

## Sicherheit der Stauanlagen

### Basisdokument zu den Unterstellungskriterien

Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, série Eaux -  
Rapporti dell'UFAG, serie Acqua  
Biel, 2002

**Version 1.0 (Juni 2002)**



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**  
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**  
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**  
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**  
Federal Office for Water and Geology **FOWG**



## MITGLIEDER DER ARBEITSGRUPPE

Bischof, Roland	Ingenieurbüro für bauliche Anlagen der Stadt Zürich (IBA), Zürich
Hauenstein, Walter Dr.	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, Baden
Kalt, Leo	Baudepartement des Kantons St. Gallen, Fachstelle Talsperren- sicherheit, Tiefbau- und Strassenverwaltung, St. Gallen
Müller, Rudolf W. (Sekretär)	Bundesamt für Wasser und Geologie, Biel
Pougatsch, Henri (Präsident)	Office fédéral des eaux et de la géologie, Bienne
Raboud, Pierre-Benoît Dr.	Département de la santé, des affaires sociales et de l'énergie, Service des forces hydrauliques, DSSE – SFH, Sion
Vetterli, Willy	Baudirektion Kanton Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Zürich



## **INHALTSVERZEICHNIS**

	<b>Seite</b>
<b>EINLEITUNG</b>	4
<b>1. IDENTIFIZIERUNG VON STAUANLAGEN</b>	6
1.1 Definition der Stauanlage	6
1.2 Die massgebende Höhe für die Unterstellung (Stauhöhe)	8
1.3 Das massgebende Stauvolumen für die Unterstellung	14
1.4 Spezialfall: verstopfungsanfällige Hochwasserentlastung	15
<b>2. BEGRIFF DER BESONDEREN GEFAHR</b>	15
2.1 Allgemeine Definition der besonderen Gefahr	15
2.2 Arten von betroffenen Bauten und Örtlichkeiten	16
2.3 Untersuchung der Auswirkungen des Bruchs einer Stauanlage	16
2.4 Schwellenwerte für das Mass der besonderen Gefahr	20
2.5 In Kaskaden angeordnete Stauanlagen	21
2.6 Situationen ohne besondere Gefahr	21
<b>3. AUSWAHL DER ZU UNTERSTELLENDEN STAUANLAGEN</b>	22
3.1 Entscheidende Stelle für die Unterstellung	22
3.2 Vorgehen beim Entscheid über eine Unterstellung	22
3.3 Aufhebung der Unterstellung	22
<b>4. LITERATUR</b>	25
<b>5. ANHANG</b>	25



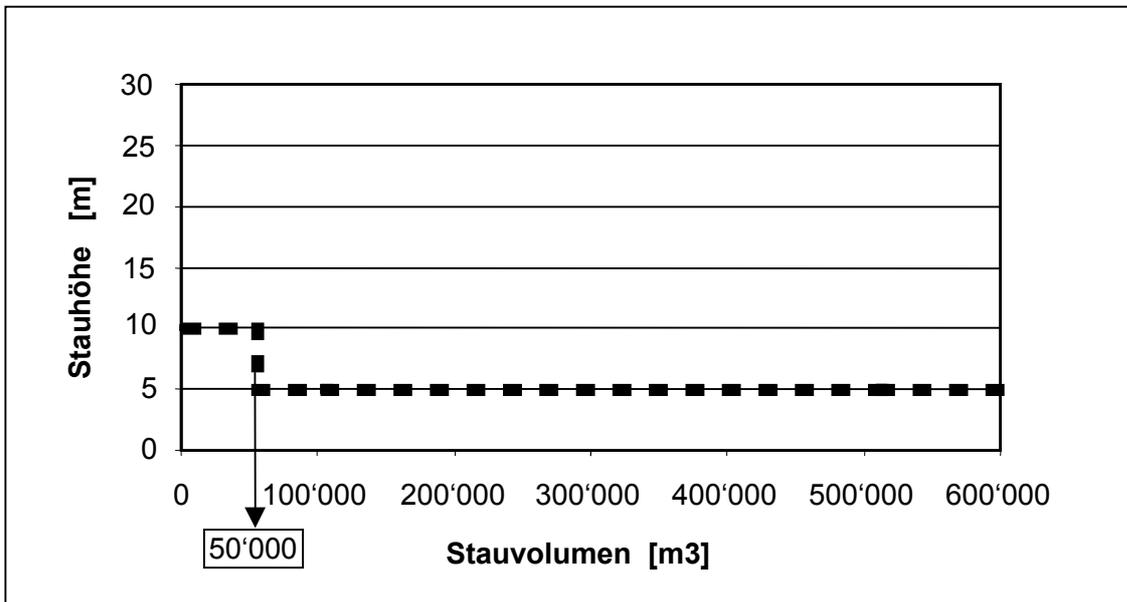
## BASISDOKUMENT KRITERIEN FÜR DIE UNTERSTELLUNG VON STAUANLAGEN UNTER DIE STAUANLAGENVERORDNUNG (StAV)

### EINLEITUNG

#### Gesetzliche Grundlagen

Die gesetzlichen Grundlagen betreffend die Sicherheit der Stauanlagen bilden der Artikel 3<sup>bis</sup> des Bundesgesetzes vom 22. Juni 1877 über die Wasserbaupolizei (SR 721.10) sowie die Verordnung über die Sicherheit der Stauanlagen vom 7. Dezember 1998 (StAV) (SR 721.102).

Der Gültigkeitsbereich der Stauanlagenverordnung (StAV) ist in ihrem Artikel 1 festgelegt. Danach gilt die Verordnung automatisch für Stauanlagen deren Stauhöhe über Niederwasser oder dem natürlichen Terrain mindestens 10 m beträgt, oder bei wenigstens 5 m Stauhöhe und gleichzeitig mehr als 50'000 m<sup>3</sup> Stauraum (Figur 1). Sie gilt aber auch für Stauanlagen mit geringeren Abmessungen, sofern sie eine besondere Gefahr für Personen und Sachen bedeuten. Hingegen kommt sie nicht zur Anwendung, wenn nachgewiesen wird, dass die Stauanlage keine besondere Gefahr für Personen und Sachen bedeutet. Die Verordnung überträgt die Aufsicht kleinerer Stauanlagen an die Kantone (Artikel 22 StAV).



Figur 1: Unterstellungskriterien unter eine staatliche Aufsicht gemäss Stauanlagenverordnung (StAV). Stauanlagen oberhalb der markierten Linie unterstehen aufgrund ihrer geometrischen Abmessungen den Bestimmungen der StAV, solche, die sich unterhalb dieser Linie befinden nur dann, wenn sie das Kriterium der besonderen Gefahr erfüllen.



## Ziel der Basisdokumentation zu den Unterstellungskriterien

Gemäss Artikel 26 der Stauanlagenverordnung kann das Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG) in Zusammenarbeit mit den kantonalen Aufsichtsbehörden, der Wissenschaft, der Fachorganisationen und der Wirtschaft Richtlinien zur Anwendung der Verordnung erlassen. Zur Festlegung der Entscheidungskriterien, welche die Unterstellung einer Stauanlage unter die Bestimmungen der Stauanlagenverordnung und damit unter die Aufsicht durch den Bund oder die Kantone begründen, wurde durch das BWG eine Arbeitsgruppe zusammengestellt. Diese hat den vorliegenden Bericht erarbeitet, welcher als Basisdokument für die Redaktion der Richtlinien diene. Das Basisdokument kann als erläuternde Ergänzung der Richtlinien verwendet werden.

Die Unterstellungskriterien gelten für alle Arten von Stauanlagen, welche in der Lage sind, vorübergehend oder dauernd Wasser oder Schlamm aufzustauen oder zu speichern (vgl. Artikel 2, Absatz 1 StAV). Dabei ist zu beachten, dass neben den geometrischen Kriterien (Stauhöhe, Stauraum) auch das Kriterium des Schadens, welcher als Folge eines Bruches der Stauanlage entstehen könnte, zur Anwendung gelangt. Die Folgen eines solchen Bruches werden ohne den Einbezug von Eintretenswahrscheinlichkeiten beurteilt.

Das vorliegende Dokument bezweckt

- die erforderlichen Grundbegriffe zu definieren;
- die nötigen Angaben zu liefern für die Bestimmung der Stauhöhe und des Stauraums hinsichtlich der Unterstellung unter eine Aufsicht (Artikel 1, Absatz 1 StAV) und der Aufgabenteilung zwischen Bund und Kantonen (Artikel 21, Absatz 2 StAV);
- den Begriff der besonderen Gefahr zu präzisieren;
- die Art anzugeben, wie die Auswirkungen eines Dammbrechens abgeschätzt werden können;
- die Entscheidungskriterien und Regeln für die Unterstellung unter die StAV zu präzisieren.

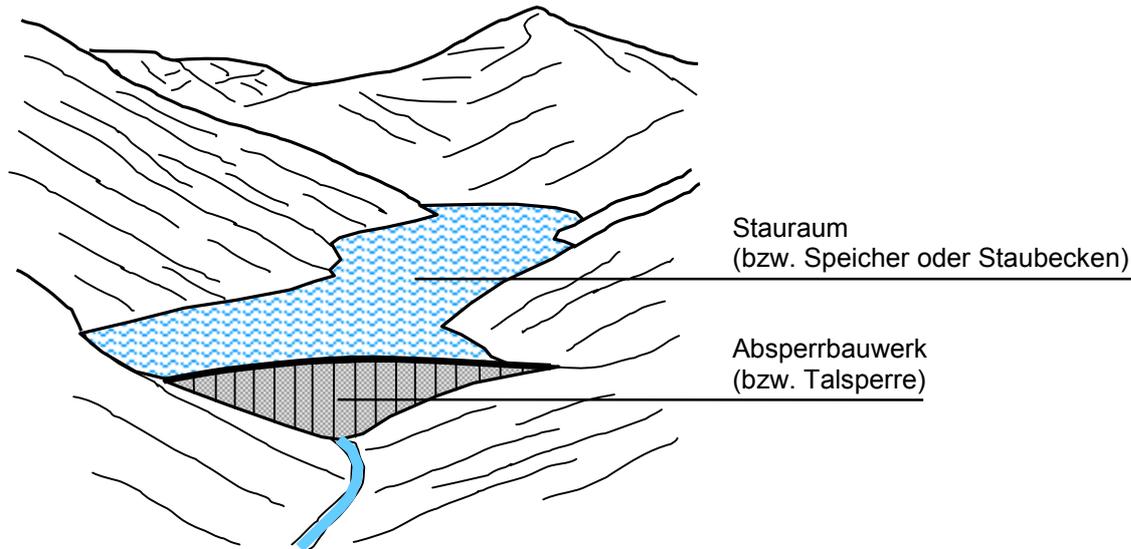
Im Zusammenhang mit der Arbeit an der Basisdokumentation wurde ein spezialisiertes Büro beauftragt, ein Berechnungsverfahren zu entwickeln, welches auf einfache Weise die Abschätzung der zweidimensionalen Ausbreitung einer Dammbrechflutwelle erlaubt. Dieses Verfahren beschränkt sich auf kleine Anlagen mit geringer Stauhöhe und dient als Hilfsmittel zur Feststellung, ob eine besondere Gefahr vorliegt. Eine Beschreibung und Anwendungsdiagramme werden im Anhang dieses Dokuments gegeben.

## 1. IDENTIFIZIERUNG VON STAUANLAGEN

### 1.1 Definition der Stauanlage

#### Anlagen, welche der Stauanlagenverordnung unterstellt werden

Eine Stauanlage besteht aus einem Absperrbauwerk (Talsperre) und dem dahinterliegenden Stauraum (bzw. Speicher oder Staubecken).



Figur 2: Schematische Darstellung einer Stauanlage

Gemäss Artikel 2, Absatz 1 der StAV sind Stauanlagen Einrichtungen zum Aufstau oder zur Speicherung von Wasser oder Schlamm. Unter Schlamm wird dabei eine Mischung von Wasser und Feinmaterial verstanden.

Der Hauptnutzungszweck von Stauanlagen zur Wasserspeicherung kann in der Energieerzeugung, Wasserversorgung, Bewässerung, künstlichen Beschneidung, Fischzucht, Löschreserve oder Seeregulierung bestehen. Stauanlagen können aber auch anderen Nutzungen dienen als Biotop, Relikt einer vergangenen Anlage oder zur Ausübung von Freizeitaktivitäten.

Stauanlagen können auch Nebennutzungen haben, wie z.B. die Schifffahrt, Fischerei, Baden etc. Die Talsperre kann auch als Träger einer Verkehrsverbindung dienen oder ein Leitungstrasse aufnehmen.

Eine besondere Art von Stauanlagen bilden die Schutzbauwerke, sofern sie Wasser, Geschiebe oder Schlamm vorübergehend oder dauernd aufstauen können. Es handelt sich dabei um Hochwasserrückhaltebecken, Lawinenauffangdämme, Sediment- und Geschiebesperren.

Eine Stauanlage kann auch mehrere solcher Nutzungen haben.

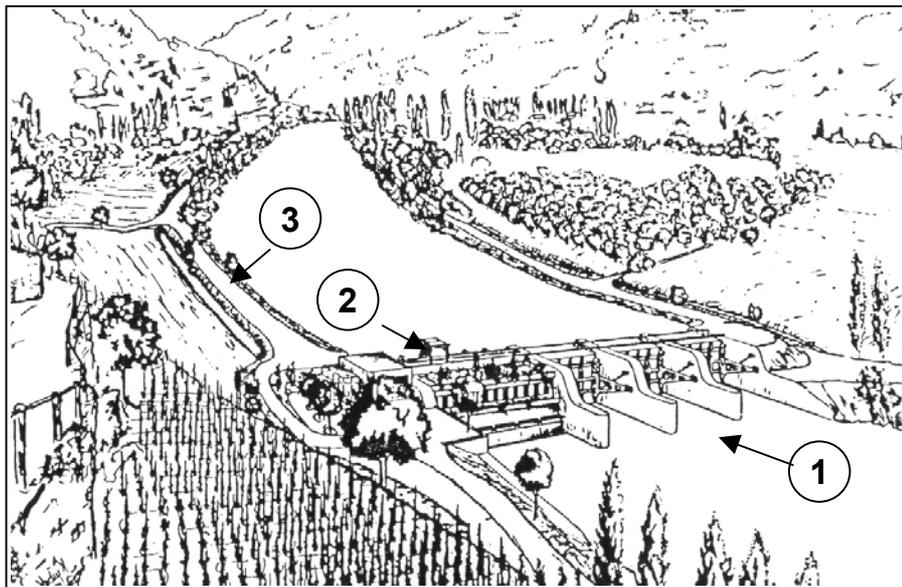
### Anlagen, welche nicht unter den Begriff der Stauanlagen fallen

Schwellen, welche der Stabilisierung von Wildbachgerinnen dienen, sowie Längsdämme, die zum Hochwasserschutz angeordnet sind, werden nicht als Stauanlagen betrachtet. Diese Bauwerke fallen in die Kompetenz der Kantone im Rahmen des Bundesgesetzes betreffend den Wasserbau.

Wasserreservoirs aus armiertem Beton und Schwimmbecken sind ebenfalls nicht als Stauanlagen anzusehen.

### Typen von Absperrbauwerken (Talsperren)

- Betonmauern (Gewichtsmauer, Bogenmauer, Pfeilermauer, Mehrfachbogenmauer)
- Schüttdämme (Erddamm, Steindamm)
- Wehre und ihre Seitendämme  
Seitendämme bilden integrierende Bestandteile einer Flusstauhaltung, die durch ein Wehr erzeugt wird. Die Seitendämme grenzen den unter Dauerstau stehenden Stauraum gegen das umliegende, tiefer liegende Gelände ab. Wehr und Seitendämme sind als zusammengehörendes Ganzes zu betrachten (Figur 3).



Figur 3: Schematische Darstellung eines Wehrs und seiner zugehörigen Anlagenteile.  
Legende: ① Wehrbereich, ② Zentrale, ③ Seitendamm.



## Standort von Stauanlagen

Es werden für den Standort von Stauanlagen folgende Fälle unterschieden:

- Anlagen im Fließgewässer (inklusive Wehre) – Anlagen im Hauptschluss
- Anlagen ausserhalb des Fließgewässers (künstliche Becken im natürlichen Terrain) – Anlagen im Nebenschluss
- Anlagen, die den Wasserspiegel eines natürlichen Sees anheben.

## Stauraum (bzw. Speicher, Staubecken)

Der Stauraum (bzw. der Speicher oder das Staubecken) ist ein künstlich angelegtes Becken, in welchem ein grosses Volumen von Wasser, Geschiebe oder Schlamm gespeichert werden kann. Im Stauraum können sich aber auch Eis und Schnee ansammeln.

Die Beckenbewirtschaftung kann zu Variationen des Wasserspiegels führen. Bezüglich der Unterstellungskriterien ist das Stauziel (normaler Betriebsspiegel) ein Hauptparameter.

Die Länge und die Oberfläche des Stauraums werden auf dem Niveau des Stauziels festgelegt. Der Endpunkt des Stauraums (an der Stauwurzel) befindet sich dort, wo der Hauptzufluss in das Staubecken eintritt. Bei Wehren endet der Stauraum dort, wo die Staukurve mit dem Niveau des  $Q_{347}$  im Zuflussgewässer zusammenfällt.

Das totale Stauvolumen bestimmt sich zwischen Gewässersohle (Beckenboden) und Stauzielniveau. Wie später gezeigt wird, entspricht das massgebende Volumen für die Unterstellung nicht zwingend dem Totalvolumen.

## 1.2 Die massgebende Höhe für die Unterstellung (Stauhöhe)

### Definition der massgebenden Höhe für die Unterstellung (Stauhöhe)

Die für die Unterstellung einer Stauanlage unter die Stauanlagenverordnung massgebende Höhe entspricht der Differenz zwischen dem Stauziel und einem unteren Referenzpunkt, der gemäss Artikel 1, Absatz 1, StAV, dem Niveau des Niederwassers oder der umliegenden Geländehöhe entspricht.<sup>1</sup>

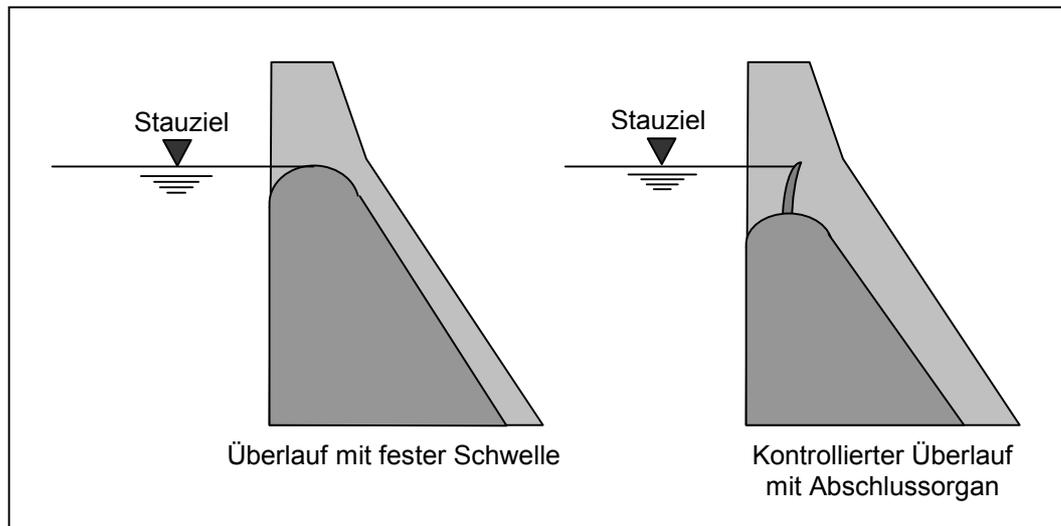
*Wichtiger Hinweis:*

*Die für die Unterstellung unter die Stauanlagenverordnung massgebende Höhe entspricht nicht der Höhe der Talsperre.*

<sup>1</sup> Diese Höhe lässt sich vergleichen mit der im Falle eines plötzlichen Bruches des Absperrbauwerkes bei Normalbetrieb austretenden Abflusshöhe.

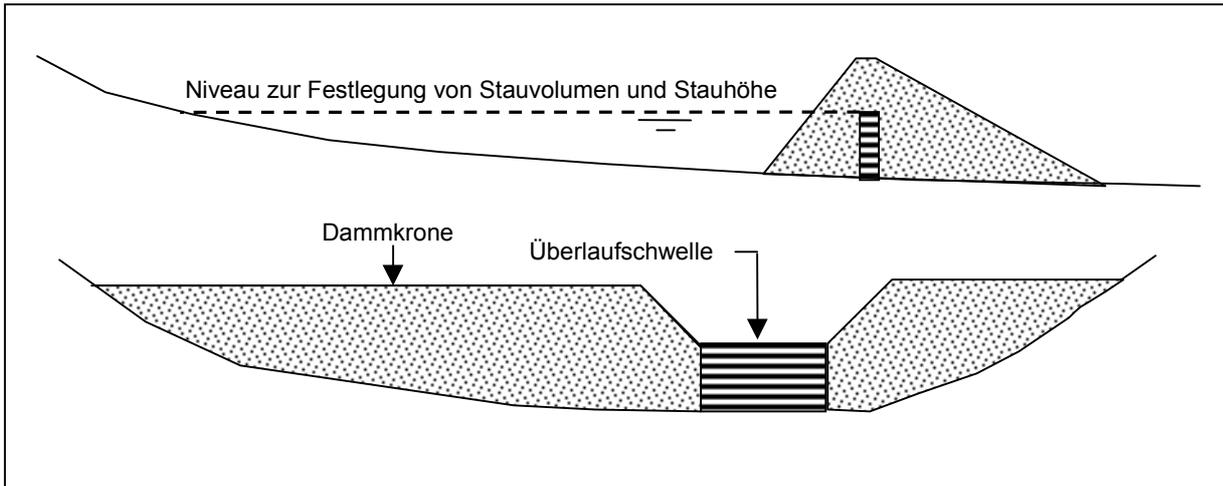
## Stauziel

Bei Stauanlagen mit Überlauf mit fester Schwelle liegt das Stauziel auf dem Niveau der Überfallkante. Bei Stauanlagen, bei denen die Entlastungswassermengen vollständig oder teilweise mit beweglichen Abschlussorganen abgeleitet werden, entspricht das Stauziel dem höchsten Wasserspiegel bei Normalbetrieb (Figur 4). Im Allgemeinen wird eine Wasserspiegelerhöhung infolge Hochwassers nicht berücksichtigt. Die Stauzielkote ist oft auch in der Konzession festgelegt.



Figur 4: Mögliche Lage des Stauziels.

Bei den Hochwasserrückhaltebecken entspricht das Stauziel dem Niveau der Schwelle der Hochwasserentlastung. Für Geschiebesperren und Geschiebesammler muss die obere Begrenzung der Materialablagerung bestimmt werden. Das Stauziel in diesen Fällen entspricht, je nach Sperrtyp (Betonmauern bzw. Schüttdämme mit oder ohne Durchlassöffnung über die ganze Sperrhöhe), dem Niveau der Überfallkante (bei einer Betonmauer mit oder ohne Dolen) oder der oberen Begrenzung einer Schlitzöffnung. Im Falle, wo dieser Schlitz mit Rechen oder Holzbalken ausgerüstet ist, wird aus Gründen der Verstopfungsmöglichkeit die obere Kante dieser Elemente als massgebend betrachtet (Figur 5). Dies gilt sinngemäss auch für Lawinenauffangdämme.



Figur 5: Lawinenauffangdamm mit oder ohne Vorkehrung zum Auffangen von Geschiebe (zum Beispiel in Form von Murgängen); oben: Längsschnitt durch den Stauraum mit Dammquerschnitt; unten: Längsschnitt durch den Auffangdamm mit Durchlassbauwerk und Überlaufschwelle.

### Definition des unteren Referenzpunktes

Unter der Geländehöhe wird das Niveau des natürlichen Terrains wasser- oder luftseitig des Absperrbauwerks verstanden. Diese Definition gilt sowohl für Speicher bzw. Staubecken als auch für Seitendämme von Flussstauhaltungen.

Als Niederwasserspiegel wird der Wasserspiegel beim  $Q_{347}$  angenommen. Diese Definition gilt für Wehre von Flussstauhaltungen.

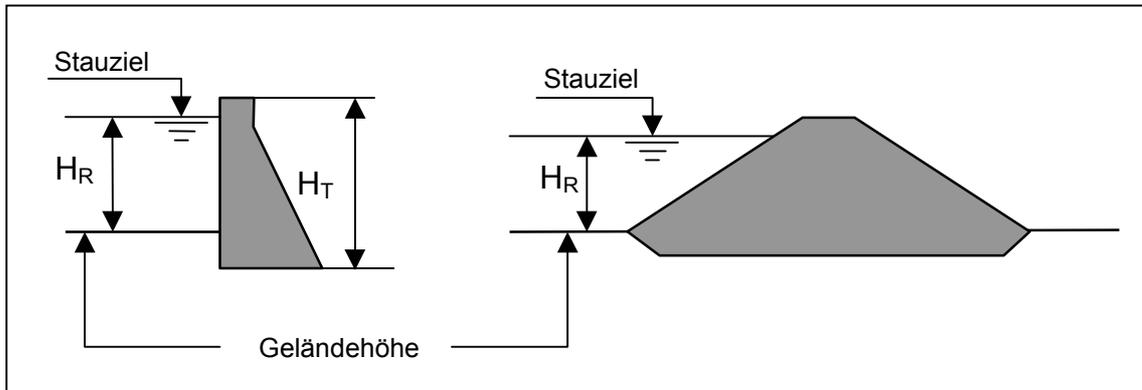
Folgende Fälle werden unterschieden:

#### *Stauanlagen im Fließgewässer (im Hauptschluss):*

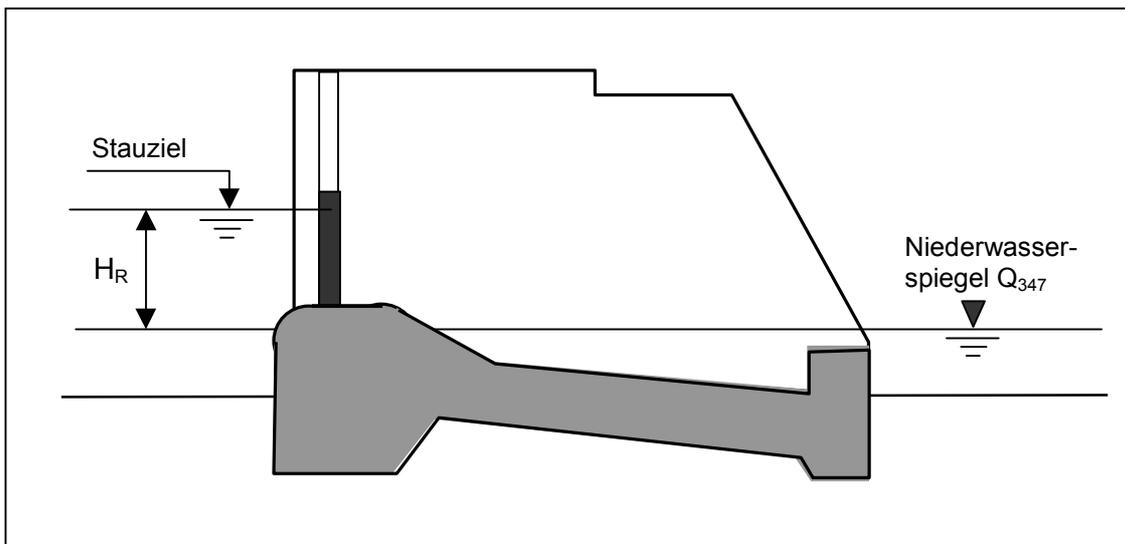
Für das Niveau des Niederwassers ist die Flusssohle unmittelbar am wasserseitigen Fuss des Absperrbauwerks massgebend (Figur 6). Eine allfällige Deponie am luftseitigen Fuss wird nicht in Betracht gezogen.

Diese Definition gilt auch für Stauanlagen, welche als Hochwasserrückhaltebecken, Lawinenauffangdämme, Geschiebesperren oder Geschieberückhaltesperren dienen.

Bei Wehren wird der Niederwasserspiegel entsprechend dem  $Q_{347}$  des natürlichen Zustands als massgebende Referenz angenommen (Figur 7).



Figur 6: Definition der Stauhöhe  $H_R$  bei Anlagen in Fließgewässer, ( $H_T$  = Talsperrenhöhe)

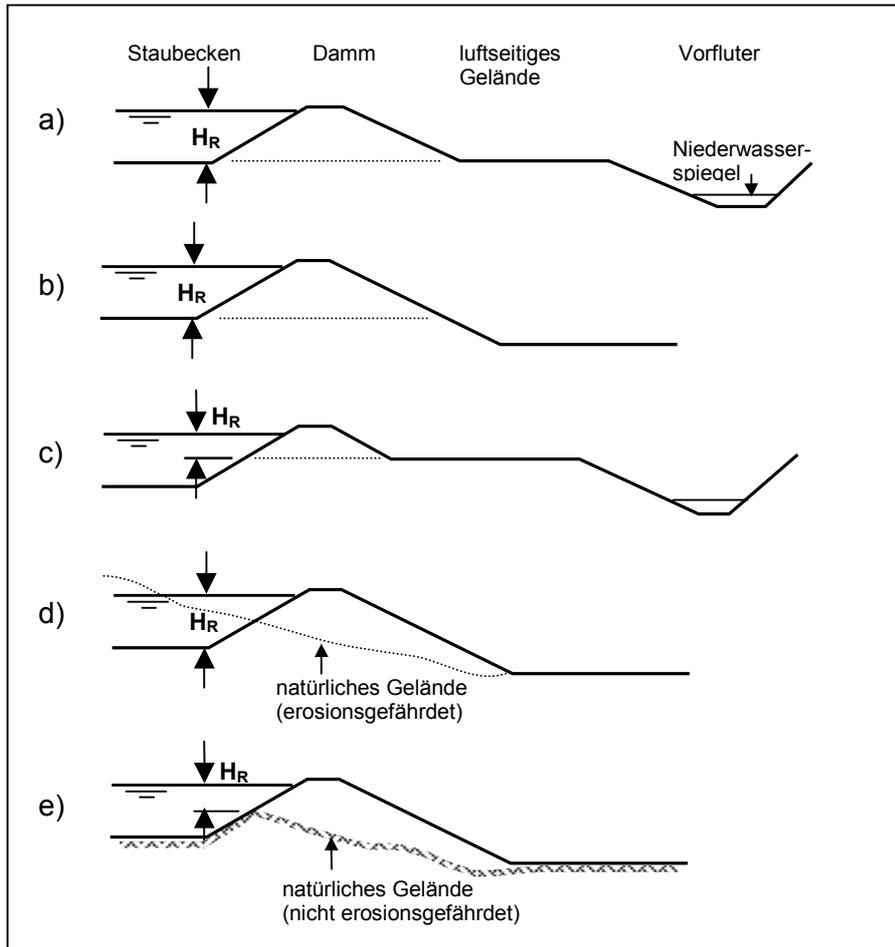


Figur 7: Definition der Stauhöhe  $H_R$  bei einem Wehr

**Stauanlagen ausserhalb des Fliessgewässers (im Nebenschluss):**

Je nach Situation entspricht der untere Referenzpunkt (Figur 8):

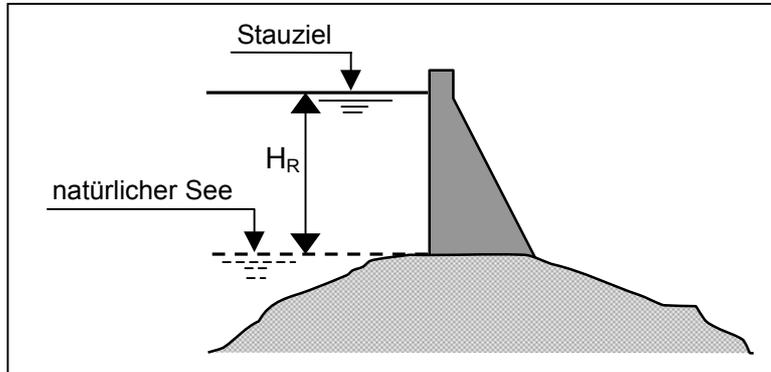
- a) der Sohle des Staubeckens, wenn ihr Niveau auf gleicher Höhe wie das luftseitige Gelände liegt,
- b) der Sohle des Staubeckens, wenn ihr Niveau über demjenigen des luftseitigen Geländes liegt,
- c) dem Niveau des luftseitigen Geländes, wenn dieses über demjenigen der Beckensohle liegt,
- d) bei einem Becken, das im Wesentlichen im Aushub erstellt wird, der Sohle des Staubeckens, wenn diese auf Niveau des luftseitigen Geländes oder darüber liegt und eine Erosionsgefährdung des natürlichen Geländes besteht,
- e) dem Niveau des wasserseitigen natürlichen Geländes, sofern dieser Teil nicht erosionsgefährdet ist (wie bei Felsuntergrund).



**Figur 8: Definition der Stauhöhe  $H_R$  bei einer Stauanlage ausserhalb des Fliessgewässers (im Nebenschluss)**

### Anhebung des Wasserspiegels eines natürlichen Sees

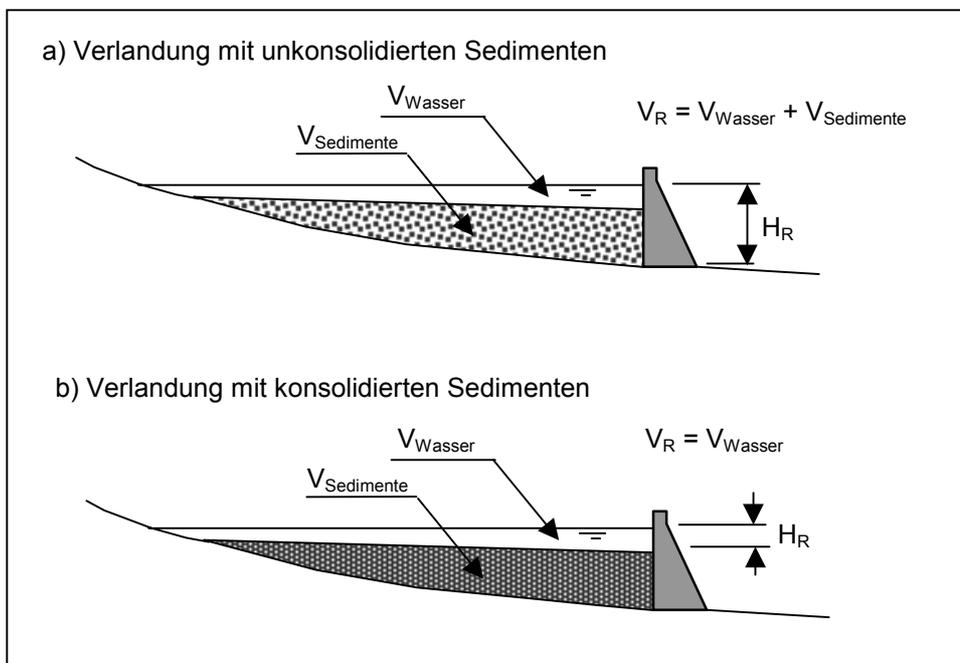
Der untere Referenzpunkt liegt auf dem Niveau des natürlichen Sees von der Anhebung des Wasserspiegels (Figur 9).



Figur 9: Definition der Stauhöhe  $H_R$  bei einer Anhebung des Wasserspiegels eines natürlichen Sees

### Stauanlagen mit bedeutenden Sedimentablagerungen:

Bei der Festlegung der für die Unterstellung massgebenden Stauhöhe kann eine Sedimentbedeckung im Staubecken berücksichtigt werden, sofern Untersuchungen vorliegen, die eine Konsolidierung der Sedimente belegen. Fehlen solche Untersuchungen, ist die massgebende Stauhöhe ohne Abzug von Auflandungen zu ermitteln.



Figur 10: Definition der Stauhöhe  $H_R$  und des Stauvolumens  $V_R$  bei einer Stauanlage mit Sedimentablagerungen.  $V_{\text{Wasser}}$  = Volumen des Wassers über den Sedimentablagerungen,  $V_{\text{Sedimente}}$  = Volumen der Sedimentablagerungen,  $H_R$  = Stauhöhe.



### 1.3 Das massgebende Stauvolumen für die Unterstellung

#### Definition des massgebenden Stauvolumens für die Unterstellung

Das für die Unterstellung massgebende Stauvolumen ist dasjenige, welches im Falle eines plötzlichen, totalen Bruchs der Talsperre bei normal gefüllten See entweichen kann. Es wird ermittelt zwischen dem Stauziel und einem Basisniveau, das dem Niveau des unteren Referenzpunktes für die Stauhöhenbestimmung entspricht.

*Wichtige Bemerkung:*

*Das für die Unterstellung massgebende Stauvolumen entspricht nicht zwingend dem Nutz- oder dem Totalvolumen.*

#### Verfahren für die Bestimmung des Stauvolumens

*Stauanlagen im Fliessgewässer (im Hauptschluss):*

Das Stauvolumen wird ermittelt zwischen dem Stauziel und dem Niveau des unteren Referenzpunktes in der Flusssohle:

Bei Wehren wird das Stauvolumen zwischen dem Stauziel und dem Niederwasserspiegel, entsprechend dem  $Q_{347}$  des natürlichen Zustands, ermittelt.

Bei Stauanlagen, deren Hauptnutzung darin besteht, Geschiebe und Murgänge aufzufangen, wird für die Ermittlung des Stauvolumens eine Horizontalebene auf der Kote des Stauziels angenommen.

Bei kleineren und mittleren Stauanlagen, bei deren ein hohes Risiko besteht, dass die Hochwasserentlastung durch Geschwemmel verstopft werden könnte, ist ein grösseres Volumen als das für die Unterstellung massgebende für eine Flutwellenabschätzung zu berücksichtigen (siehe auch Kapitel 2.3 „Untersuchung der Auswirkungen eines Bruches einer Stauanlage“).

*Stauanlagen ausserhalb des Fliessgewässers (im Nebenschluss):*

Das Stauvolumen wird ermittelt zwischen dem Stauziel und der Sohle des Staubeckens, wenn ihr Niveau auf gleicher Höhe oder über dem des luftseitigen Geländes liegt.

Liegt das luftseitige Gelände über dem Niveau der Beckensohle, so wird das Stauvolumen zwischen dem Stauziel und dem Niveau des luftseitigen Geländes ermittelt.

Liegt das wasserseitige Gelände über dem Niveau der Beckensohle und besteht im Bruchfall beim Entweichen des Wassers keine Erosionsgefahr bis auf das Niveau der Beckensohle, so wird das Stauvolumen zwischen Stauziel und dem Niveau des Geländes auf der Wasserseite des Absperrbauwerks ermittelt.

*Anhebung des Wasserspiegels eines natürlichen Sees:*

Das Stauvolumen wird ermittelt zwischen dem Stauziel und dem Niveau des natürlichen Sees vor der Anhebung des Wasserspiegels.



### *Stauanlagen mit bedeutenden Sedimentablagerungen (Figur 10):*

Bei der Festlegung des für die Unterstellung massgebenden Stauvolumens kann eine Sedimentbedeckung im Staubecken berücksichtigt werden, sofern Untersuchungen vorliegen, die eine Konsolidierung der Sedimente belegen. Fehlen solche Untersuchungen, ist das Stauvolumen mittels der massgebenden Stauhöhe (gemäss Kapitel 1.2) ohne Abzug von Auflandungen zu ermitteln.

## **1.4 Spezialfall: verstopfungsanfällige Hochwasserentlastung**

Weist eine kleine Stauanlage eine Hochwasserentlastung auf, die verstopfungsanfällig ist (zum Beispiel bei Vorhandensein eines Feinrechs oder einer kleindimensionierten Entlastungsleitung), so werden Stauhöhe und Stauvolumen zwischen Kronenniveau und unterem Referenzpunkt bestimmt. Das heisst, es ist ein bis zur Krone voll gefülltes Staubecken anzunehmen.

## **2. BEGRIFF DER BESONDEREN GEFAHR**

### **2.1 Allgemeine Definition der besonderen Gefahr**

Eine besondere Gefahr ist gegeben, wenn im Fall eines plötzlichen Bruches des Absperrbauwerkes mindestens ein Wohnraum oder Arbeitsraum, ein öffentliches Gebäude, ein öffentlicher Campingplatz oder ein stark benutzter Verkehrsweg betroffen ist.

Die für die Unterstellung entscheidenden Kriterien basieren auf der Wassertiefe sowie dem Produkt aus Wassertiefe und Fliessgeschwindigkeit der Flutwelle und beziehen sich auf die oben erwähnten Objekte (Wohnraum, Arbeitsraum, öffentliches Gebäude, öffentlicher Campingplatz, stark benutzter Verkehrsweg).

Zur Festlegung der Schadensauswirkungen von Flutwellen werden die in der Publikation „Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten“ des BWW, BRP, BUWAL 1997, dargestellten Intensitätskriterien (stark, mittel, schwach) berücksichtigt. Des Weiteren wurden die entsprechenden Angaben aus dem Dokument „Downstream Hazard Classification Guidelines, ACER Technical Memorandum No 11“, USBR, Denver, Colorado (December 1988), herangezogen.

Es ist hier anzumerken, dass eine Dammbbruchflutwelle – im Gegensatz zu einem Hochwasserereignis – ein relativ kurzes Ereignis darstellt, insbesondere wenn es sich dabei um ein kleines Staubecken handelt. Die festgelegten Werte, welche für die Unterstellung massgebend sind, stellen die Grenzwerte dar oberhalb derer eine besondere Gefahr für die betroffenen Objekte besteht. Es ist klar, dass auch unterhalb dieser Grenzwerte Schäden an Bauten nicht ausgeschlossen werden können. Entsprechend der Bedeutung des von der Flutwelle betroffenen Gebietes und der möglichen Folgen kann auch eine Anlage unterstellt werden, welche die gegebenen Grenzwerte nicht erfüllt.



## 2.2 Arten von betroffenen Bauten und Örtlichkeiten

Wohnräume <sup>2</sup>	Es werden sowohl mehrere Häuser als auch Einzelbauten berücksichtigt (Chalets, Einfamilienhäuser, Wohnblöcke, Bauernhöfe, ...) die dauernd oder zeitweise (Wochenende, monatsweise, saisonal) durch eine oder mehrere Personen bewohnt werden.
Arbeitsräume	Werkstatt, Büro, bedeutende Freizeitanlage etc. Belegung dauernd oder wenigstens 2 Stunden täglich. Berücksichtigt werden eine Werkstatt, eine einzelne Fabrik oder eine Industriezone (speziell bei umweltschädigenden Risiken: Chemie, Erdöllager, Abwasserreinigung). Hingegen werden Landwirtschaftszonen (Felder, Weiden) nicht berücksichtigt.
Öffentliche Bauten	Verwaltungsgebäude Schulen Spitäler
Campingplatz	Öffentliche Campingplätze
Stark benutzte Verkehrswege	Nationalstrassen Kantonsstrassen Eisenbahnlinien  Nicht berücksichtigt werden: Fusswege, Waldwege, Nebenstrassen.

## 2.3 Untersuchung der Auswirkungen des Bruchs einer Stauanlage

### Berechnung der Flutwelle

Um festzustellen, ob eine besondere Gefahr vorliegt, ist eine Berechnung der Flutwelle als Folge eines Bruchs der Stauanlage vorzunehmen.

### Berechnungsverfahren

Die beim Bruch einer Sperre entstehende Flutwelle wird durch die Gleichungen der instationären Flüssigkeitsströmung beschrieben, die von B. De Saint-Venant abgeleitet wurden.

Je nach Problemstellung eignen sich Berechnungsverfahren, die von der Handrechnung über eindimensionale Berechnungsprogramme bis zu zweidimensionalen Computerberechnungen führen. Für eine einfache Feststellung des Abflusses an einer bestimmten Stelle unterhalb der Sperre reichen oft die händisch ermittelten Überflutungsgrössen aus.

---

<sup>2</sup> Es wird unterschieden zwischen festen Bauten und leichteren Konstruktionen wie Baracken oder Holzhäusern.

<p>Berechnungsverfahren</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Berechnung von Hand:</i> Dabei werden mit Hilfe von einfachen Formeln und Diagrammen der Abfluss an der Sperrstelle sowie dessen Abminderung bis zu den einzelnen interessierenden Stellen talabwärts bestimmt.</li> <li>▪ <i>Eindimensionale Verfahren:</i> Das Verfahren eignet sich besonders bei langen, klar begrenzten Tälern, wo der Abfluss ein vorgegebene Richtung hat. Das Untersuchungsgebiet wird durch eine Serie von Querschnitten längs der Talachse modelliert. Im Einsatz sind verschiedene in Europa und USA entwickelte Computerprogramme. (Eine Zusammenstellung verschiedener Programme findet sich im ICOLD-Bulletin 111 <i>Dam-Break Flood Analysis</i>, Commission Internationale des Grands Barrages, Paris, 1998.)</li> <li>▪ <i>Zweidimensionale Verfahren:</i> Dieses Verfahren kann für alle Talformen angewendet werden, insbesondere geeignet ist es jedoch bei flachen Gebieten, wo der Abfluss in verschiedene Richtungen erfolgt. Das Untersuchungsgebiet wird in eine Vielzahl diskreter Elemente unterteilt. Die numerische Lösung wird durch elementweise Integration eines Systems von Differentialgleichungen in Zeitschritten erhalten. Pro Zelle wird der Abfluss in zwei Richtungen bestimmt. Die räumliche und zeitliche Ausbreitung der Flutwelle kann in beliebig strukturiertem Gelände verfolgt werden.</li> </ul>
<p>Bruchszenarien</p>	<p>Der Bruch erfolgt plötzlich (Momentanbruch)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ bei Bogenmauern: vollständiger Bruch der gesamten Mauer</li> <li>▪ bei Gewichtsmauern: vollständiger Bruch der gesamten Mauer (gegebenenfalls Mehrfaches der Blockbreite)</li> <li>▪ bei Schüttdämmen: Bresche (meist Trapezform: Basisbreite entsprechend der zweifachen Wassertiefe mit seitlichen Böschungsneigungen von 1:1, wobei die Fläche der Bresche nicht grösser als die des Dammes sein soll)</li> <li>▪ bei Wehranlagen: Wehr: vollständiger oder partieller Bruch des Wehrs (ohne Zentrale) gemäss konstruktivem Konzept (aufgelöste Tragwerke, Rahmentragwerke) Seitendämme: Bresche (wie bei Schüttdämmen)</li> </ul>
<p>Anfangsbedingungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ In der Regel wird vom voll gefüllten See ausgegangen (Seespiegel auf Stauziel).</li> <li>▪ In gewissen Fällen von kleinen Anlagen, bei denen ein hohes Verstopfungsrisiko der Hochwasserentlastung durch Geschwemmsel besteht, soll das Anfangsniveau des Seestands auf Kronenhöhe angenommen werden.</li> </ul>
<p>notwendige topographische Unterlagen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Für die einfacheren Berechnungsverfahren werden Daten aus einer Karte mit Höhenkurven (1 : 25'000 oder genauer, z.B. 1 : 10'000) benötigt. Daraus werden die Querprofile für die Berechnung gezeichnet.</li> <li>▪ Digitales Geländemodell (z.B. DHM25 Basismodell der Landestopographie) besonders beim Einsatz in 2D-Berechnungen. Erforderlichenfalls müssen zusätzliche topographisch erhobene Angaben in das Geländemodell eingegeben werden (z.B. Strassen- und Bahndämme oder weitere Hindernisse sowie Geländekanten).</li> </ul>



<p>Topographie des Untersuchungsgebietes</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Einfache Handrechnung und 1D-Verfahren:</i> Talform soll so sein, dass das Abflussgebiet klar definiert ist und durch eine Abfolge von Querschnitten festgelegt werden kann. Normalerweise müssen die Querschnitte eine möglichst stetige Form haben und sollten keine Inseln aufweisen. Weite Retentionsräume und seitliche Ausbreitungsmöglichkeiten der Flutwelle (z.B. in einmündende Nebentäler) vermindern die Anwendbarkeit bzw. die Zuverlässigkeit der 1D-Berechnung.</li> <li>▪ <i>2D-Verfahren:</i> Die Topographie wird durch eine sehr grosse Zahl von Punkten (Koordinaten und Höhe) definiert. Diese werden zu Dreiecken verbunden und bilden so die Terrainoberfläche ab. Damit wird eine sehr gute Modellierung des Geländes erreicht. Die Bearbeitung der topographischen Unterlagen kann unter Umständen aufwendig werden, wenn nicht zuviel „überflüssige“ Topographie mitgeschleppt werden soll, was den Rechenaufwand stark vergrössern kann.</li> </ul>
<p>Berechnungsergebnisse</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Einfache Handrechnung und 1D-Verfahren:</i> Das einfache Handrechnungsverfahren erlaubt ohne grossen Aufwand eine rasche Bestimmung der Überflutung an der interessierenden Stelle unterhalb der Stauanlage. Als Berechnungsergebnisse werden die Wassermengen, Geschwindigkeiten und Wassertiefen in den einzelnen Querschnitten erhalten. Dies erlaubt die Bestimmung und Darstellung der (ebenen) Wasserspiegel- und Energielinie in einer Flutwellenkarte.</li> <li>▪ <i>2D-Verfahren</i> Pro Zelle werden die Wassermengen, Fliessgeschwindigkeiten und Wassertiefen in zwei Richtungen bestimmt. Die räumliche und zeitliche Ausbreitung der Flutwelle kann in beliebig strukturiertem Gelände verfolgt werden. Die Darstellung der Berechnungsergebnisse ist etwas schwieriger als bei den 1D-Verfahren, weil der Wasserspiegel nicht eben ist, sondern von Zelle zu Zelle sehr stark variieren kann. Deshalb ist auch die Energielinie innerhalb eines Talquerschnittes unregelmässig gekrümmt und nicht eben (was auch eher der Wirklichkeit entspricht).</li> </ul>

### Darstellung der Resultate

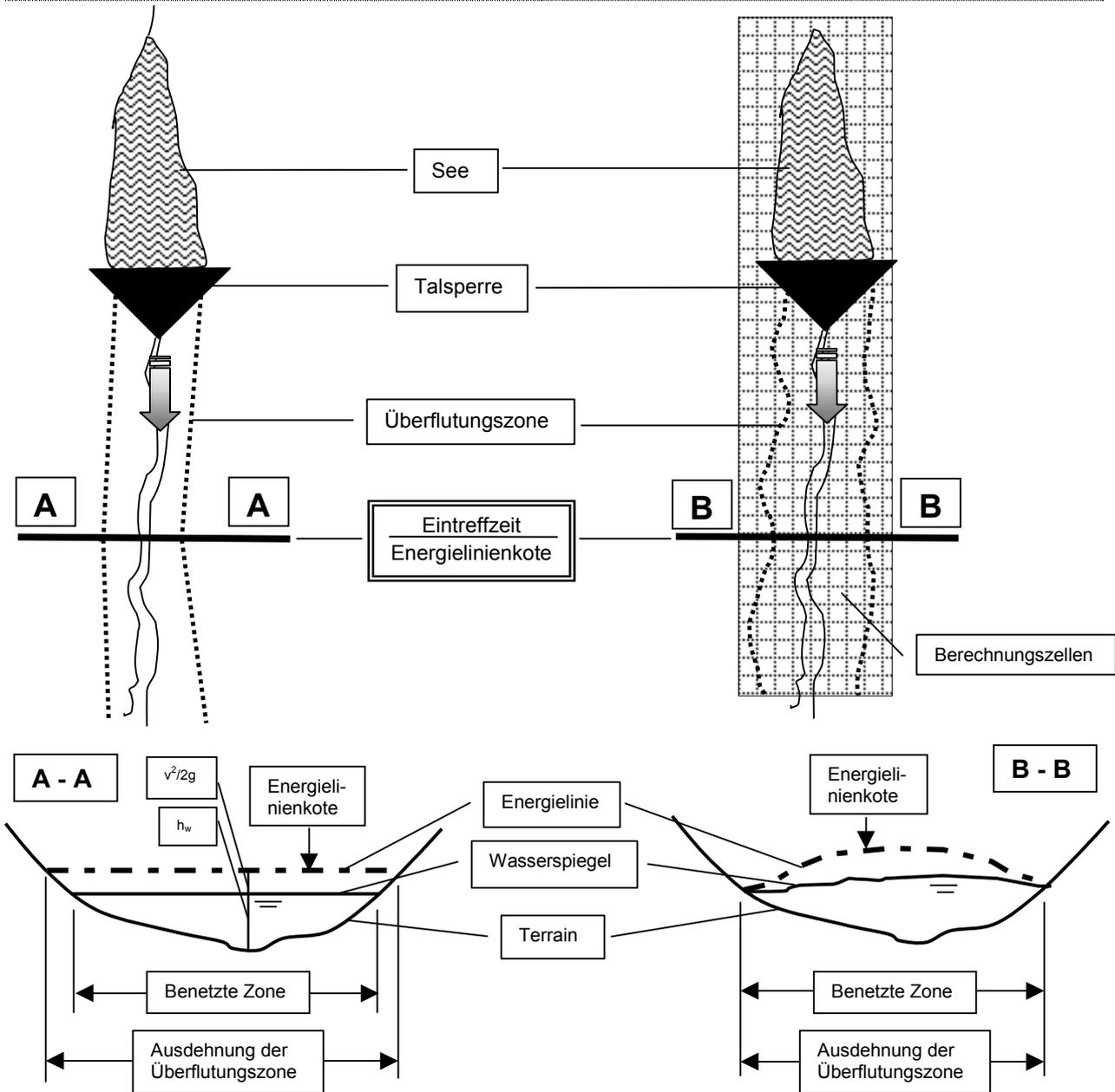
Die Ergebnisse der Flutwellenberechnung werden in einer Überflutungskarte dargestellt (Figur 11). Die Begrenzung der überfluteten Zone wird grundsätzlich durch die Energielinie definiert (Wassertiefe  $h_w + \text{Energiehöhe } v^2/2g$ ). Bleibt der Abfluss innerhalb eines Flussbettes, so wird lediglich der benetzte Bereich berücksichtigt.

**1-dimensionale Berechnung:**

Berechnung des Abflusses in einzelnen Querschnitten (A-A, etc.), die in bestimmten Abständen festgelegt wurden. Als Resultate werden die Wassertiefe  $h_w$  und die Fließgeschwindigkeit  $v$  für die Bestimmung der Energielinie ausgewertet. Die Überflutungszone wird durch den Verschnitt der Energielinie mit der Terrainoberfläche erhalten. Auf der Überflutungskarte werden die Eintreffzeit der Flutwelle und die maximale Energielinienkote angegeben.

**2-dimensionale Berechnung:**

Berechnung in einem dichten Raster von Zellen in Längs- und Querrichtung. Pro Zelle werden die Fließgeschwindigkeiten in beiden Richtungen und die Wassertiefe erhalten. Der Wasserspiegel ist in einem Querschnitt (z.B. B-B) nicht mehr eben und die Energielinie bildet keine Gerade, sondern weist eine unregelmässige Krümmung auf. Auf der Überflutungskarte werden die Eintreffzeit des Flutwellenkopfes sowie die maximal benetzte Zone und die grösste Energielinienkote aufgetragen.



Figur 11: Darstellung der Überflutungszone bei eindimensionaler und zweidimensionaler Berechnung

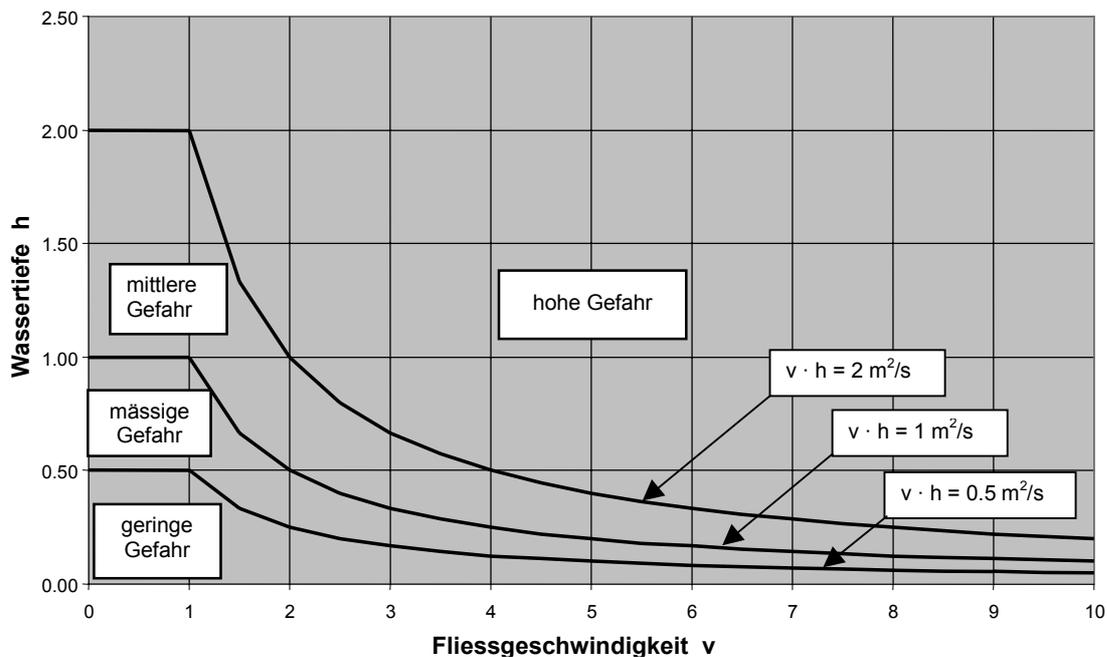


## 2.4 Schwellenwerte für das Mass der besonderen Gefahr

Schwellenwert	Auswirkungen	Unterstellungsregeln
<b>Hohe Gefahr</b> $h / 2 \text{ m}$ oder $v3h / 2 \text{ m}^2/\text{s}$	Personen sind auch im Inneren von Gebäuden gefährdet. Bauten auf Uferböschungen sind bei Erosion einsturzgefährdet. Murgänge können durch den Anprallstoss den Einsturz von Gebäuden verursachen.	Die Stauanlage wird unterstellt, wenn wenigstens ein Wohnraum, ein Arbeitsraum, ein öffentliches Gebäude, ein öffentlicher Campingplatz, ein stark benutzter Verkehrsweg oder eine Bahnlinie betroffen ist.
<b>Mittlere Gefahr</b> $2 \text{ m} > h / 1 \text{ m}$ oder $2 \text{ m}^2/\text{s} > v3h / 1 \text{ m}^2/\text{s}$	Personen im Freien und in Fahrzeugen sind gefährdet. Eine Flucht in obere Stockwerke von Gebäuden ist meistens möglich. Gebäude können entsprechend ihrer Bauweise Schäden erleiden.	Die Stauanlage wird unterstellt, wenn ein Wohnraum (in leichter Bauweise) ein Arbeitsraum (in leichter Bauweise), ein öffentlicher Campingplatz oder ein stark benutzter Verkehrsweg betroffen ist.
<b>Mässige Gefahr</b> $0.5 \text{ m} \leq h < 1 \text{ m}$ oder $0.5 \text{ m}^2/\text{s} \leq v3h < 1 \text{ m}^2/\text{s}$	Personen sind im Freien und im Inneren von Gebäuden wenig gefährdet. Fahrzeuge können weggeschwemmt werden.	Die Stauanlage wird unterstellt, wenn ein öffentlicher Campingplatz oder ein stark benutzter Verkehrsweg betroffen ist.
<b>Geringe Gefahr</b> $h < 0,5 \text{ m}$ oder $v3h < 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$	Personen sind nicht im Gefahr weder im Freien noch im Inneren von Gebäuden.	Die Stauanlage wird nicht unterstellt.

Tabelle 1: Schwellenwerte für das Mass der besonderen Gefahr, basierend auf den Kriterien für die Wirkung von Überflutungen aus Lit. [2].

$v$  = Fließgeschwindigkeit [m/s],  $h$  = Wassertiefe [m],  $v \cdot h$  = Intensität der Überflutung [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]



Figur 12: Einteilung der Gefährdungsbereiche aufgrund der Intensität der Überflutung

## 2.5 In Kaskaden angeordnete Stauanlagen

Bei übereinander liegenden, eine Kaskade bildenden Stauanlagen, werden für jede Anlage einzeln die Folgen eines Bruches analysiert. Insbesondere sind die Auswirkungen einer Flutwelle auf die Unterlieger-Talsperren zu untersuchen, wobei ein allfälliger Dominoeffekt zu berücksichtigen ist.

## 2.6 Situationen ohne besondere Gefahr

Nachfolgend sind Situationen ohne besondere Gefahr aufgeführt, bei denen auf eine Unterstellung unter die Stauanlagenverordnung verzichtet werden kann. Bei den Situationen a) und b) handelt es sich um eine Ausserbetriebnahme bzw. Aufhebung der Unterstellung.

- a) Wenn durch die Erstellung einer Bresche verhindert wird, dass sich Wasser, Geschiebe oder Schlamm aufstaut, kann die Anlage ohne Überwachung und speziellen Unterhalt sich selbst überlassen werden. Es ist dabei darauf zu achten, dass die Bresche genügend gross ist, damit eine Verstopfung durch Geschwemmsel und Baumstämme verhindert wird.
- b) Im Fall von kleinen Stauanlagen kann durch einzelne spezielle Objektschutzmassnahmen erreicht werden, dass im Bruchfall die Flutwelle keinen Wohnraum, keinen Arbeitsplatz, kein öffentliches Gebäude, keinen öffentlichen Campingplatz oder keinen stark benützten Verkehrsweg in unzulässiger Weise erreicht.
- c) Wird im Bruchfall das Stauvolumen vollständig in einer unterliegenden Stauanlage aufgefangen und trifft die Flutwelle unterwegs auf keine der unter b) erwähnten Objekte, kann von einer Unterstellung abgesehen werden.
- d) Fliesst die Flutwelle bei Wehren oder kleinen Anlagen vollständig innerhalb des Flussbettes ab, oder hat sie lediglich Ausuferungen im landwirtschaftlich genutzten Gebiet oder in für den Hochwasserschutz vorgegebenen Überschwemmungszonen, ist keine Unterstellung vorzusehen.

**Bemerkung:** Wegen möglichen Entwicklungen unterhalb von Stauanlagen sind die obigen Punkte von Zeit zu Zeit neu zu beurteilen. Bei späteren Bauvorhaben innerhalb der Überflutungszone einer nicht unterstellten Anlage ist die Situation der besonderen Gefahr zu berücksichtigen.



### **3. AUSWAHL DER ZU UNTERSTELLENDEN STAUANLAGEN**

#### **3.1 Entscheidende Stelle für die Unterstellung**

In jedem Fall ist es Sache der Aufsichtsbehörden von Bund oder Kanton zu entscheiden, ob eine Stauanlage der Stauanlagenverordnung zu unterstellen ist.

Gemäss den Regeln des Verwaltungsverfahrens ist die Aufsichtsbehörde ermächtigt vom Werkigentümer die Unterlagen zu verlangen, die sie benötigt (insbesondere allgemeine Pläne der Anlage, Berechnung der Flutwelle, eine Überflutungskarte mit Angabe von Höhe und Geschwindigkeit an den kritischen Stellen). Sie entscheidet, in welchem Masse ein plötzlicher Bruch der Stauanlage eine besondere Gefahr im Sinne der im Kapitel 2.1 gegebenen Definition für wenigstens einen Wohnraum, einen Arbeitsraum, ein öffentliches Gebäude, einen öffentlichen Campingplatz oder einen stark benutzten Verkehrsweg bedeutet. Die zuständige Aufsichtsbehörde verfügt den betreffenden Entscheid gemäss der geltenden Gesetzgebung von Bund und Kantonen.

#### **3.2 Vorgehen beim Entscheid über eine Unterstellung**

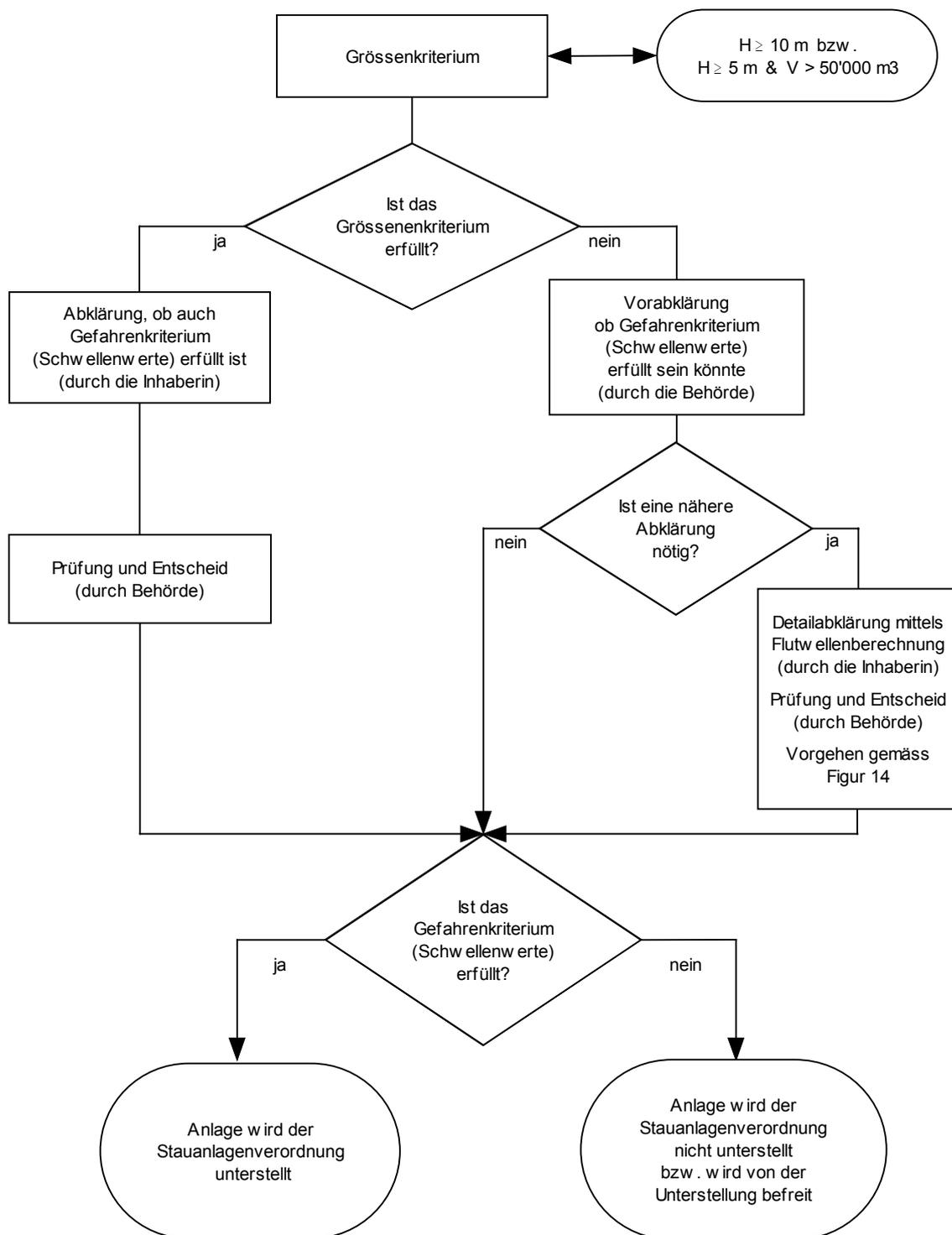
Das Vorgehen bei der Entscheidungsfindung über eine Unterstellung einer Stauanlage unter die Stauanlagenverordnung (StAV) und damit unter die Aufsicht einer Behörde ist schematisch in den beiden Figuren 13 und 14 dargestellt.

In den Fällen, wo die geometrischen Unterstellungskriterien gemäss Artikel 1, Absatz 1 StAV erfüllt sind, ist es Sache der Inhaberin der Stauanlage der Aufsichtsbehörde direkt die Angaben über die Auswirkungen eines Bruchs der Stauanlage zu liefern.

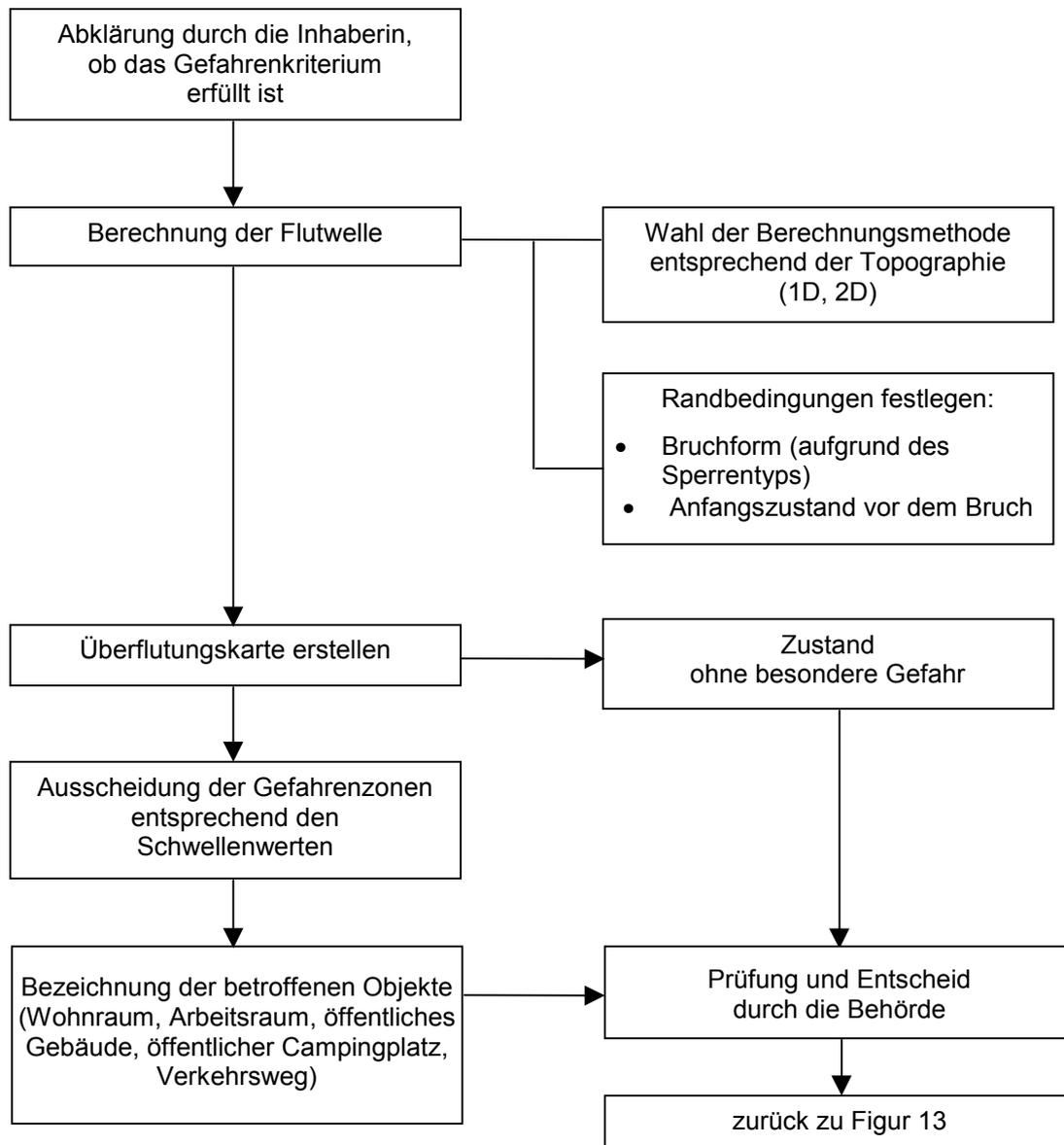
Für kleinere Stauanlagen, welche die geometrischen Unterstellungskriterien nicht erfüllen, führt die Aufsichtsbehörde eine Vorabklärung durch (z.B. aufgrund von vereinfachten Flutwellenberechnungen). Im Bedarfsfalle wird sie zusätzliche Unterlagen und Angaben bei der Stauanlageninhaberin verlangen.

#### **3.3 Aufhebung der Unterstellung**

Bei einem Antrag auf Aufhebung der Unterstellung ist es Sache der Inhaberin der Stauanlage, gegenüber der Aufsichtsbehörde den Nachweis zu erbringen, dass die Stauanlage keine besondere Gefahr (oder keine solche mehr) für Personen oder Sachen darstellt. Die Aufsichtsbehörde ist indessen in der Lage zu verlangen, dass Überwachung und Unterhalt der Stauanlage dennoch vorgenommen werden.



Figur 13: Vorgehensplan für die Begründung einer Unterstellung unter die Stauanlagenverordnung



Figur 14: Auszug aus dem Vorgehen bei der Ermittlung der besonderen Gefahr (Ergänzung zu Figur 13)

#### 4. LITERATUR

- [1] Verordnung über die Sicherheit der Stauanlagen (Stauanlagenverordnung, StAV) vom 7. Dezember 1998, SR 721.102
- [2] Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten; Empfehlungen, Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Bundesamt für Raumplanung (BRP), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), (1997)
- [3] Bulletin ICOLD 111 Etude d'onde de rupture de barrages; *Dam-Break Flood Analysis*, Commission Internationale des Grands Barrages, Paris, (1998)
- [4] Downstream Hazard Classification Guidelines, ACER Technical Memorandum No 11, US Bureau of Reclamation, Denver , Colorado, December 1988
- [5] Appréciation globale des difficultés et des risques entraînés par la construction des barrages, note technique No 5, Centre technique du génie rural des eaux et des forêts (CTGREF), juin 1978
- [6] Paquier, A., Calcul simplifié des ondes de rupture de barrages; informations techniques du CEMAGREF, note 1; décembre 1994
- [7] Beffa, C., Ein Parameterverfahren zur Bestimmung der flächigen Ausbreitung von Breschenabflüssen ; «wasser, energie, luft – eau, énergie, air» 93. Jg., Heft 3/4, 2000.

#### 5. ANHANG

- I.** Diagramme zur Bestimmung der flächigen Ausbreitung von Breschenabflüssen (nach [7])
- II.** Vereinfachtes eindimensionales Verfahren zur Berechnung der Flutwelle infolge Talsperrenbruch (nach [5]). (Steht nicht in elektronischer Form zur Verfügung)

# DIAGRAMME ZUR BESTIMMUNG DER FLÄCHIGEN AUSBREITUNG VON BRESCHENABFLÜSSEN

## 1. Problemdefinition

### 1.1 Ein- und zweidimensionale Flutwellenabflüsse

Nach dem Bruch einer Stauanlage (Staumauer oder Staudamm) fliesst der Speicherinhalt als Flutwelle durch die Bresche ab. Weist das Abflussgebiet eine deutliche Talform auf, so erfolgt die Wellenausbreitung primär eindimensional. Die Abflussmengen, Abflusshöhen und Eintreffzeiten lassen sich mit Abschätzverfahren oder eindimensionaler Modellberechnungen bestimmen.

Bei einer 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.

Im Falle des Abflusses in eine horizontale Ebene ohne Längs- und Quergefälle breitet sich die Flutwelle näherungsweise radial aus. Massgebende Parameter sind dabei die Stauhöhe, die Breschenbreite, das Speichervolumen und die Rauigkeit der Oberfläche. Ab einem bestimmten Abstand von der Bresche tritt ein Wechsel von schiessendem zu strömendem Abfluss auf (Wassersprung). Für einen Abfluss auf einer geneigten Fläche kommt als weiterer Parameter das Längsgefälle der Sohle hinzu. Für Gefälle grösser als ca. 0.5% bleibt der Abfluss überkritisch (schiessend) und wird von den hydraulischen Randbedingungen der Überflutungsfläche nicht beeinflusst.

### 1.2 Parameterverfahren

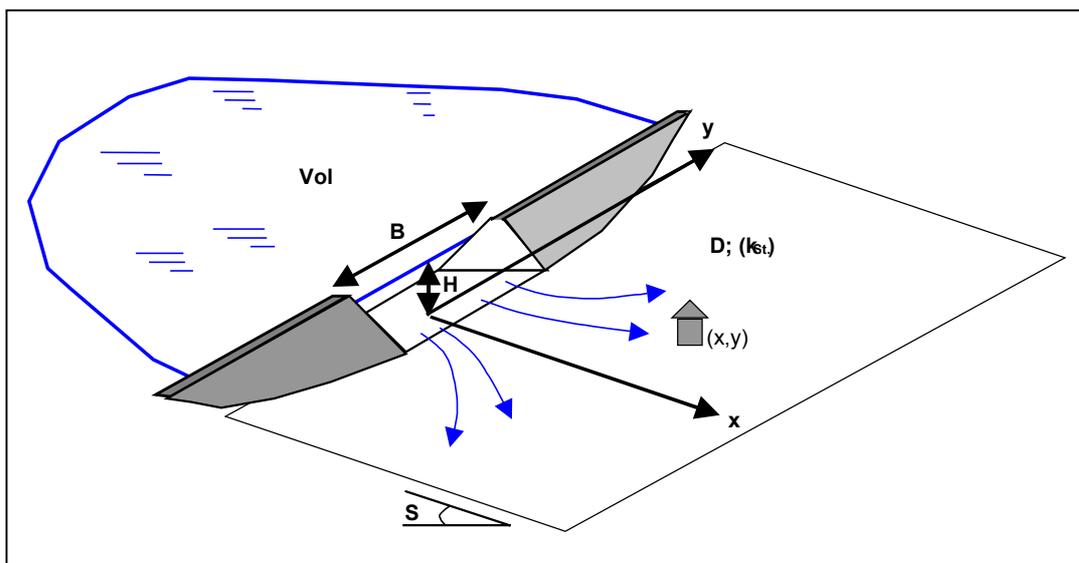


Abbildung 1: Abfluss aus einer Bresche auf einer geneigten Fläche. Lage der Koordinatenachsen  $x$ ,  $y$  und massgebende Parameter: Stauhöhe  $H$ , Breschenbreite  $B$ , Sohlengefälle  $S$ , Rauigkeit als mittlerer Korndurchmesser  $D$ , Speichervolumen  $Vol$ .



Das hier vorgestellte Parameterverfahren erlaubt auf einfache Weise mit Hilfe von Diagrammen die rasche Abschätzung der Intensität der Überflutung an einem vorgegebenen Standort infolge des Bruchs einer kleineren Stauanlage, wenn die Flutwelle sich zweidimensional auf einer Fläche ausbreitet. Die dabei ermittelten Grössen betreffen die Abnahme von Abflusshöhe und Abflussintensität (Fliessgeschwindigkeit, spezifischer Abfluss, Energiehöhe) in Funktion der Distanz von der Bresche, sowie die flächige Ausbreitung des Abflusstrahls für ebene und geneigte Flächen. Die massgebenden Parameter und die Lage der Koordinatenachsen sind in Abbildung 1 dargestellt.

Für die Berechnung müssen Annahmen über die Bresche gemacht werden. Das Verfahren rechnet mit einer Rechteckbresche mit frei wählbarer Breite B und Höhe H. Als Bruchszszenarien und Anfangsbedingungen werden im Allgemeinen dabei angenommen:

Typ der Stauanlage	Erddamm	Gewichtsmauer	Bogenmauer
Bruch	Momentanbruch (plötzlicher Bruch in sehr kurzer Zeit)		
Wassertiefe in der Bresche H	Stauhöhe bei voll gefülltem See (Seespiegel auf Stauziel, oder bei hohem Verstopfungsrisiko der Hochwasserentlastung gegebenenfalls auf Kronenhöhe)		
Breschenbreite B	B = 2H Rechteckbresche	gesamte Mauer, gegebenenfalls Mehrfaches der Blockbreite	gesamte Mauer

Abbildung 2: Bruchszszenarien und Anfangsbedingungen für die Bresche

Bei der Durchführung des Verfahrens werden, ausgehend von den in Abbildung 1 dargestellten freien Parametern (Stauhöhe H, Breschenbreite B, Sohlgefälle S, Rauigkeit als mittlerer Korndurchmesser D, Speichervolumen Vol) sowie den Standortkoordinaten (x,y), in einem ersten Schritt einige charakteristische Grössen berechnet. Mit Hilfe der Diagramme werden die für den gesuchten Standort massgebenden dimensionslosen Werte des spezifischen Abflusses (q/Q) und der Fliessgeschwindigkeit (v/V) sowie der lateralen Ausbreitung ( $Y_{max}$ ,  $Y_{rel}$ ) ermittelt und die Beträge des effektiven spezifischen Abflusses q, der effektiven Fliessgeschwindigkeit v, der Abflusshöhe h und der Energiehöhe  $h_e$  berechnet.

Für die Umrechnung des in der Ingenieurpraxis mehrheitlich gebräuchlichen Strickler-k-Wertes in den im Verfahren verwendeten mittleren Korndurchmesser D dient die in Abbildung 3 dargestellte Tabelle. Die Beziehung erfolgt nach der Formel  $D = \{21/k_{St}\}^6$ .

$k_{st} [m^{1/3}/s]$	20	25	30	35	40	45
D [m]	1.34	0.35	0.12	0.05	0.02	0.01

Abbildung 3: Umrechnung von Strickler-k-Werten in mittlere Korndurchmesser D

Zur Beschreibung des Einflusses der Speichergrösse werden 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 Multiplikationsfaktor  $k$  zur Ermittlung von  $X_{\min}$  hängt vom Sohlengefälle ab und ist in Abbildung 4 aufgeführt. Für Gefälle, welche nicht tabelliert sind, kann linear interpoliert werden.

Gefälle	0.25%	2%	4%	8%	16%
Koeffizient für spezifischen Abfluss	2.5	2.5	3.0	4.0	5.0
Koeffizient für Fliessgeschwindigkeit	3.0	3.0	3.0	4.0	5.0

Abbildung 4: Multiplikationsfaktoren  $k$  zur Ermittlung der Distanz  $X_{\min}$

## 2. 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 Genauigkeit der Ergebnisse beeinträchtigen, ist schwierig zu bestimmen und hängt zudem 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.

## 3. Anwendung des Verfahrens

### 3.1 Einsatzmöglichkeiten

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 erreicht bzw. unterschreitet.

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.



### 3.2 Verwendete Skalierungen (Zusammenstellung)

Bei der Erstellung der Diagramme sind folgende Bezeichnungen und Skalierungen verwendet worden:

<b>Parameter</b>	<b>Bezeichnung</b>
Stauhöhe	$H$
Breschenbreite	$B$
Sohlengefälle	$S$
mittlerer Korndurchmesser	$D$
Speichervolumen	$Vol$

Abbildung 5: Freie Parameter und ihre Bezeichnung

<b>Charakteristische Grösse</b>	<b>Ausdruck</b>	<b>Koeffizienten</b>
Horizontale Länge	$L_o = \sqrt{BH}$	
Distanz von der Sperre	$X_o = x / L_o$	
Distanz von der Strahlachse	$Y_o = y / L_o$	
Speichergrösse	$Vol_o = \frac{Vol}{BH^2}$	
Horizontale Distanz für endliche Speichergrösse	$L = L_o \left( \frac{Vol_{max}}{\min(Vol_o, Vol_{max})} \right)^{\left( \frac{X_o - X_{min}}{X_{min}} \right)^n}$	$Vol_{max} = 4000$ $n = 1/5$ für spez. Abfluss $n = 1/7$ für Fließgeschwindigkeit $X_{min} = k Vol_o^{1/3}$ mit Faktor $k$ aus Abbildung 4
Distanz von der Sperre für endliche Speichergrösse	$X = x / L$	
Distanz von der Strahlachse für endliche Speichergrösse	$Y = y / L$	
Spezifischer Abfluss	$Q = \frac{\sqrt{gB}}{3.13} H \left( \frac{H}{30D} \right)^n$	$n = \begin{cases} 0 & \text{für } X < 6 \\ 1/10 & \text{für } X \geq 6 \end{cases}$
Fließgeschwindigkeit	$V = \sqrt{gH} \left( \frac{H}{30D} \right)^n$	$n = \begin{cases} 1/10 & \text{für } X < 6 \\ 1/4 & \text{für } X \geq 6 \end{cases}$

Abbildung 6: Gewählte Skalen mit Wertebereichen für die Koeffizienten

Zur Wahl der Skalierung des spezifischen Abflusses: Der Ausdruck  $\{\sqrt{g} / 3.13\}$  nimmt für SI-Einheiten den Wert 1.0 an. Im Breschenbereich gilt zudem  $q/Q \approx 1.0$ .

Zur Skalierung der Rauigkeit: Der Ausdruck  $\{H / (30 D)\}$  entspricht „mittleren“ Reibungsverhältnissen. Bei einer Stauhöhe von  $H = 5$  m würde dies einem Strickler-k-Wert von  $k_{st} = 28 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  entsprechen.

### 3.3 Illustration anhand eines Beispiels

Die Anwendung des Parameterverfahrens wird nun anhand eines Beispiels gezeigt. Die frei gewählten Parameter des Testbeispiels sind:

- Stauhöhe  $H = 4$  m
- Breschenbreite  $B = 8$  m
- Korndurchmesser  $D = 0.12$  m
- Sohlgefälle  $S = 2\%$
- Speichervolumen  $Vol = 10'000$  m<sup>3</sup>

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  $Vol_0 < 4000$
- 3) Berücksichtigung der lateralen Ausbreitung

#### 3.3.1 Abflussintensitäten in Strahlmitte für den unendlich grossen Speicher

- Längenskala:  $L_o = \sqrt{8 \times 4} = 5.7$  m
- dimensionsloser Abstand von der Bresche:  $X_o = 100 / 5.7 = 17.5$
- Skala des spez. Abflusses:  $Q = \sqrt{8} \times 4 \left( \frac{4}{30 \times 0.12} \right)^{1/10} = 11.4$  m<sup>2</sup>/s
- Skala der Fliessgeschwindigkeit:  $V = \sqrt{9.81 \times 4} \left( \frac{4}{30 \times 0.12} \right)^{1/4} = 6.4$  m/s
- dimensionsloser spez. Abfluss:  $q / Q$  ( $X=17.5$ ; 2%) = 0.08 *(aus Diagramm A – a)*
- dimensionslose Fliessgeschwindigkeit:  $v / V$  ( $X=17.5$ ; 2%) = 0.35 *(aus Diagramm A – b)*
- effektiver spezifischer Abfluss:  $q = 0.08 \times 11.4 = \mathbf{0.90}$  m<sup>2</sup>/s
- effektive Fliessgeschwindigkeit:  $v = 0.35 \times 6.4 = \mathbf{2.25}$  m/s
- Abflusshöhe:  $h = 0.9 / 2.25 = 0.40$  m
- Energiehöhe:  $h_e = 0.40 + 2.25^2 / 19.6 = 0.66$  m

#### 3.3.2 Berücksichtigung der Speichergösse

- dimensionsloses Speichervolumen:  $Vol_0 = \left( \frac{10'000}{8 \times 4^2} \right) = 78$
- dimensionsloser Breschenabstand für den spezifischen Abfluss:  $X_{min} = 2.5 \times 78^{1/3} = 10.7$   
(mit  $k = 2.5$  aus Abbildung 4)
- modifizierte Längenskala für den spez. Abfluss:  $L = 5.7 \left( \frac{4000}{78} \right)^{1/5} \left( \frac{17.5 - 10.7}{10.7} \right)^{1/5} = 5.7 \times 0.61 = 3.45$  m
- dimensionsloser Abstand von der Bresche:  $X = 100 / 3.45 = 29$
- dimensionsloser spez. Abfluss:  $q / Q$  ( $X=29$ ; 2%) = 0.062 *(aus Diagramm A – a)*
- dimensionsloser Breschenabstand für die Fliessgeschwindigkeit:  $X_{min} = 3.0 \times 78^{1/3} = 12.8$   
(mit  $k = 3.0$  aus Abbildung 4)



- modifizierte Längenskala für die Fließgeschwindigkeit:  $L = 5.7 \left( \frac{4000}{78} \right)^{\left( \frac{17.5 - 12.8}{12.8} \right) \frac{1}{7}} = 5.7 \times 0.81 = 4.65 \text{ m}$
- dimensionsloser Abstand von der Bresche:  $X = 100 / 4.65 = 22$
- dimensionslose Fließgeschwindigkeit:  $v / V (X=22; 2\%) = 0.33$  (aus Diagramm A – b)
- effektiver spezifischer Abfluss:  $q = 0.062 \times 11.4 = 0.70 \text{ m}^2/\text{s}$
- effektive Fließgeschwindigkeit:  $v = 0.33 \times 6.4 = 2.1 \text{ m/s}$
- Abflusshöhe:  $h = 0.70 / 2.1 = 0.35 \text{ m}$
- Energiehöhe:  $h_e = 0.35 + 2.1^2 / 19.6 = 0.60 \text{ m}$

### 3.3.3 Berücksichtigung der lateralen Ausbreitung

- dimensionslose Distanz von der Strahlachse  $Y = 30 / 3.45 = 8.7$   
(verwendet wird die dimensionslose Länge für den spez. Abfluss)
- laterale Ausbreitung aus Diagramm B:  $Y_{\max} (X=29; 2\%) = 20.5$  (aus Diagramm B)  
 $Y_{\text{rel}} = 8.7 / 20.5 = 0.42$
- Querprofilwerte aus Diagramm C:  $c_q(Y_{\text{rel}}=0.42) = 0.66$ ;  $c_v(Y_{\text{rel}}=0.42) = 0.84$  (aus Diagramm C)
- effektiver spezifischer Abfluss:  $q = 0.70 \times 0.66 = 0.46 \text{ m}^2/\text{s}$
- effektive Fließgeschwindigkeit:  $v = 2.1 \times 0.84 = 1.76 \text{ m/s}$
- Abflusshöhe:  $h = 0.46 / 1.76 = 0.26 \text{ m}$
- Energiehöhe:  $h_e = 0.26 + 1.76^2 / 19.6 = 0.42 \text{ m}$

### 3.4 Programmierung des Verfahrens

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

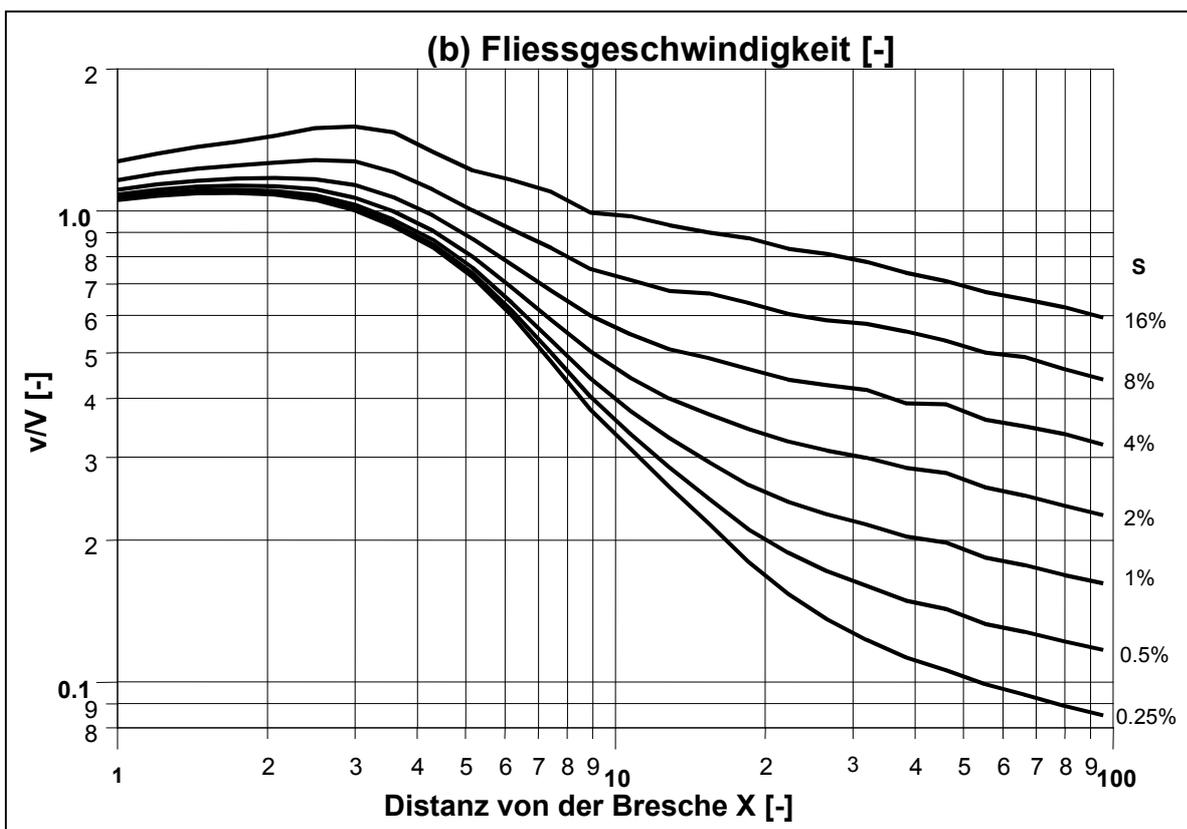
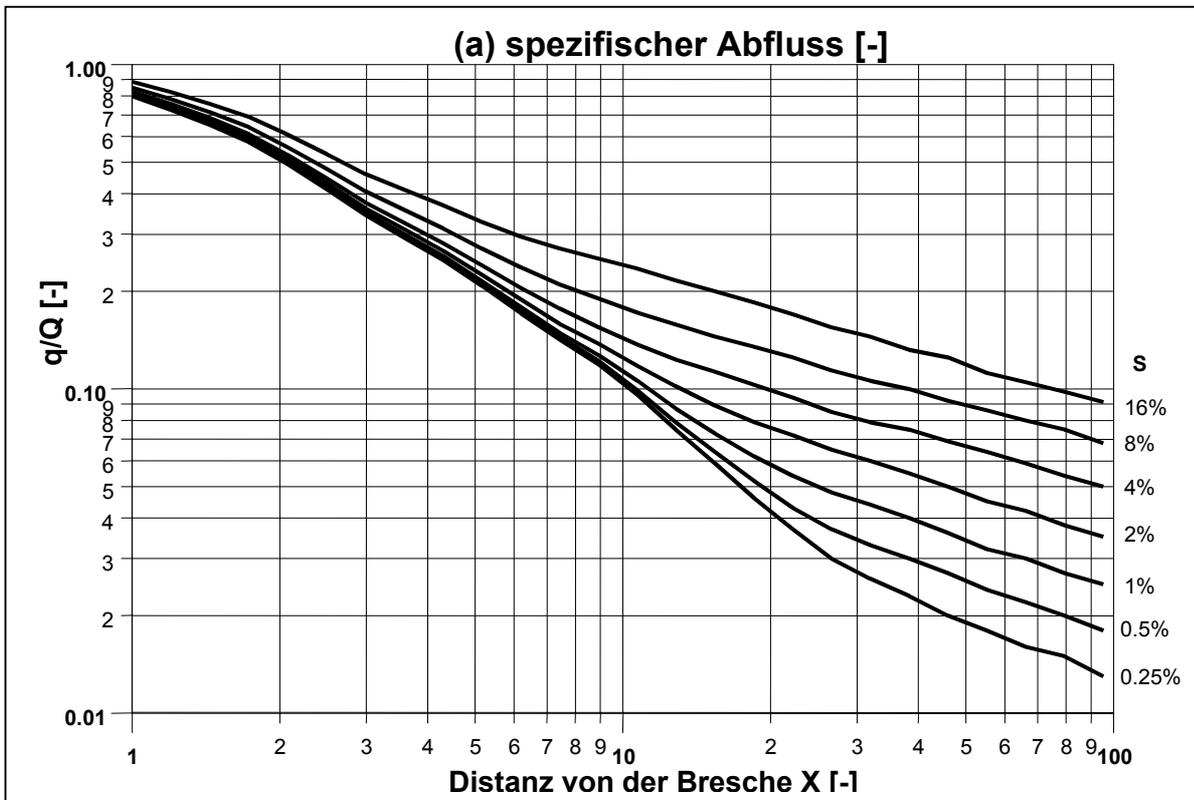
Um die Anwendung zu erleichtern und Fehler möglichst auszuschliessen, ist das Parameterverfahren deshalb auch als Computerprogramm realisiert worden. Die empfohlene Durchführung von mehreren Berechnungsgängen mit veränderten Eingabeparametern im Sinne einer Sensitivitätsanalyse wird damit ohne grossen Aufwand möglich. Auch die Standortsuche wird durch ein Computerprogramm wesentlich erleichtert.

## 4. Diagramme und Tabellen

- **Diagramm A:** Längenprofile der maximalen Abflussintensitäten auf der Strahlachse in Funktion des Längsgefälles für den spezifischen Abfluss (a) und die Fließgeschwindigkeit (b)
- **Diagramm B:** Laterale Ausbreitung des Abflusstrahles für verschiedene Sohlengefälle
- **Diagramm C:** Charakteristische Querprofile der Abflussintensitäten
- **Tabelle A1:** Werte für den dimensionslosen maximalen spezifischen Abfluss (a)
- **Tabelle A2:** Werte für die dimensionslose maximale Fließgeschwindigkeit (b)
- **Tabelle B:** Werte der lateralen Ausbreitung
- **Tabelle C:** Werte der charakteristischen Querprofile
- **Tabelle für die Berechnung:** Vorgehen bei der Anwendung des 2D-Verfahrens.

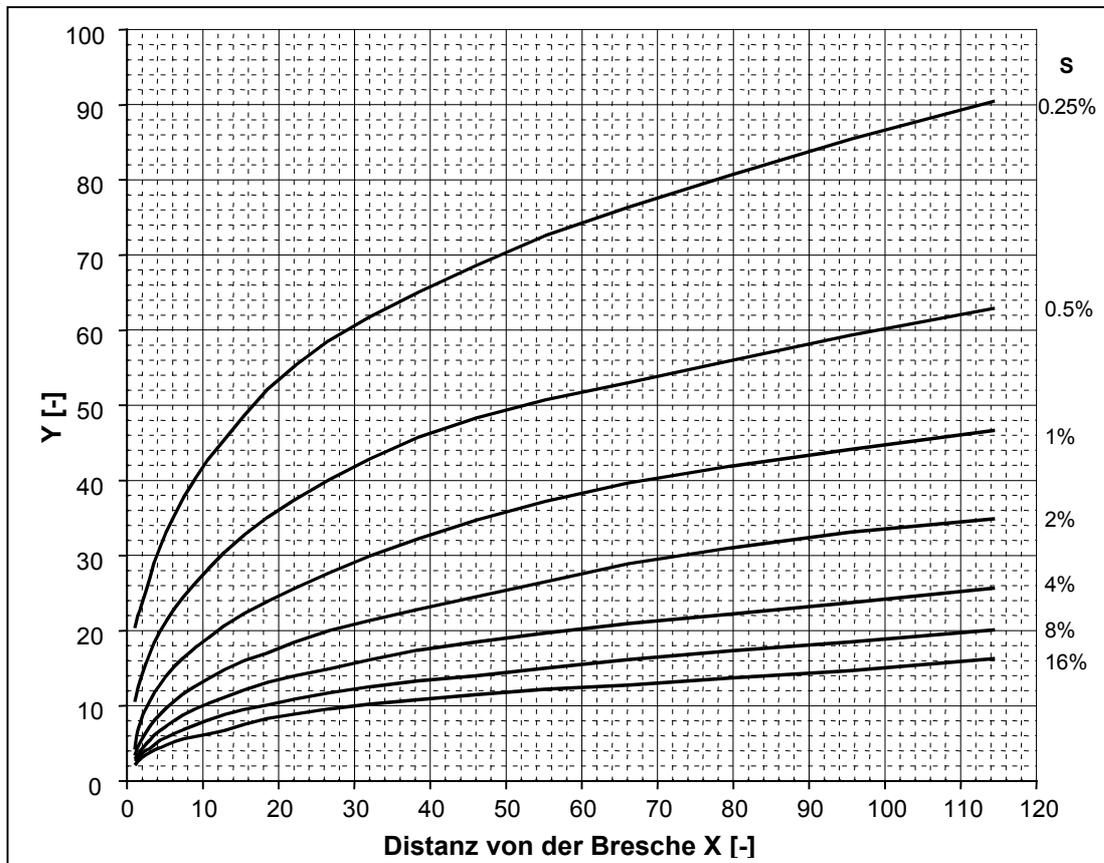


- **Diagramm A:** Längenprofile der maximalen Abflussintensitäten auf der Strahlachse in Funktion des Längsgefälles für den spezifischen Abfluss und die Fließgeschwindigkeit

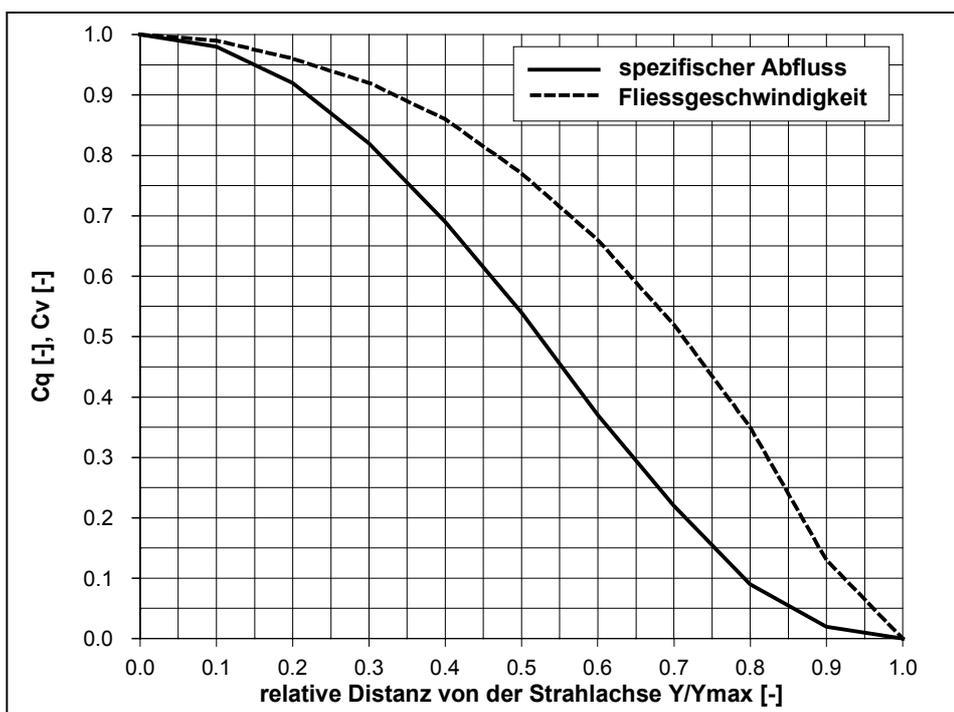




**Diagramm B: Laterale Ausbreitung des Abflussstrahles für verschiedene Sohlengefälle**



**Diagramm C: Charakteristische Querprofile der Abflussintensitäten**





**Tabelle A1: Werte für den dimensionslosen maximalen spezifischen Abfluss  $q/Q$  [-]**

Distanz	Gefälle [%]						
	0.25	0.5	1	2	4	8	16
1.00	0.798	0.804	0.806	0.817	0.827	0.850	0.884
1.20	0.725	0.730	0.733	0.744	0.756	0.782	0.822
1.44	0.652	0.657	0.660	0.672	0.685	0.713	0.758
1.73	0.577	0.582	0.586	0.597	0.611	0.641	0.690
2.07	0.494	0.499	0.502	0.513	0.528	0.558	0.609
2.49	0.413	0.417	0.421	0.432	0.446	0.477	0.530
2.99	0.344	0.347	0.351	0.361	0.376	0.407	0.460
3.58	0.293	0.297	0.301	0.311	0.326	0.357	0.411
4.30	0.250	0.253	0.257	0.267	0.282	0.313	0.368
5.16	0.208	0.211	0.215	0.225	0.241	0.271	0.327
6.19	0.171	0.174	0.179	0.189	0.205	0.237	0.295
7.43	0.142	0.145	0.149	0.159	0.177	0.210	0.271
8.92	0.119	0.122	0.127	0.138	0.155	0.190	0.252
10.7	0.096	0.099	0.106	0.118	0.137	0.172	0.235
12.8	0.075	0.079	0.087	0.102	0.123	0.158	0.216
15.4	0.059	0.064	0.073	0.089	0.113	0.145	0.200
18.5	0.046	0.052	0.062	0.079	0.103	0.135	0.185
22.2	0.037	0.043	0.054	0.072	0.094	0.125	0.170
26.6	0.030	0.037	0.048	0.065	0.085	0.114	0.155
31.9	0.026	0.033	0.044	0.060	0.079	0.106	0.145
38.3	0.023	0.030	0.040	0.055	0.075	0.100	0.132
46.0	0.020	0.027	0.036	0.050	0.069	0.092	0.125
55.2	0.018	0.024	0.032	0.045	0.064	0.086	0.112
66.2	0.016	0.022	0.030	0.042	0.059	0.080	0.105
79.5	0.015	0.020	0.027	0.038	0.054	0.075	0.098
95.4	0.013	0.018	0.025	0.035	0.050	0.068	0.091
114.5	0.012	0.017	0.023	0.032	0.048	0.065	0.083

**Tabelle A2: Werte für die dimensionslose maximale Fließgeschwindigkeit  $v/V$  [-]**

Distanz	Gefälle [%]						
	0.25	0.5	1	2	4	8	16
1.00	1.055	1.060	1.067	1.083	1.109	1.164	1.274
1.20	1.078	1.084	1.091	1.109	1.139	1.201	1.324
1.44	1.091	1.098	1.106	1.126	1.160	1.230	1.367
1.73	1.093	1.100	1.110	1.133	1.172	1.250	1.401
2.07	1.083	1.091	1.103	1.129	1.175	1.267	1.445
2.49	1.056	1.066	1.080	1.112	1.168	1.283	1.500
2.99	1.002	1.013	1.030	1.068	1.135	1.274	1.510
3.58	0.928	0.940	0.958	0.998	1.069	1.208	1.470
4.30	0.836	0.849	0.868	0.908	0.978	1.110	1.333
5.16	0.724	0.737	0.757	0.800	0.872	1.003	1.219
6.19	0.599	0.614	0.638	0.687	0.768	0.913	1.163
7.43	0.478	0.499	0.530	0.586	0.677	0.834	1.096
8.92	0.378	0.403	0.440	0.503	0.599	0.753	0.991
10.7	0.313	0.336	0.376	0.443	0.547	0.713	0.975
12.8	0.260	0.286	0.330	0.400	0.509	0.677	0.933
15.4	0.217	0.245	0.293	0.370	0.487	0.668	0.900
18.5	0.180	0.211	0.262	0.344	0.462	0.637	0.876
22.2	0.154	0.188	0.241	0.324	0.439	0.605	0.831
26.6	0.136	0.172	0.227	0.310	0.427	0.586	0.811
31.9	0.123	0.160	0.216	0.299	0.417	0.576	0.780
38.3	0.113	0.149	0.204	0.285	0.391	0.555	0.740
46.0	0.106	0.143	0.198	0.278	0.389	0.530	0.710
55.2	0.099	0.133	0.184	0.259	0.361	0.501	0.674
66.2	0.094	0.128	0.177	0.249	0.349	0.490	0.650
79.5	0.089	0.122	0.169	0.237	0.336	0.462	0.625
95.4	0.085	0.117	0.162	0.226	0.319	0.439	0.594
114.5	0.082	0.113	0.156	0.218	0.319	0.420	0.580

Das hier vorgestellte Parameterverfahren zur raschen Abschätzung der Überflutung an vorgegebenem Standort infolge zweidimensionaler Ausbreitung einer Flutwelle wurde im Oktober 2002 von Dr. C. Beffa, Schwyz, im Auftrag des Bundesamtes für Wasser und Geologie entwickelt.



**Tabelle B: Werte für die laterale Ausbreitung**  
 $Y_{max}$  [-]

Distanz	Gefälle [%]						
	0.25	0.5	1	2	4	8	16
1.00	20.3	10.5	4.2	3.4	2.9	2.6	2.1
1.20	21.2	11.4	5.8	4.0	3.2	2.8	2.3
1.44	22.1	12.4	6.8	4.6	3.5	3.1	2.6
1.73	22.9	13.4	7.7	5.2	4.0	3.4	2.9
2.07	24.0	14.5	8.8	5.8	4.4	3.8	3.2
2.49	25.3	15.7	9.7	6.5	4.9	4.1	3.5
2.99	27.0	17.0	10.7	7.3	5.4	4.3	3.8
3.58	29.1	18.4	11.7	8.0	6.1	4.8	4.1
4.30	31.1	19.9	12.8	8.8	6.7	5.4	4.4
5.16	33.2	21.3	14.0	9.7	7.3	5.8	4.8
6.19	35.3	22.9	15.2	10.6	8.0	6.3	5.2
7.43	37.7	24.5	16.4	11.6	8.8	6.8	5.6
8.92	40.2	26.3	17.7	12.6	9.6	7.4	5.9
10.7	42.8	28.2	19.0	13.6	10.3	8.1	6.2
12.8	45.4	30.4	20.7	14.8	11.1	8.8	6.7
15.4	48.6	32.7	22.3	16.0	12.1	9.5	7.5
18.5	52.1	35.1	23.9	17.0	13.1	10.1	8.3
22.2	55.3	37.5	25.7	18.5	14.0	10.9	8.9
26.6	58.6	40.1	27.7	20.0	14.9	11.7	9.6
31.9	61.7	42.8	29.9	21.3	16.1	12.5	10.2
38.3	65.0	45.7	32.2	22.8	17.4	13.3	10.8
46.0	68.6	48.3	34.7	24.5	18.5	14.0	11.5
55.2	72.6	50.7	37.2	26.5	19.7	15.0	12.2
66.2	76.4	53.0	39.7	28.9	21.0	16.2	12.8
79.5	80.6	55.9	41.9	31.0	22.2	17.3	13.7
95.4	85.4	59.3	44.1	33.1	23.7	18.5	14.7
114.5	90.5	62.9	46.7	34.9	25.7	20.1	16.3

**Liste der verwendeten Bezeichnungen**

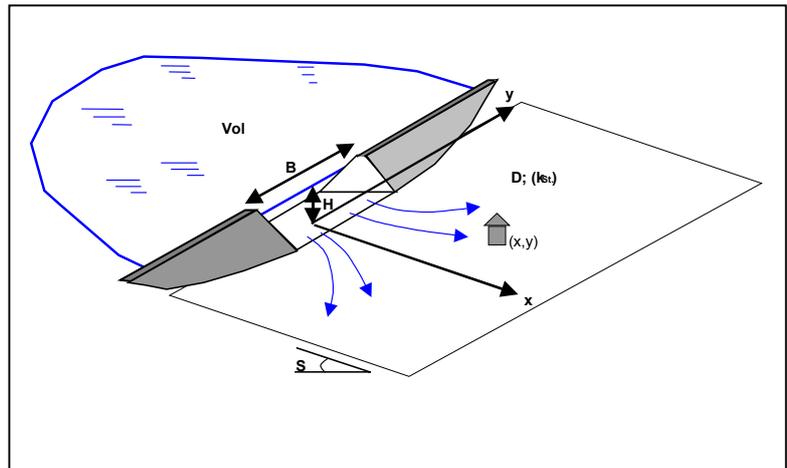
- B - Breschenbreite
- $C_q$  - skaliertes spezifisches Abfluss
- $C_v$  - skalierte Fließgeschwindigkeit
- D - mittlerer Korndurchmesser des Sohlenmaterials
- g - Erdbeschleunigung
- h - Abflusshöhe
- H - Stauhöhe am Fuss der Sperre
- $h_e$  - Energiehöhe  $=h+v^2/(2g)$
- $k_{st}$  - Strickler-k-Wert
- L - horizontale Längenskala für endliche Speichergrösse
- $L_o$  - horizontale Längenskala für unendliche Speichergrösse
- q - spezifischer Abfluss (= Abflusshöhe x Fließgeschwindigkeit)
- Q - Skala des spezifischen Abflusses
- S - Längsgefälle der Sohle
- v - Fließgeschwindigkeit
- V - Skala der Fließgeschwindigkeit
- Vol - Speichervolumen
- $Vol_o$  - dimensionsloses Speichervolumen
- $Vol_{max}$  - dimensionsloses Speichervolumen, das im Untersuchungsperimeter zu keiner relevanten Reduktion der Abflussintensitäten führt
- x - Entfernung von der Sperre
- X - skalierte Entfernung von der Bresche für endliche Speichergrösse
- $X_o$  - skalierte Entfernung von der Bresche für unendliche Speichergrösse
- $X_{min}$  - skalierte Entfernung von der Bresche, wo der Einfluss der Speichergrösse wirksam wird
- y - Entfernung von der Strahlachse
- Y - skalierte Entfernung von der Strahlachse für endliche Speichergrösse
- $Y_o$  - skalierte Entfernung von der Strahlachse für unendliche Speichergrösse
- $Y_{max}$  - skalierte maximale Entfernung von der Strahlachse (=Überflutungsgrenze)
- $Y_{rel}$  - relative Entfernung von der Strahlachse bezogen auf die Überflutungsgrenze

**Tabelle C: Werte der charakteristischen Querprofile**

Distanz	spezifischer Abfluss	Fließgeschwindigkeit
0.00	1.00	1.00
0.10	0.98	0.99
0.20	0.92	0.96
0.30	0.82	0.92
0.40	0.69	0.86
0.50	0.54	0.77
0.60	0.37	0.66
0.70	0.22	0.52
0.80	0.09	0.35
0.90	0.02	0.13
1.00	0.00	0.00

**Tabelle für die Berechnung: Vorgehen bei der Anwendung des 2D-Verfahrens**

Für die nach dem Berechnung der Überflutungsintensität im 2D-Fall (Beffa-Verfahren) kann nach dem untenstehenden Schema vorgegangen werden. Es ist darauf hinzuweisen, dass das Verfahren nur gültig ist, wenn das Gelände, auf dem die Flutwelle sich ausbreitet, eine schiefe Ebene bildet.



**Berechnungstabelle für 2D-Breschenabfluss**

<b>Parameter und Berechnungsgrößen:</b>	<i>Input, Berechnungsformeln</i>	<i>Dimen sionen</i>	<i>Bemerkungen</i>
<b>Parameter:</b>			
Stauhöhe	H	m	
Breschenbreite	B	m	
Sohlgefälle	S	%	
mittlerer Korndurchmesser	D	m	(s. Abbildung 3)
Speichervolumen	Vol	m <sup>3</sup>	
Abflussverhältnisse in Punkt (x,y), Distanz von der Sperre:	x	m	
laterale Distanz von der Strahlachse:	y	m	

**Berechnungen:**

Dimensionsloses Speichervolumen	$Vol_0 = Vol/(BH^2)$		
<b>A) Abfluss für endliche Speichergrosse</b>	<b><math>Vol_0 &lt; 4000</math></b>		
<b>Skalierte Grössen:</b>			
Länge	$L_0 = (BH)^{0.5}$	m	
Dimensionloser Breschenabstand	$X_0 = x/L_0$		



Koeffizient für spezifischen Abfluss:	für ( $X_o < 6$ ): für ( $X_o / 6$ ):	$n = 0$ $n = 0.1$		
Spezifischer Abfluss		$Q_o = (B)^{0.5} \cdot H(H/30D)^n$	$m^2/s$	
Koeffizient für spezifische Geschwindigkeit:	für ( $X_o < 6$ ): für ( $X_o / 6$ ):	$n = 0.1$ $n = 0.25$		
Spezifische Geschwindigkeit		$V_o = (gH)^{0.5} (H/30D)^n$	$m/s$	
Faktor $k_q$ für die Ermittlung von $X_{min}$	für $S \leq 2\%$ : für $S > 2\%$ :	$k_q = 2.5$ $k_q = 2 \cdot S^{1/3}$		(entspricht Tabelle in Abbildung 4)
Breschenabstand für spezifischen Abfluss		$X_{min} = k_q \cdot Vol_o^{(1/3)}$		
Modifizierte Länge für Abfluss		$L = L_o(4000/Vol_o)^{-(X_o - X_{min})/5/X_{min}}$		
Dimensionsloser Breschenabstand		$X = x / L$		$\Rightarrow$ Diagramm A-a und B
Dimensionsloser spez. Abfluss		$q / Q [X, S]$		$\Leftarrow$ Diagramm A-a: $q/Q$
Faktor $k_v$ für die Ermittlung von $X_{min}$	für $S \leq 4\%$ : für $S > 4\%$ :	$k_v = 3.0$ $k_v = 2 \cdot S^{1/3}$		
Dimensionsloser Breschenabst. für Fließgeschwindigkeit		$X_{min} = k_v \cdot Vol_o^{1/3}$		
Modifizierte Länge für Fließgeschwindigkeit		$\underline{L} = L_o(4000/Vol_o)^{-(X_o - X_{min})/7/X_{min}}$		
Dimensionsloser Breschenabstand		$\underline{X} = x / \underline{L}$		$\Rightarrow$ Diagramm A-b: $v/V$
Dimensionlose Fließgeschwindigkeit		$v/V [X; S]$		$\Leftarrow$ Diagramm A-b: $v/V$
Effektive Größen in Strahlachse für		$x$	$m$	
Spezifischer Abfluss		$\underline{q} = (q/Q) \cdot Q_o$	$m^2/s$	
Fließgeschwindigkeit		$\underline{v} = (v/V) \cdot V_o$	$m/s$	
Abflusshöhe		$\underline{h} = \underline{q} / \underline{v}$	$m$	
Energiehöhe		$\underline{h}_e = \underline{h} + \underline{v}^2/2g$	$m$	
<b>Laterale Ausbreitung:</b>				
Relative Distanz von Strahlachse bezüglich modifiz. Länge		$Y = y / L$	$m$	L aus modifizierter Länge für Abfluss
Laterale Ausbreitung		$Y_{max}[X, S]$		$\Leftarrow$ Diagr. B: lat. Ausbreitung
Relative laterale Ausbreitung		$\hat{Y} = Y / Y_{max}$		$\Rightarrow$ Diagramm C: Querprofil
Querprofilwert für Abfluss		$c_q(\hat{Y})$		$\Leftarrow$ Diagramm C: Querprofil
Querprofilwert für Fließgeschwindigkeit		$c_v(\hat{Y})$		$\Leftarrow$ Diagramm C: Querprofil
Effektive Größen im Punkt x und		$y$	$m$	
Spezifischer Abfluss		$q' = \underline{q} \cdot c_q$	$m^2/s$	
Fließgeschwindigkeit		$v' = \underline{v} \cdot c_v$	$m/s$	
Abflusshöhe		$h' = \underline{q} / \underline{v}$	$m$	
Energiehöhe		$h_e' = \underline{h} + \underline{v}^2/2g$	$m$	



<b>B) Abfluss für sehr grossen Speicher</b>	<b>Vol<sub>0</sub> / 4000</b>		<b>"unendliche" Speichergrosse</b>
<i>Skalierte Grössen:</i>			
Länge	$L_o = (BH)^{0.5}$	m	
Dimensionsloser Breschenabstand	$X_o = x/L_o$		⇒ Diagramm A: q/Q und v/V
Koeffizient für spezifischen Abfluss:	für ( $X_o < 6$ ): für ( $X_o / 6$ ):	n = 0 n = 0.1	
Spezifischer Abfluss	$Q_o = (B)^{0.5} \cdot H(H/30D)^n$	m <sup>2</sup> /s	
Koeffizient für spezifische Geschwindigkeit:	für ( $X_o < 6$ ): für ( $X_o / 6$ ):	n = 0.1 n = 0.25	
Spezifische Geschwindigkeit	$V_o = (gH)^{0.5} (H/30D)^n$	m/s	
Dimensionsloser spezifischer Abfluss	$q/Q[X_o;S]$		⇐ Diagramm A-a: q/Q
Dimensionslose Fließgeschwindigkeit	$v/V[X_o;S]$		⇐ Diagramm A-b: v/V
<i>Effektive Grössen:</i>			
Spezifischer Abfluss	$q = (q/Q) \cdot Q_o$	m <sup>2</sup> /s	
Fließgeschwindigkeit	$v = (v/V) \cdot V_o$	m/s	
Abflusshöhe	$h = q / v$	m	
Energiehöhe	$h_e = h + v^2/2g$	m	
<i>Laterale Ausbreitung:</i>			
Relative Distanz von Strahlachse bezüglich modifiz. Länge	$Y = y / L_o$	m	
Laterale Ausbreitung	$Y_{max}[X_o;S]$		⇐ Diagr. B: lat. Ausbreitung
Relative laterale Ausbreitung	$\hat{Y} = Y / Y_{max}$		⇒ Diagramm C: Querprofil
Querprofilwert für Abfluss	$c_q(\hat{Y})$		⇐ Diagramm C: Querprofil
Querprofilwert für Fließgeschwindigkeit	$c_v(\hat{Y})$		⇐ Diagramm C: Querprofil
<i>Effektive Grössen im Punkt x und</i>			
Spezifischer Abfluss	$q'' = q \cdot c_q$	m <sup>2</sup> /s	
Fließgeschwindigkeit	$v'' = v \cdot c_v$	m/s	
Abflusshöhe	$h'' = q / v$	m	
Energiehöhe	$h_e'' = h + v^2/2g$	m	