet. Die Berücksichtigung des Speichervolumens erfordert allerdings relativ viele Zwischenschritte, wodurch sich leicht Fehler einschleichen können. Aufwendig wird das Verfahren, wenn für die Standortsuche ein iteratives Vorgehen nötig wird.

Um die Anwendung zu erleichtern und Fehler möglichst auszuschliessen ist das Parameterverfahren deshalb auch als Computerprogramm realisiert worden (Programm BRESCHE zu beziehen unter http://www.fluvial.ch/download.html/). Die empfohlene Durchführung von mehreren Berechnungsgängen mit veränderten Eingabeparametern im Sinne einer Sensitivitätsanalyse wird damit ohne grossen Aufwand möglich. Auch die Standortsuche wird durch ein Computerprogramm wesentlich erleichtert.

Genauigkeit des Verfahrens

Innere Genauigkeit

Die innere Genauigkeit des Verfahrens hängt von der Güte der Skalierung ab. Um diese beurteilen zu können, sind Testrechnungen für verschiedene Parameterkombinationen ausgeführt worden, welche den gesamten Parameterraum umfassen. Die Stauhöhe wurde dabei konstant zu H = 1 m gewählt, um einen möglichst objektiven Vergleich zu ermöglichen. Für die verschiedenen Parameterkombinationen sind die Abflussintensitäten an jeweils vier Standorten ermittelt worden, wovon je zwei Standorte auf bzw. neben der Strahlachse liegen. Ein Vergleich der mittels Simulationsrechnung und Parameterverfahren erhaltenen Abflussintensitäten ist in Bild 7 dargestellt. Die Vergleichsrechnungen zeigen: Mit der gewählten Skalierung wird innerhalb des Anwendungsbereiches eine gute Genauigkeit erreicht. Die mittlere Abweichung zwischen den simulierten und mittels Parameterverfahren bestimmten Intensitätswerten liegt bei ± 25%.

Grundsätzlich gilt, dass die Genauigkeit umso höher ist, je näher die charakteristischen Grössen mit den Werten übereinstimmen, welche für die Erstellung der Diagramme A, B und C verwendet worden sind (Tabelle 3). Da bei den Testrechnungen die Grenzen des Verfahrens getestet wurden, stellt der oben genannte mittlere Fehler einen oberen Grenzwert dar. Für die praktische Anwendung kann von mittleren Fehlern in der Grössenordnung von ± 20% ausgegangen werden.

Externe Fehlereinflüsse

Die bei der konkreten Anwendung herrschenden Verhältnisse können mehr oder weniger von den Annahmen des Verfahrens abweichen. Bei den externen Fehlereinflüssen sind zu nennen:

- variable Längsgefälle der Überflutungsfläche
- variable Sohlenrauigkeiten
- Quergefälle der Überflutungsfläche
- lokale Hindernisse in der Überflutungsfläche

Wie stark sich diese Einflüsse auf die Grösse der Abflussintensitäten auswirken, lässt sich nur im Einzelfall beurteilen. Die Erfahrung zeigt: Der spezifische Abfluss wird durch lokale, räumlich limitierte Veränderungen nur wenig beeinflusst. Fliessgeschwindigkeit und Abflusshöhe reagieren empfindlicher.

Grenzen des Verfahrens

Das Parameterverfahren stellt unter folgenden Bedingungen eine zuverlässige Methode dar:

- Eine sachlich korrekte Schätzung der freien Parameter ist möglich.
- Es herrschen mittlere bis grosse Sohlengefälle (ab ca. 0,5%).
- Quergefälle und Variationen im Längsgefälle sind gering.

Bei kleinem Gefälle ist die Wellenausbreitung in Breschennähe primär radial, was die laterale Verteilung der Intensitäten beeinflusst. Die Anwendung des Verfahrens ist jedoch auch für Gefälle < 0,5% zulässig, sofern die Werte entlang der Strahlachse verwendet werden oder die Distanz von der Bresche genügend gross ist (X > 20).

Wie weit die verschiedenen Fehlereinflüsse die Aussagekraft der Ergebnisse beeinträchtigen hängt auch von der Fragestellung ab. Weist die Sensitivitätsanalyse darauf hin, dass die Resultate nicht in der geforderten Genauigkeit bestimmt werden können, so ist der Einsatz eines Simulationsmodelles zu prüfen.

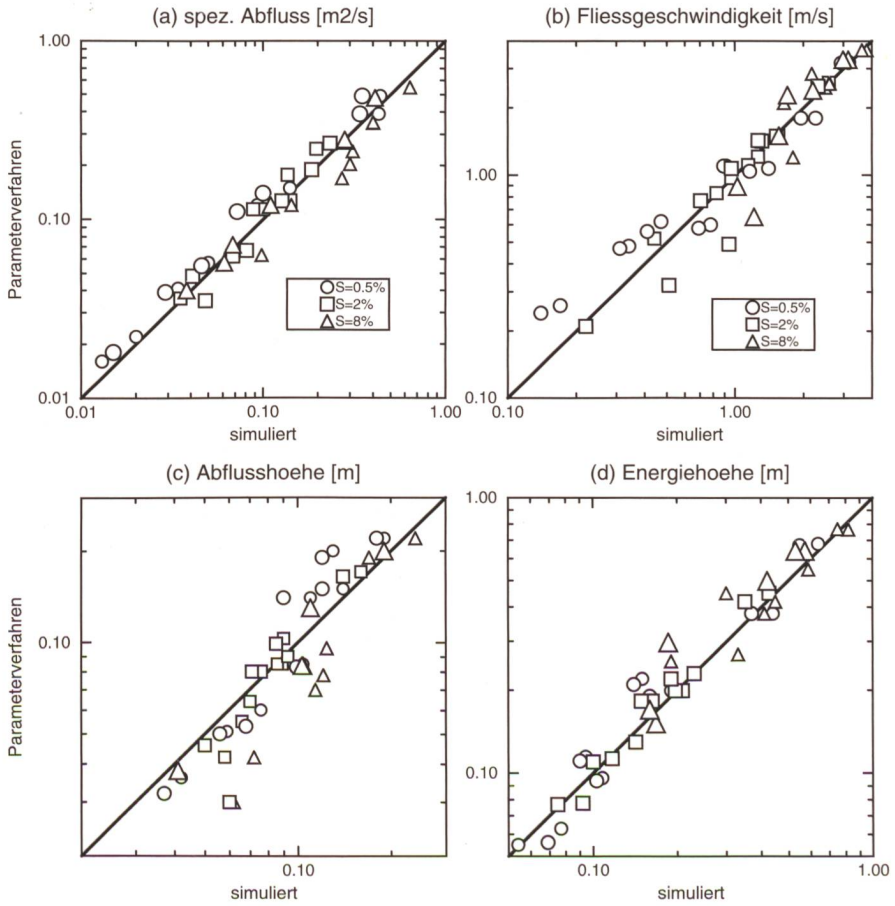

Bild 7. Vergleich von simulierten Abflussintensitäten mit den Ergebnissen aus dem vereinfachten Verfahren.

Bild 8. Dammbresche an einem kleinen Weiher im Jura.

Literatur

Bechteler W., Kulisch H., Nujic M. (1992): «2-D Dam Break Flood Waves – Comparison between Experimental and Calculated Results». 3rd Int. Conf. on Flood and Flood Management, Florence.

Beffa C. (1994): «Praktische Lösung der tiefengemittelten Flachwassergleichungen». Mitteilung 133, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.

Braschi G., Dadone F., Gallati M. (1994): «Plain Flooding: Near Field and Far Field Simulations». Proc. Spec. Conference on Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas. Milan.

Broich K., Hartmann S., Kulisch H., Nujic M., Otto A. (1993): «Simulationsmodelle zur Berechnung von Dammbrüchen und 1- bzw. 2-dimensionaler Ausbreitung der Flutwelle im Gelände». Mitteilung 48/1993, Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München.

CTGREF (1978), Centre technique du génie rural des eaux et des forêts. «Appreciation globale des difficultés et des risques entrainés par la construction des barages». Note techique N° 5 (deutsche Übersetzung des franz. Originals von *R. Müller,* BWW, 1992).

Chervet A., Dallèves P. (1970): «Calcul de l'onde de submersion consécutive à la rupture d'un barrage». Schweizerische Bauzeitung, 88 (19), 420–432.

Fraccarollo L., Toro E. F. (1995): «Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems». J. Hyd. Res., 33/6.

Hervouet J.-M., Petitjean A. (1999): «Malpasset dam-break revisited with two-dimensional computations». J. Hyd. Res., 37/6.

Hughes S. A. (1993): «Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering». Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 7. World Scientific.

Liggett J. A. (1994): Fluid Mechanics. McGraw-Hill Inc., New York.

Müller R. W. (2001): «Abschätzung von Dammbruchflutwellen für kleinere Stauanlagen». wasser, energie, luft, 3/4-2001.

Paquier A., Robin O. (1997): CASTOR: Simplified Dam-Break Wave Model. J. Hydr. Engrg. ASCE, Vol. 123. No. 8.

Roe P. L. (1981): «Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes». J. Comp. Phys, 43, 357–372.

Stauanlagenverordnung (StAV 1998). Verordnung über die Sicherheit der Stauanlagen vom 7. Dezember 1998, SR 721.10.

Wesphal J. A., Thompson D. B. (1987): «NWS dambreak or NWS simplified dam breach». Proc. Comp. Hydrology 1987, 1st Int. Conf., Lighthouse Publications, Anaheim Calif.

Dank

Dem Bundesamt für Wasser und Geologie, Sektion Talsperren, für die Unterstützung, welche diese Studie ermöglicht hat. Herrn Rudolf W. Müller, dipl. Bauing. ETH, BWG Sektion Talsperren, für die kritische Durchsicht des Manuskripts. Herrn Marcel Roth, dipl. Kulturing. ETH, für die Literaturhinweise zur Dimensionsanalyse.

Adresse des Verfassers:

Dr. *Cornel Beffa,* Postfach 28, CH-6431 Schwyz, cornel@fluvial.ch