

Die Beurteilung der besonderen Gefahr mit vereinfachten Flutwellenberechnungen



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**

Workshop kleine Talsperren
6.5.2003 **R.W. Müller**

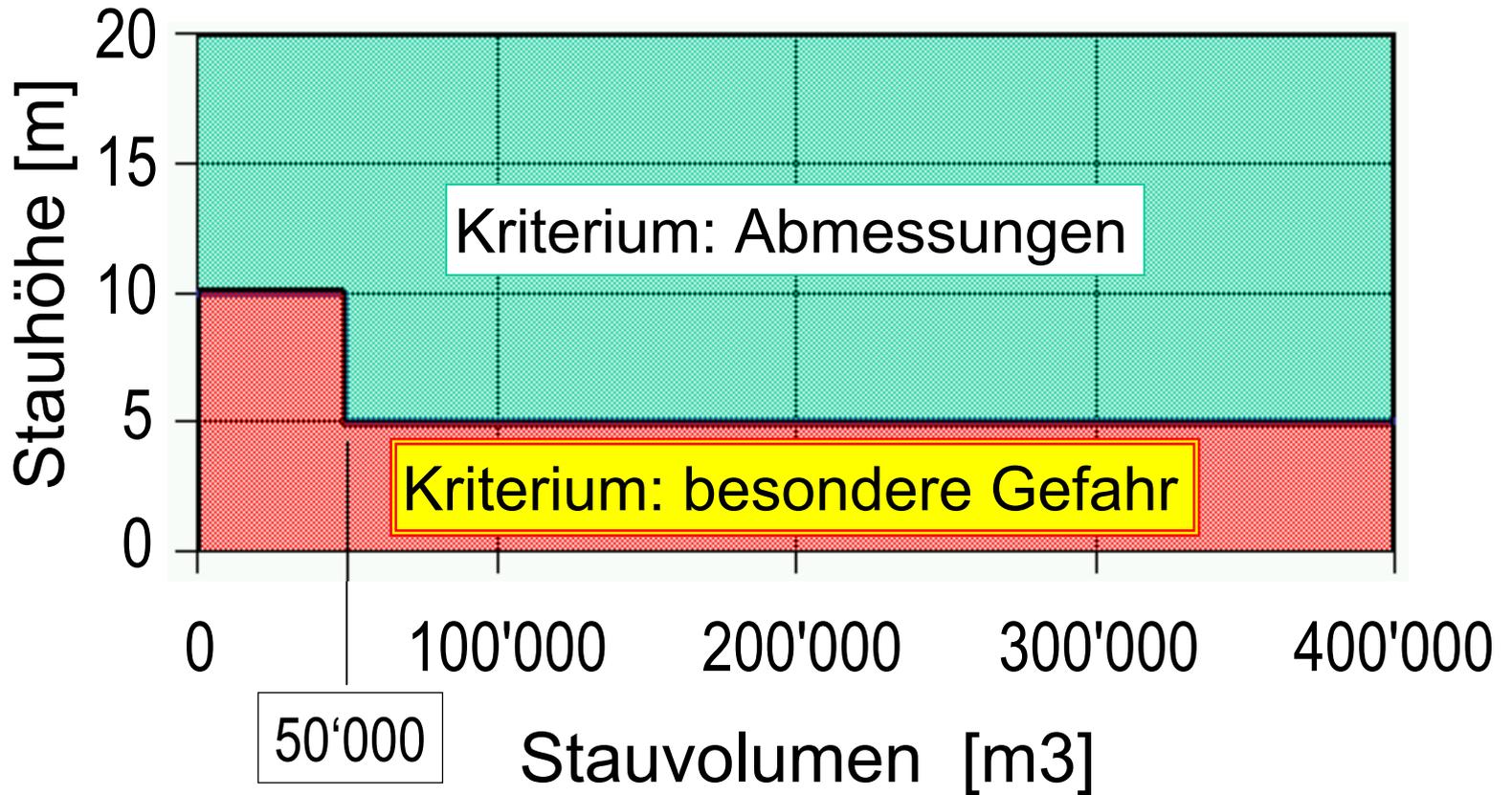
Inhalt

- Die Beurteilung der besonderen Gefahr mit vereinfachten Flutwellenberechnungen
- Unterstellung unter die StAV
- Ermittlung der „besonderen Gefahr“
- Unterstellungskriterium: „besondere Gefahr“
- Annahmen für die Flutwellenabschätzung
- Verstopfungsanfällige Hochwasserentlastungen
- Bresche 1
- Bresche 2
- Annahmen für die Breschenform
- Abfluss aus der Bresche
- Abfluss 1D oder 2D
- Vereinfachte 1D - Berechnungsmethoden
- Vereinfachtes 2D - Berechnungsverfahren
- Beispiel einer 1D - Berechnung
- Abflussgebiet der Flutwelle
- Längenprofil

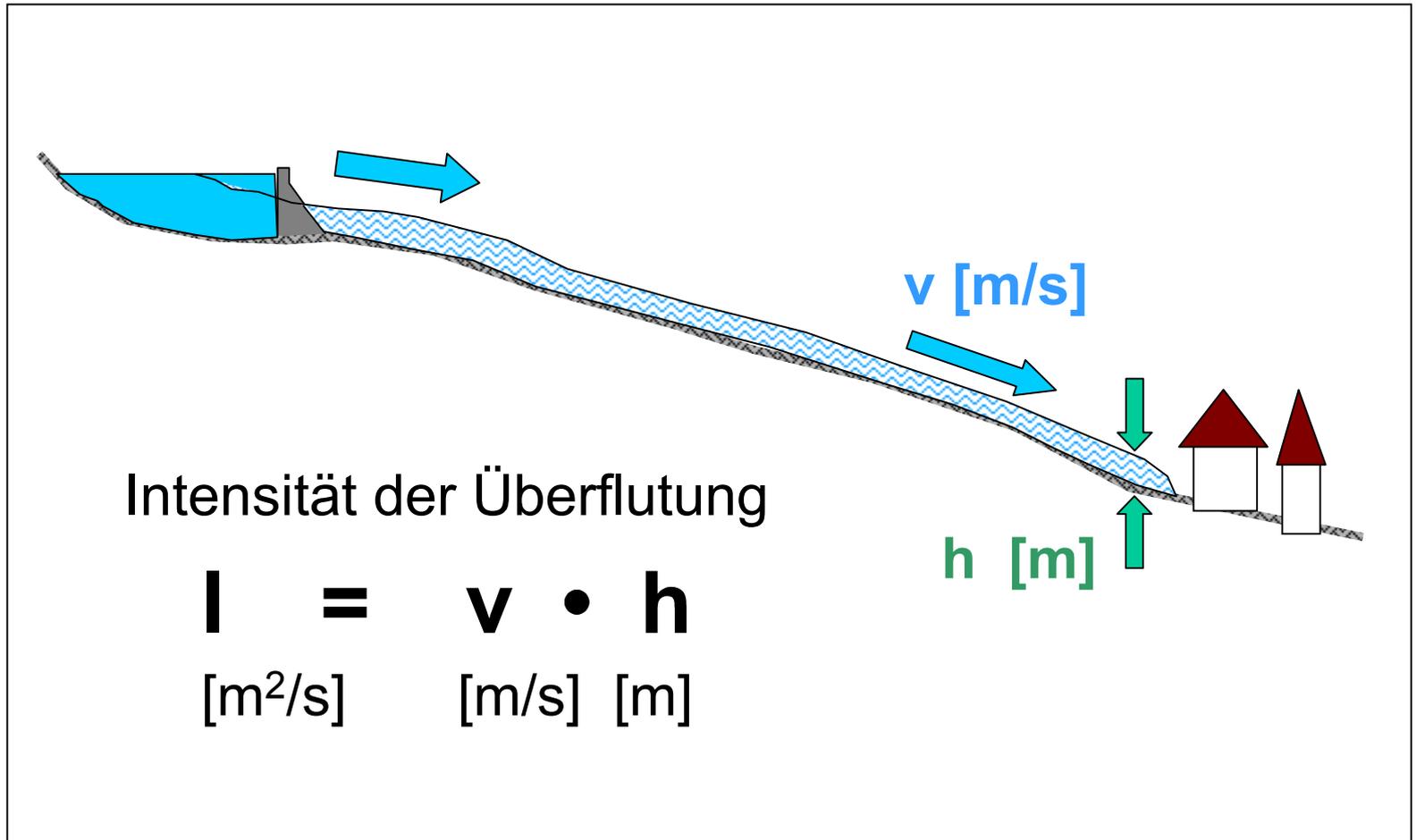
Inhalt (Fortsetzung)

- Bestimmung von Q_{max}
- Ermittlung der Wassertiefe h
- Zwischenvariable D_{max}
- Zwischenvariable U_{max}
- Bestimmung der Wassertiefe h
- Bestimmung der Fließgeschwindigkeit v
- 2D-Ausbreitung einer Flutwelle
- 2D-Berechnung mit einem einfachen Parameterverfahren
- Dimensionslose Parameter
- Spezifischer Abfluss
- Fließgeschwindigkeit
- Seitliche Ausbreitung
- Laterale Ausbreitung
- Abflussintensitäten
- Ergebnis

Unterstellung unter die StAV



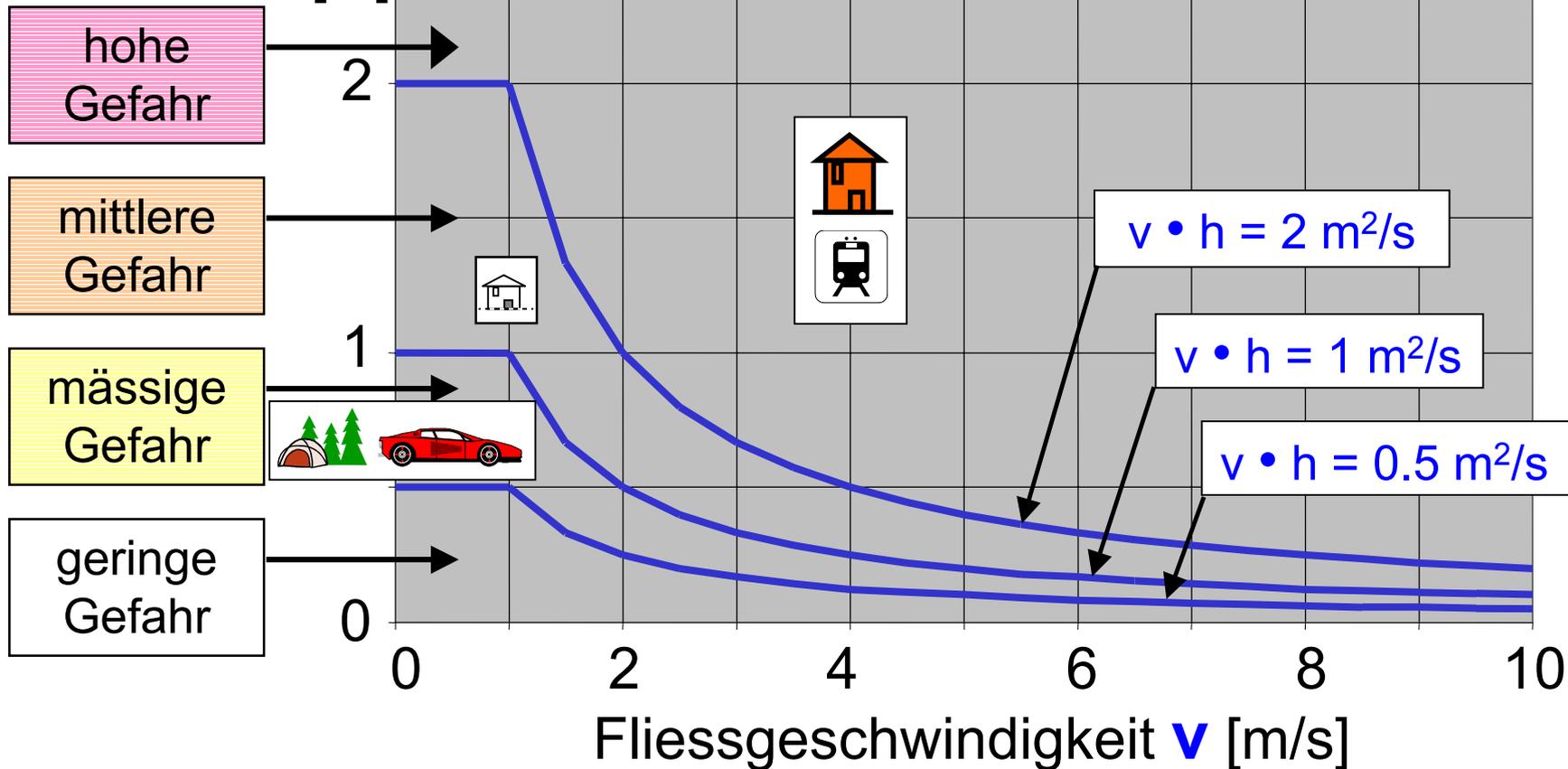
Ermittlung der „besonderen Gefahr“



Unterstellungskriterium: „besondere Gefahr“

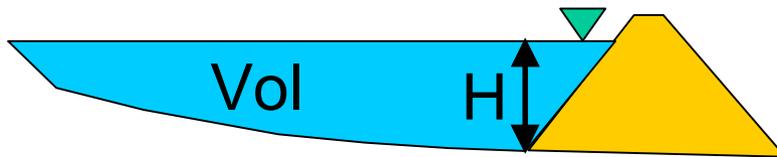
Wassertiefe

h [m]



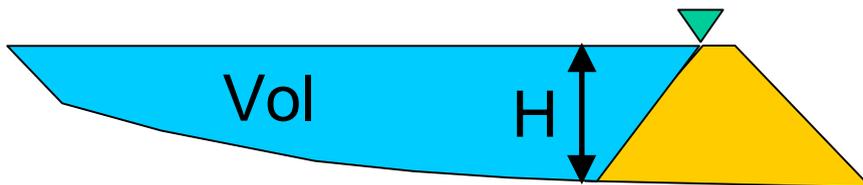
Annahmen für die Flutwellenabschätzung

Momentanbruch des gefüllten Speichers



A) übliche Annahme:

See voll gefüllt bis Stauziel



B) wenn keine oder eine
verstopfungsanfällige
Hochwasserentlastung:

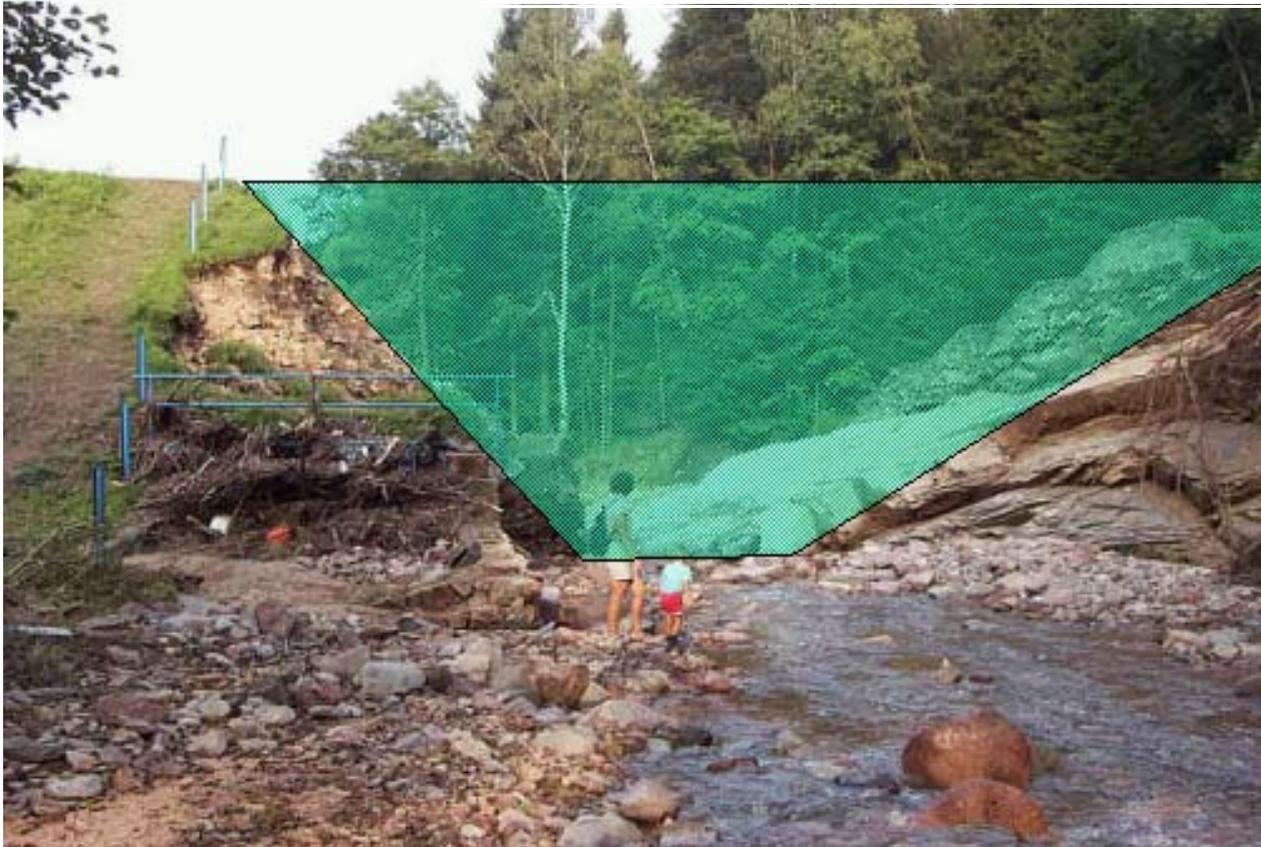
See voll gefüllt bis
Kronenkote

Verstopfungsanfällige Hochwasserentlastungen



Bresche

beim Bruch eines Hochwasser-
rückhaltebeckens bei Glashütte (D)
23.8.2002



Dammhöhe
9 m
Stauvolumen
60'000 m³

Bresche

beim Bruch des Dammes
Zeyzoun in Syrien am 5.6.2002

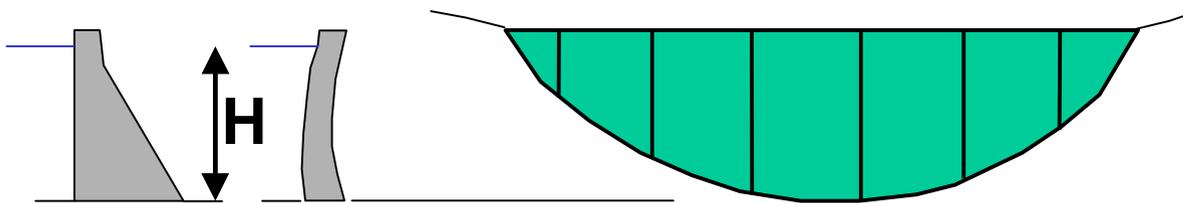
Damm



Bresche

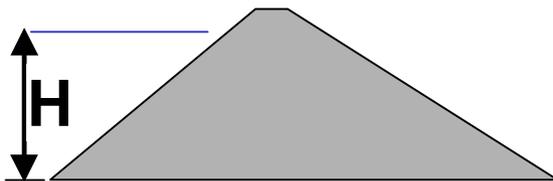
Annahmen für die Breschenform

Betonmauern:

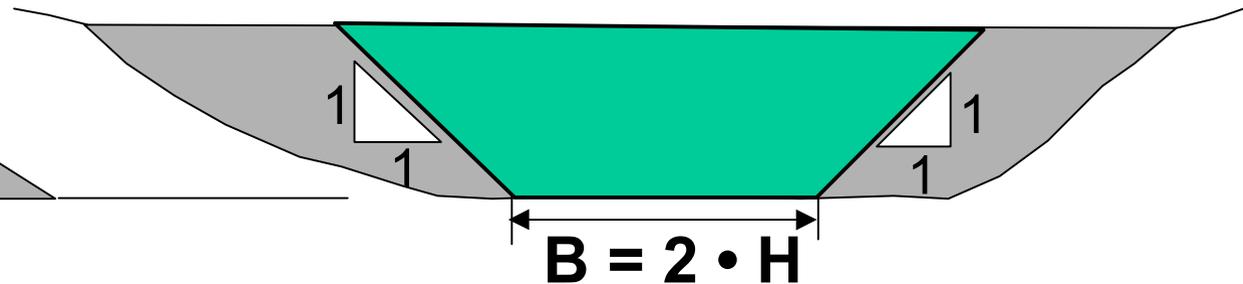


Totalbruch der gesamten Mauer

Kleinere Dämme:

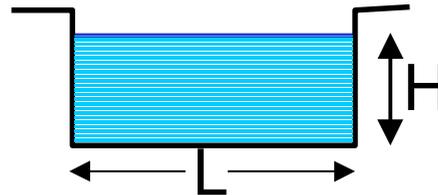


Standardbresche:



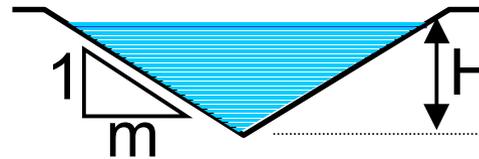
Abfluss aus der Bresche

- Rechteck



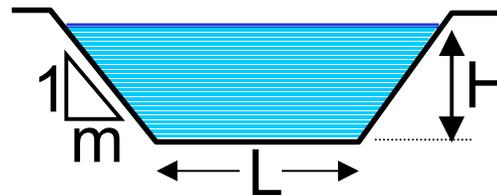
$$Q_b = 0.93 \cdot L \cdot H^{3/2}$$

- Dreieck



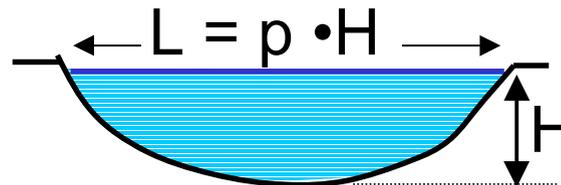
$$Q_b = 0.72 \cdot m \cdot H^{5/2}$$

- Trapez



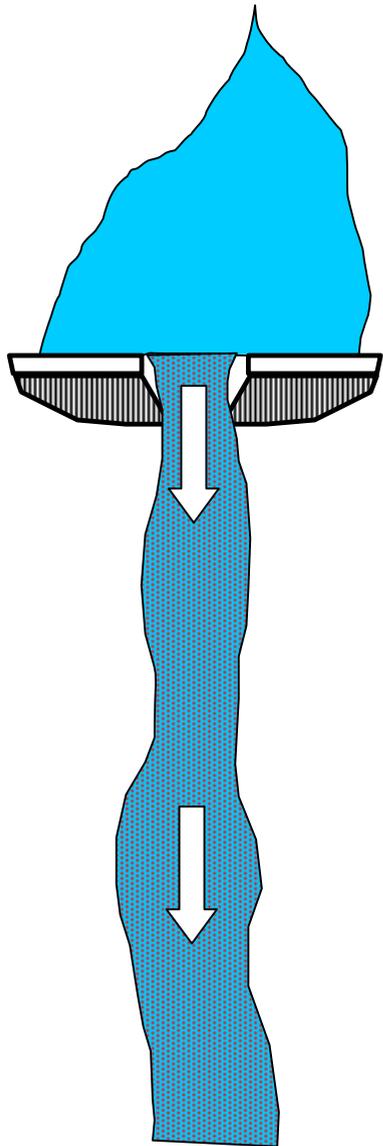
$$Q_b = 0.93 \cdot L \cdot H^{3/2} + 0.72 \cdot m \cdot H^{5/2}$$

- Parabel

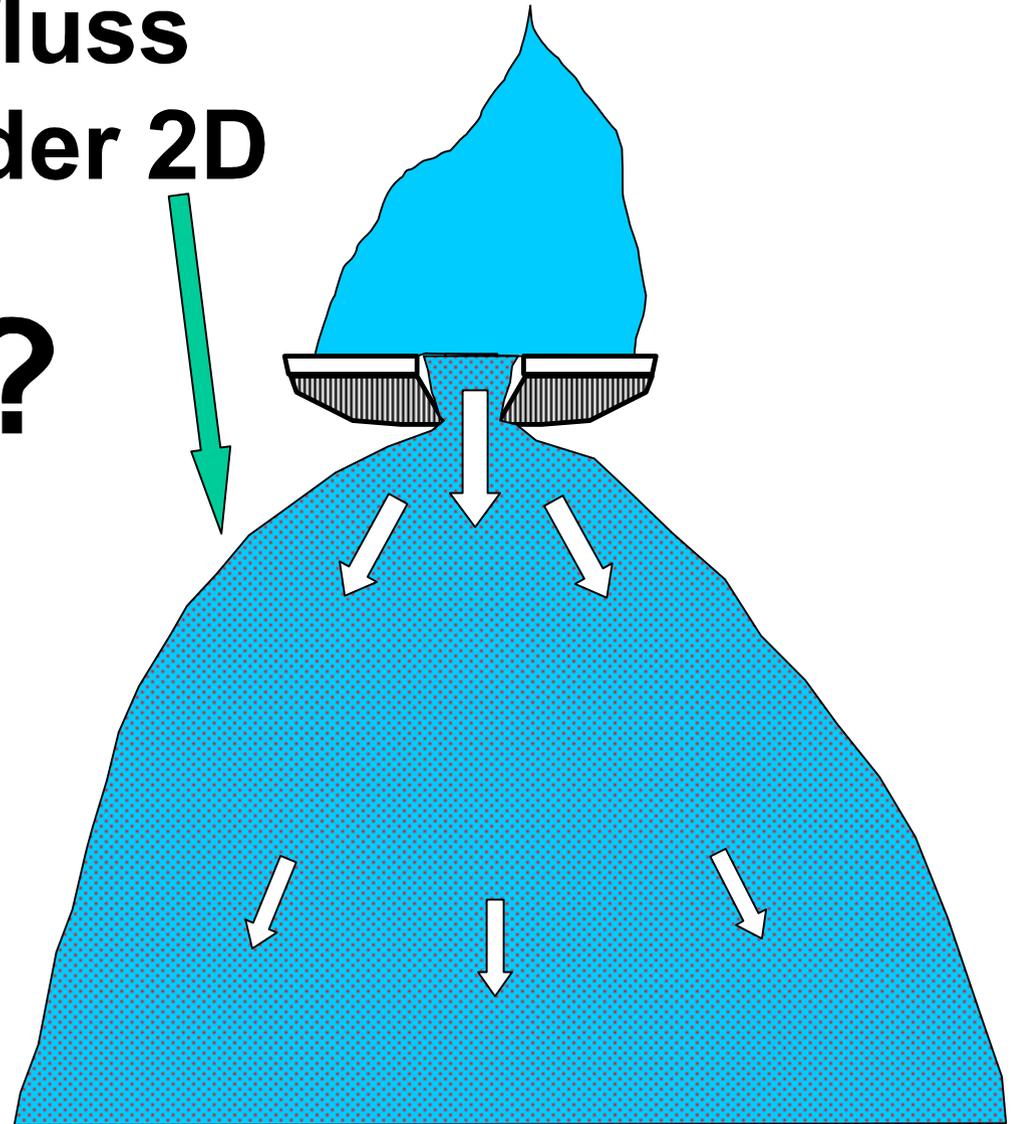


$$Q_b = 0.54 \cdot L \cdot H^{3/2}$$

Abfluss 1D oder 2D



?



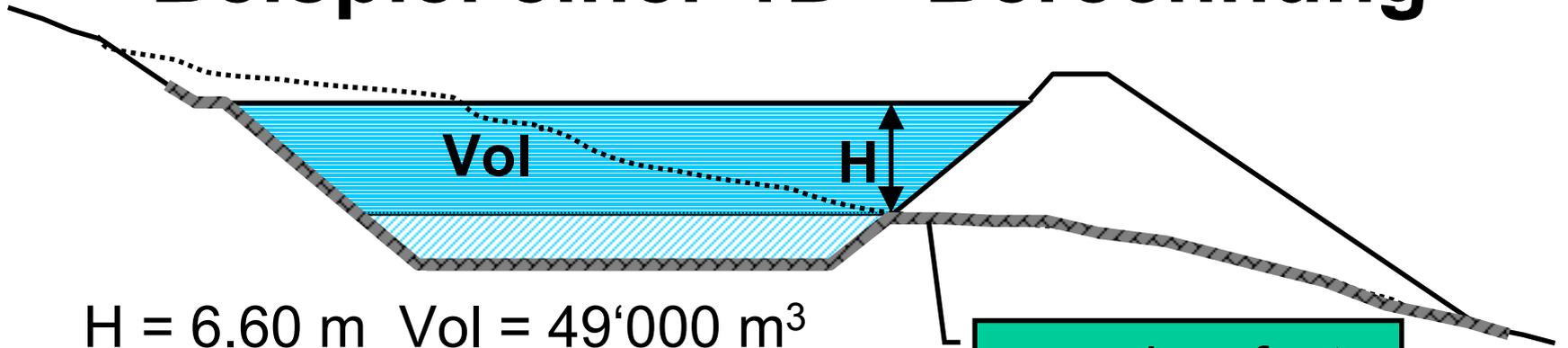
vereinfachte 1D - Berechnungsmethoden

- **CTGREF** **Handrechenverfahren**
1978
- **CASTOR** **CTGREF für PC**
1997
- **SMPDBK** **Simplified Dam-Break**
1991 **Flood Forecasting Model**

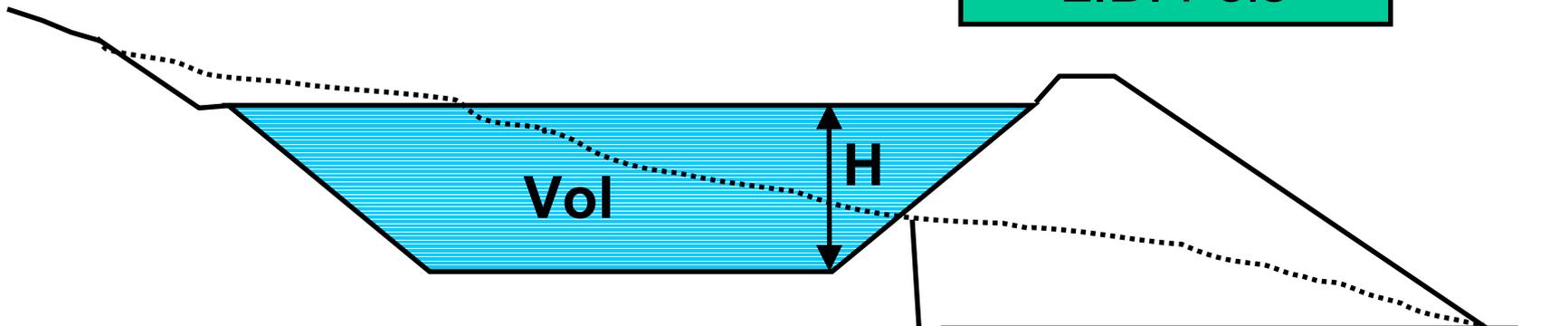
vereinfachtes 2D - Berechnungsverfahren

- **BEFFA
2001** **Parameterverfahren zur
Bestimmung der
flächigen Ausbreitung
von Breschenabflüssen**

Beispiel einer 1D - Berechnung



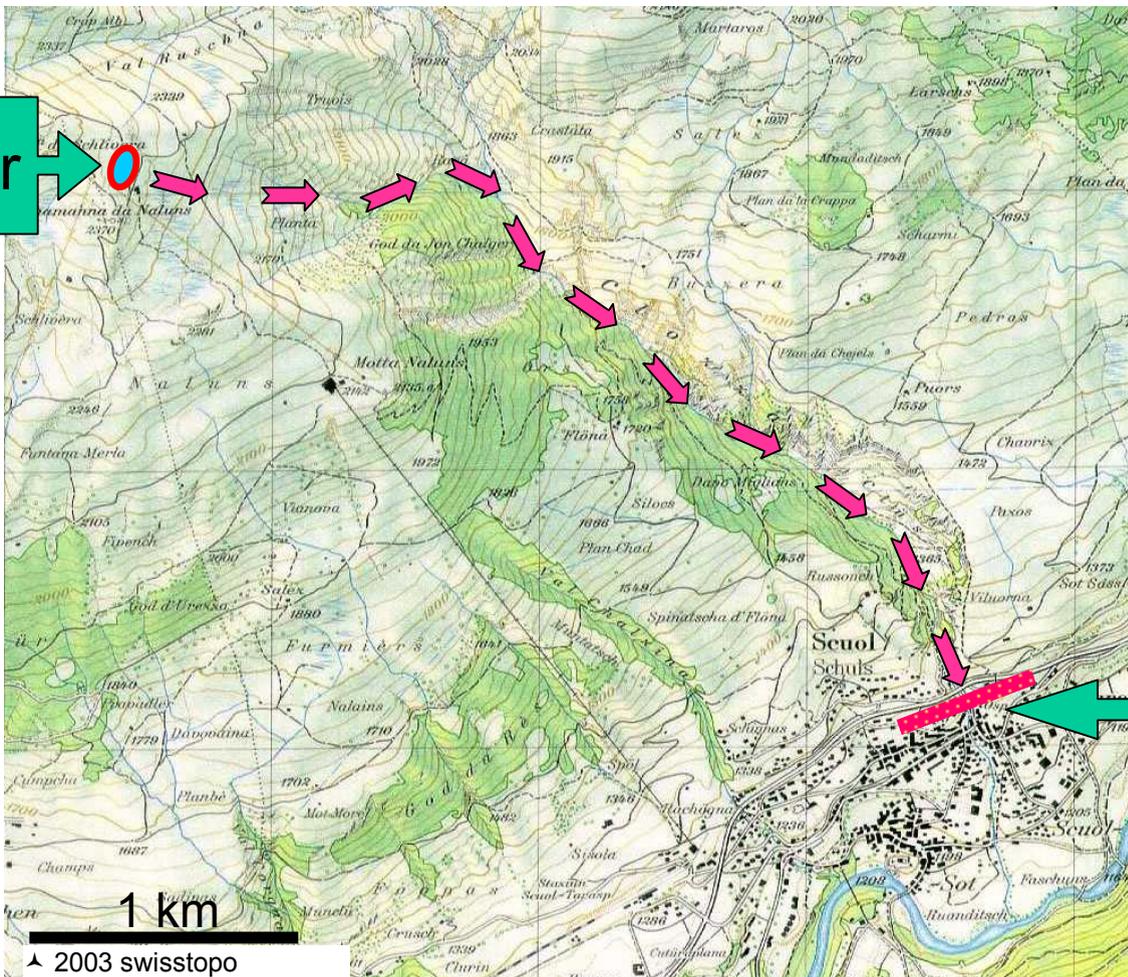
erosionsfest
z.B. Fels



nicht erosionsfest
z.B. Moräne

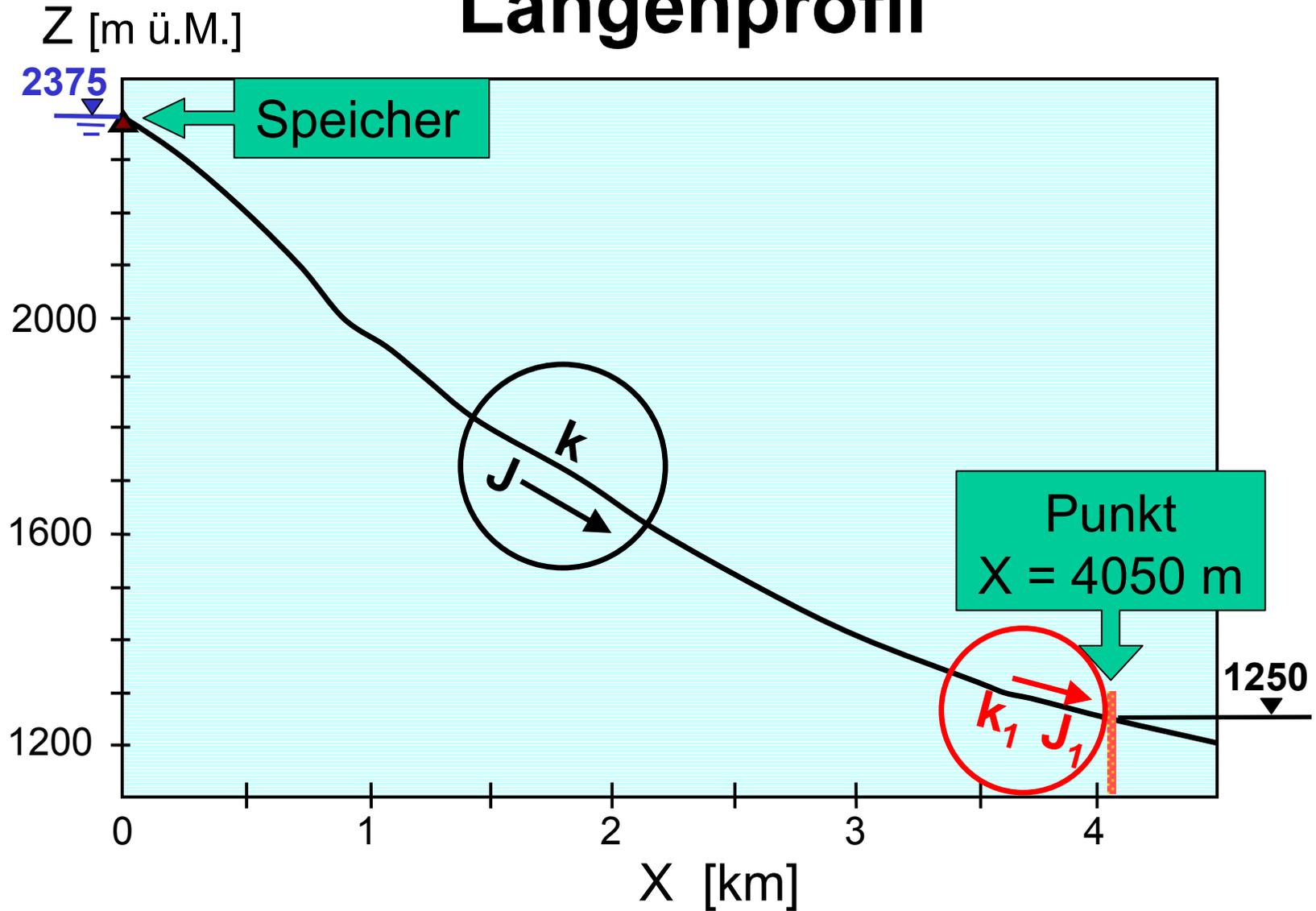
Abflussgebiet der Flutwelle

Speicher

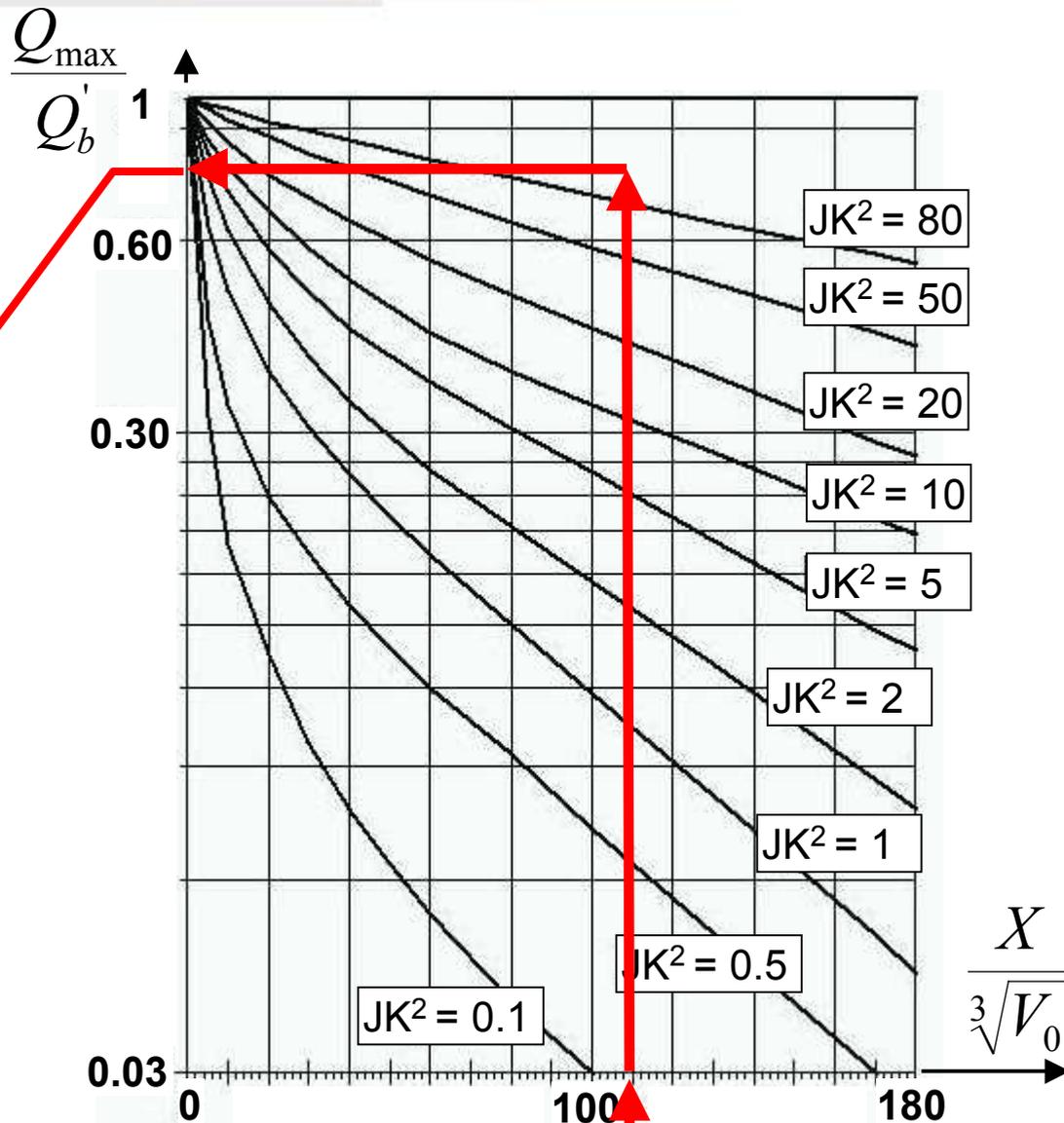


gesucht:
Intensität
in Punkt
X
= 4050 m

Längenprofil



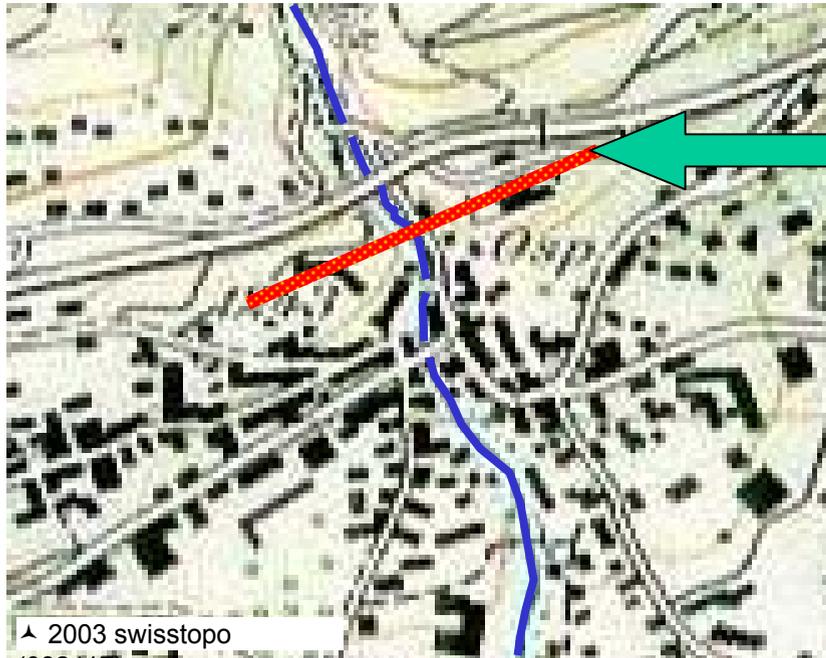
Bestimmung von Q_{\max}



$$\frac{Q_{\max}}{Q_b'} = 0.76$$

$$\frac{X}{\sqrt[3]{V_0}} = 110$$

Ermittlung der Wassertiefe h



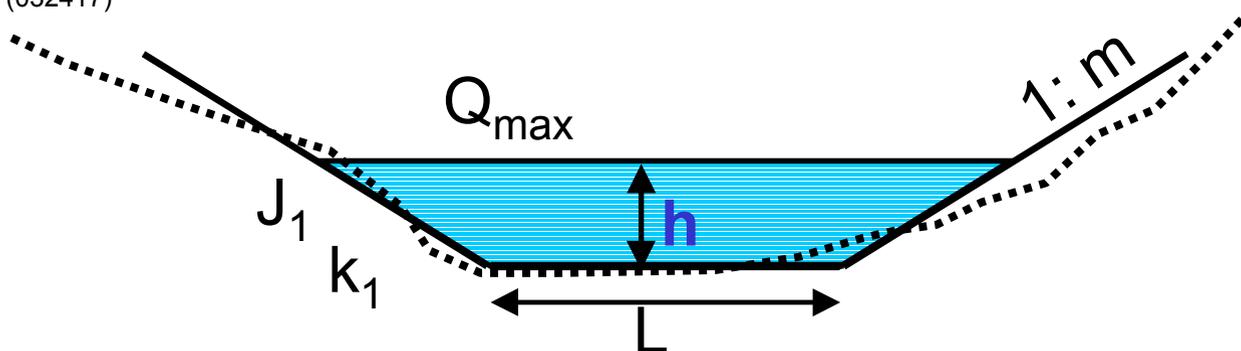
Querschnitt
Im Punkt
 $X = 4050 \text{ m}$

Gegeben:

Abflussmenge Q_{\max}

Parameter J_1 , k_1 , L , m

Gesucht: Abflusstiefe h



Zwischenvariable D_{\max}

- Rechteck $D_{\max} = \frac{Q}{K_1 \cdot J_1^{1/2} \cdot L^{8/3}}$

- Dreieck $D_{\max} = \frac{Q \cdot (1 + m^2)^{1/3}}{K_1 \cdot J_1^{1/2} \cdot m^{5/3}}$

- Trapez $D_{\max} = \frac{Q \cdot m^{5/3}}{K_1 \cdot J_1^{1/2} \cdot L^{8/3}}$

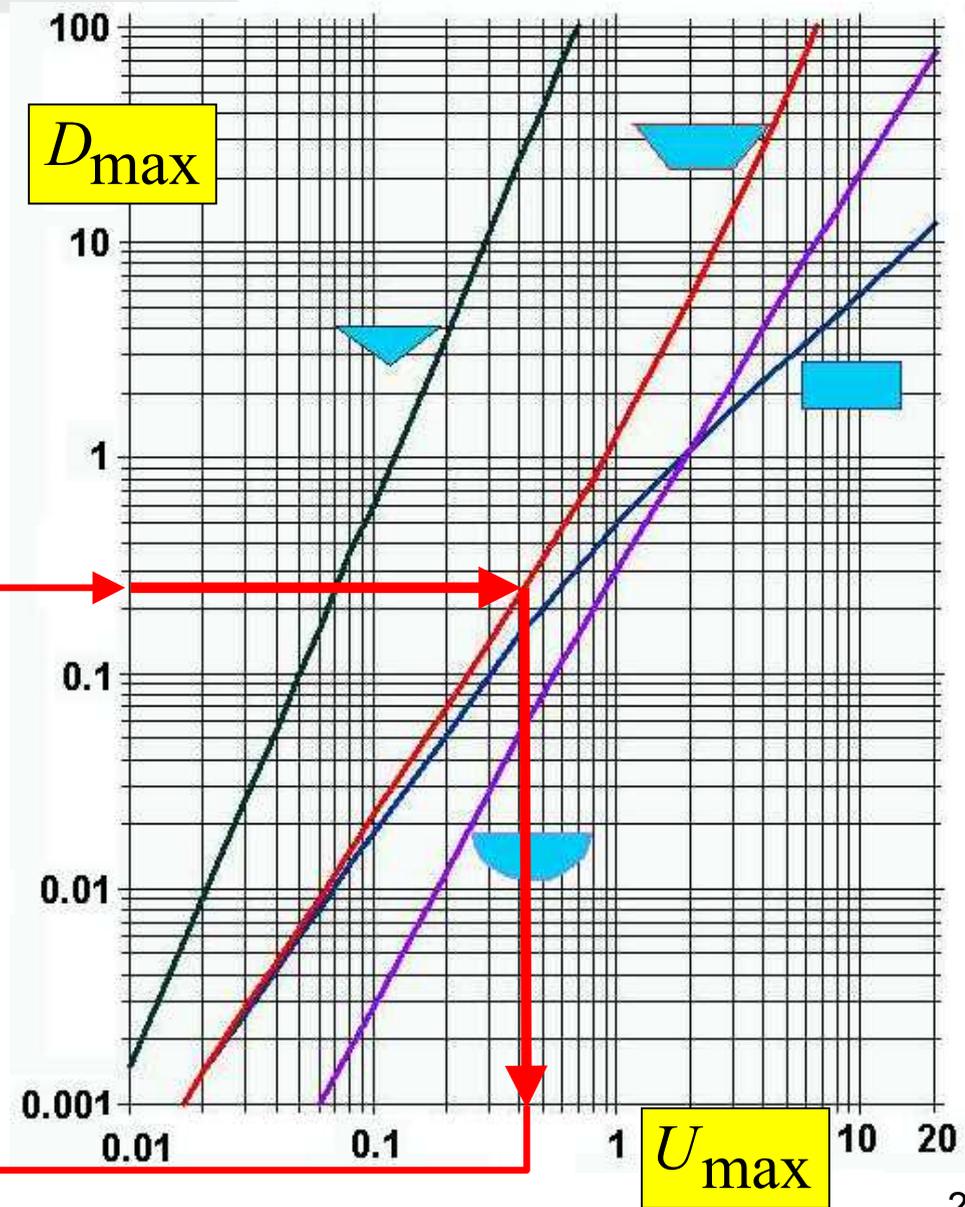
- Parabel $D_{\max} = \frac{Q}{K_1 \cdot J_1^{1/2} \cdot p^{16/3}}$

Zwischenvariable

U_{\max}

$D_{\max} = 0.232$

$U_{\max} = 0.44$



Bestimmung der Wassertiefe h

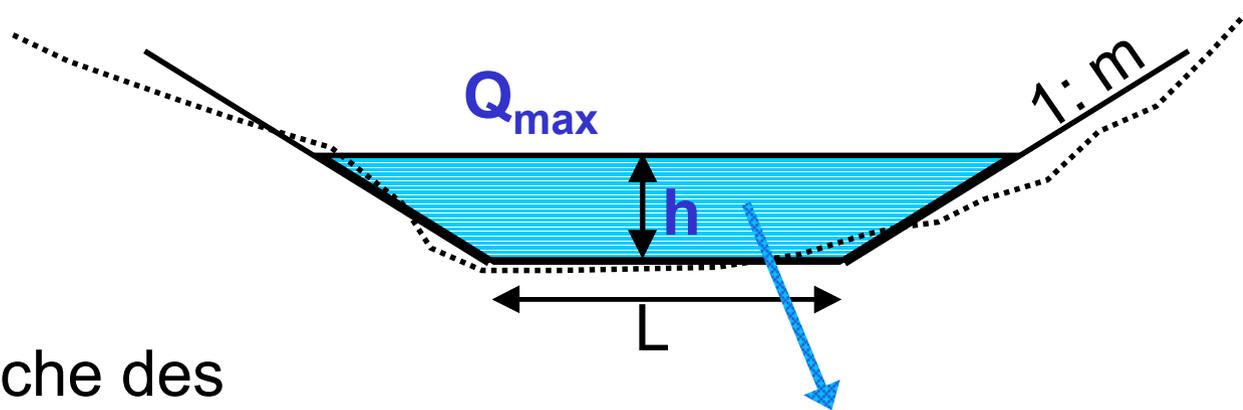
- Rechteck $h = L \bullet U_{\max}$

- Dreieck $h = 10 \bullet U_{\max}$

- Trapez $h = \frac{L}{m} \bullet U_{\max}$

- Parabel $h = p^2 \bullet U_{\max}$

Bestimmung der Fließgeschwindigkeit v



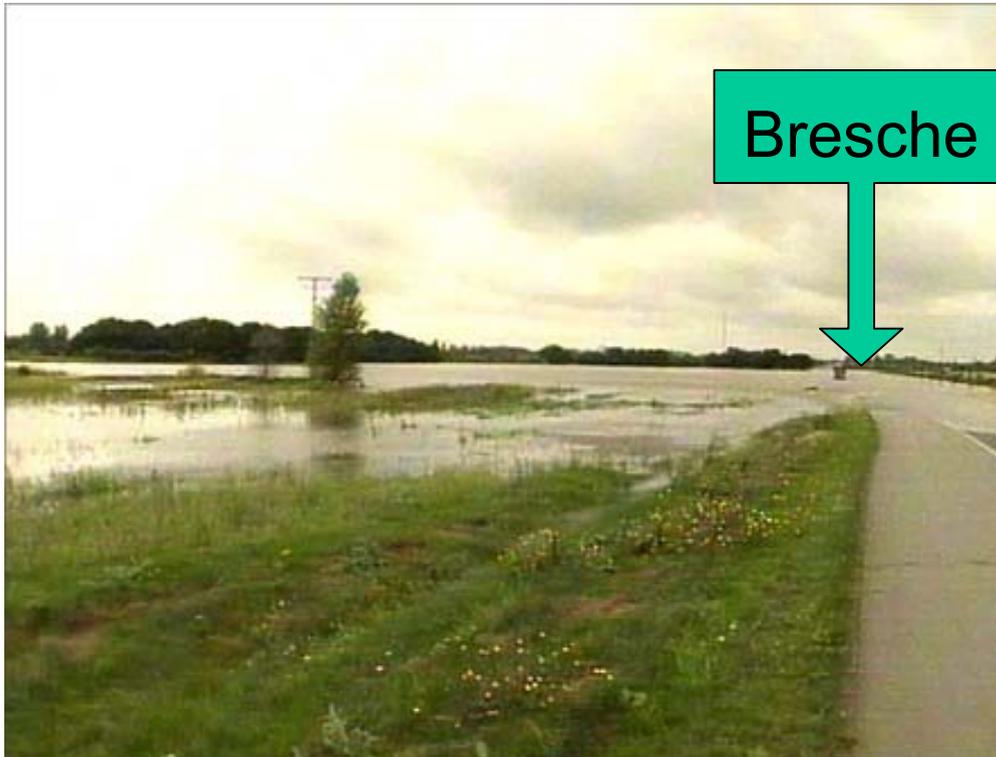
Fläche des Durchflussquerschnitts:

$$F = L \cdot h + m \cdot h^2$$

Fließgeschwindigkeit:

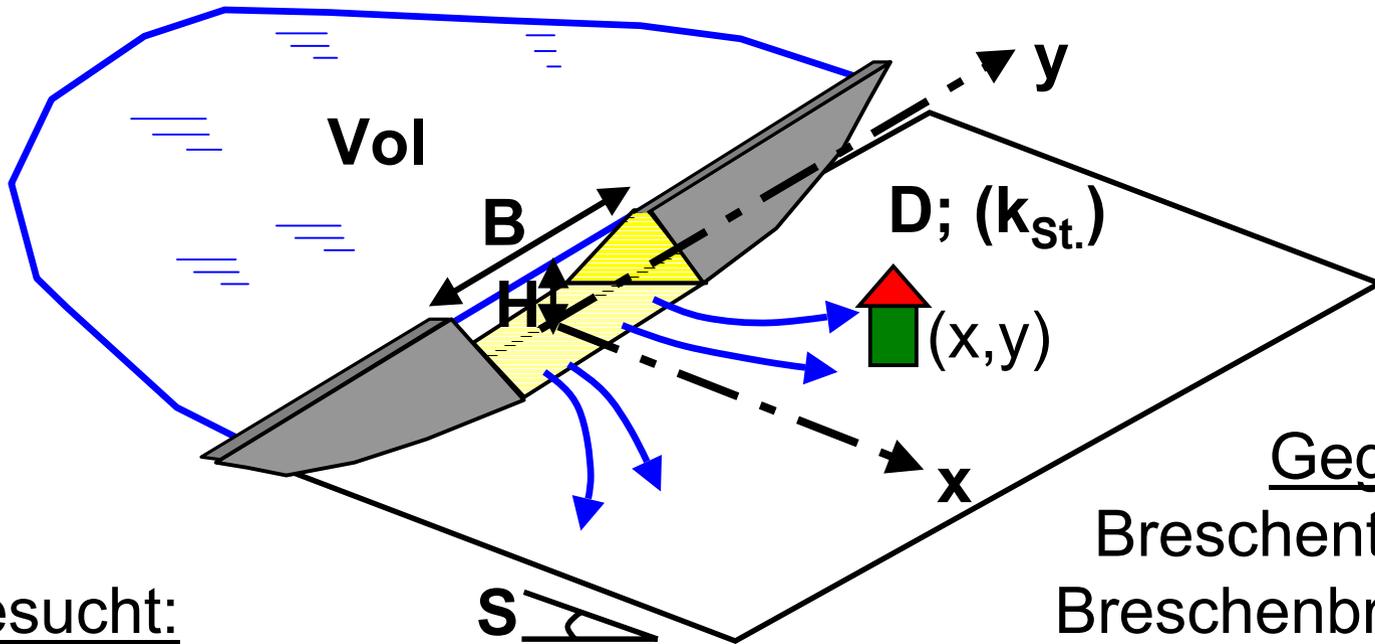
$$v = \frac{Q_{\max}}{F}$$

2D-Ausbreitung einer Flutwelle



- bei flachem Abflussgebiet
- z.B. bei einem Längsdamm einer Flusstauhaltung
- ist eine 2-dimensionale Modellierung erforderlich

2D-Berechnung mit einem einfachen Parameterverfahren



Gesucht:

Abflusshöhe h und
Fließgeschwindigkeit v
im Punkt (x,y) 

Gegeben:

Breschentiefe H
Breschenbreite B
Speichervolumen Vol
Sohlengefälle S
Rauhigkeit D bzw. k_{St}

Dimensionslose Parameter

- Horizontale Länge:

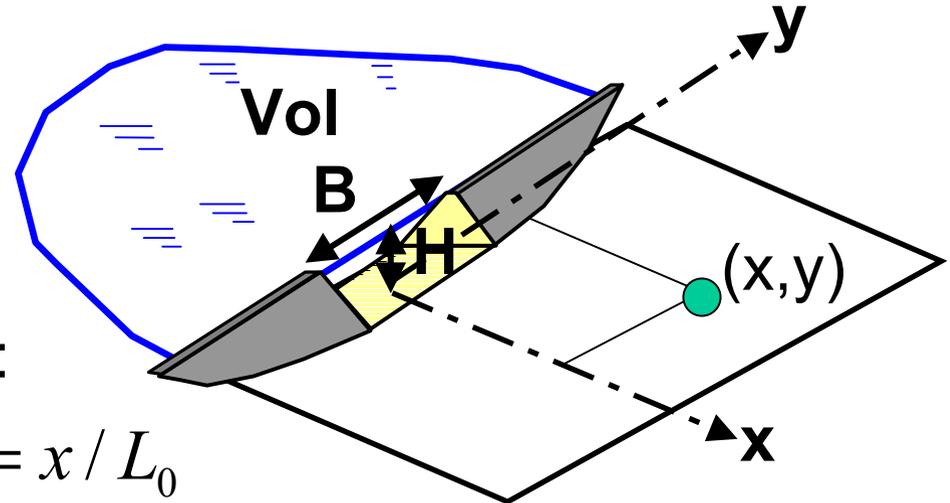
$$L_0 = \sqrt{B \cdot H}$$

- Distanz von der Sperre:

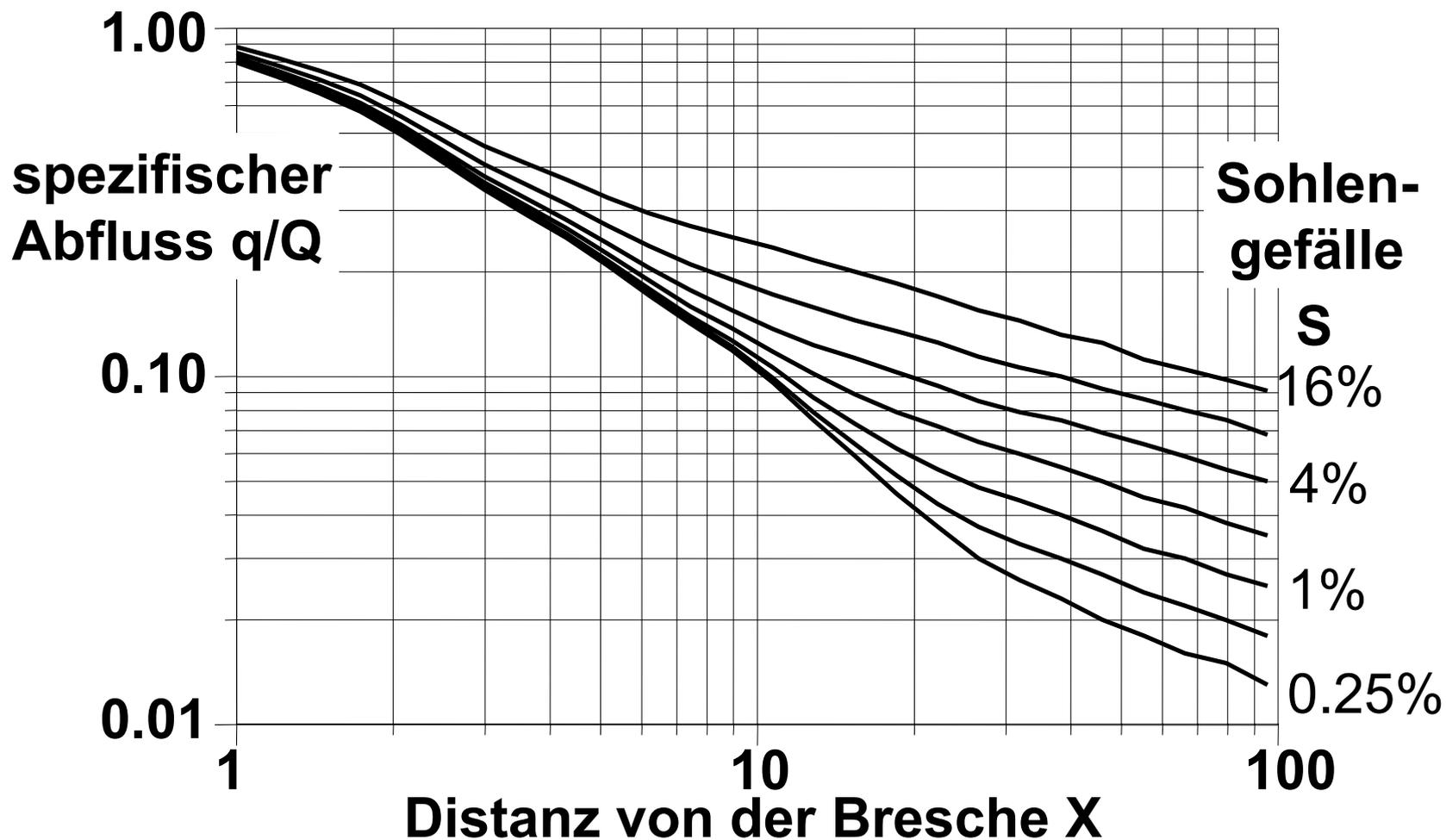
$$X_0 = x / L_0$$

- Distanz von der Strahlachse: $Y_0 = y / L_0$

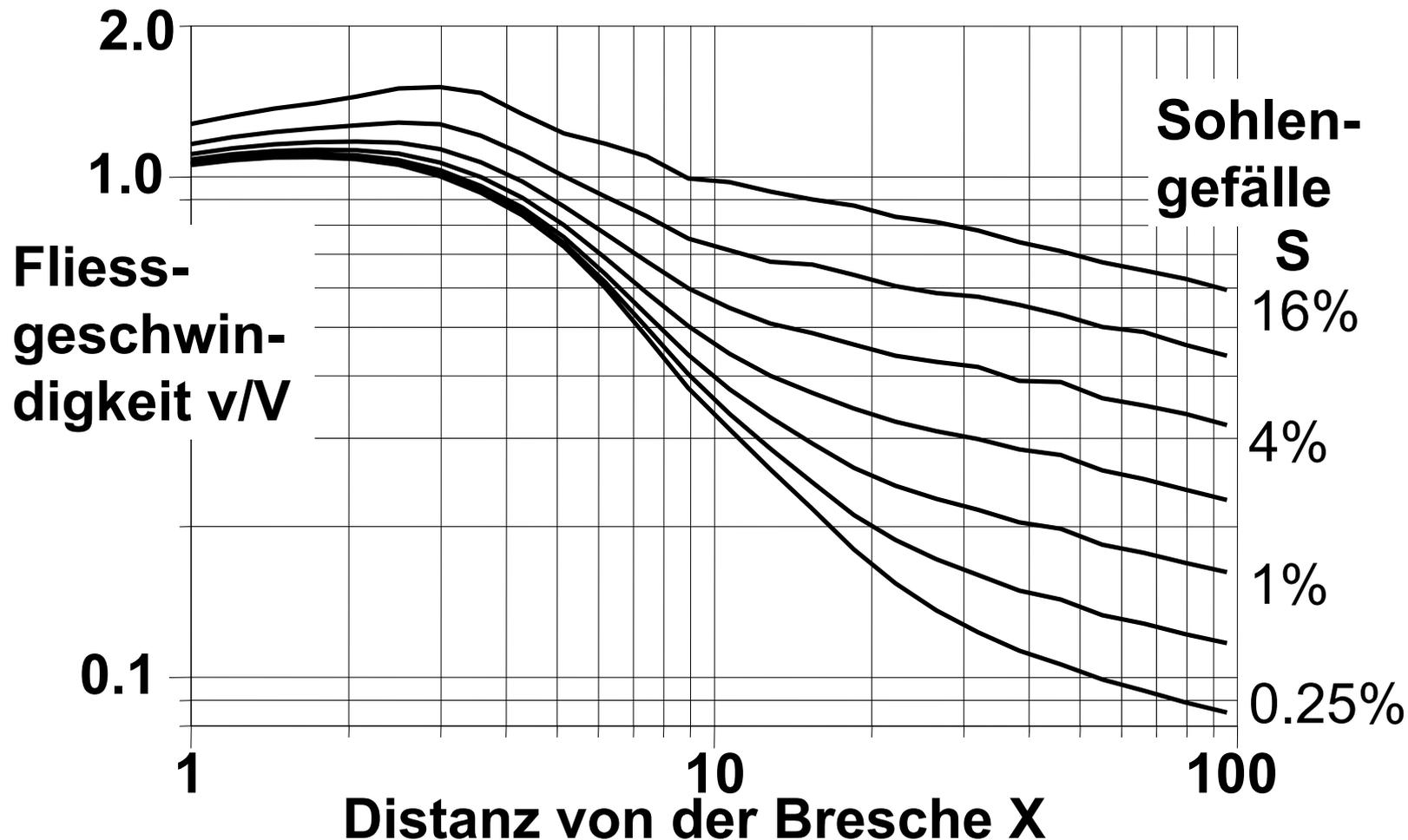
- Speichergrösse: $Vol_0 = \frac{Vol}{B \cdot H^2}$



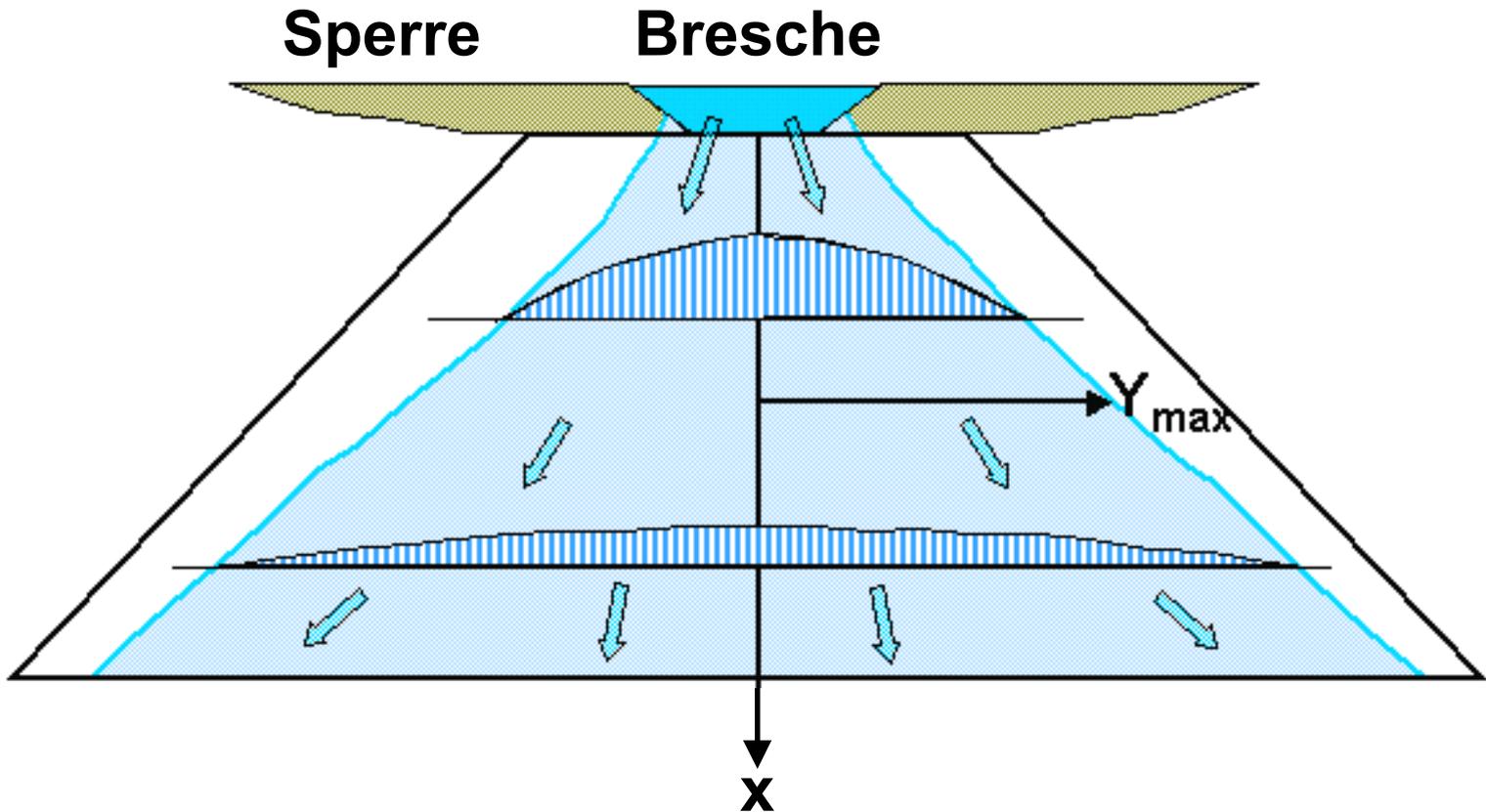
spezifischer Abfluss



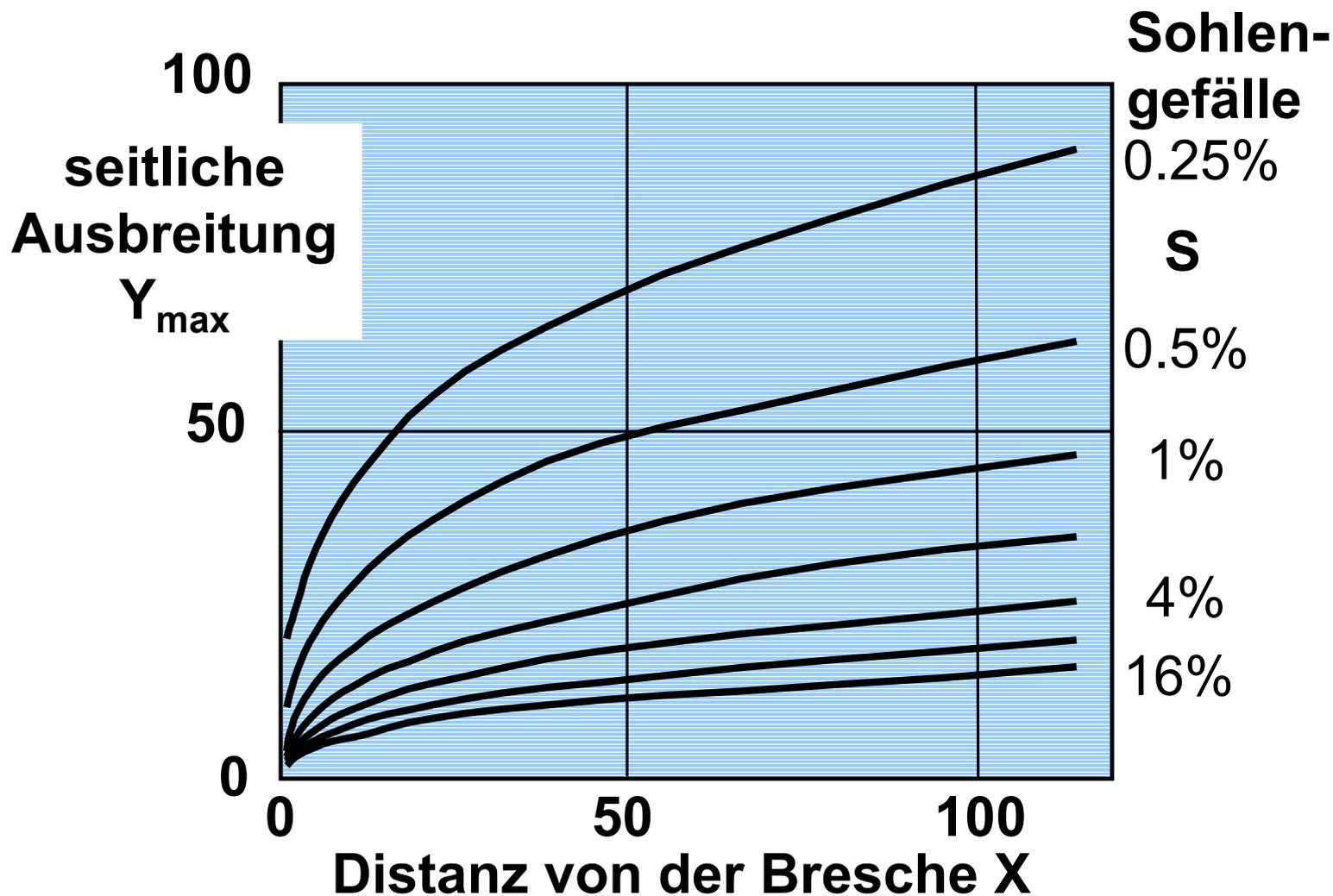
Fliessgeschwindigkeit



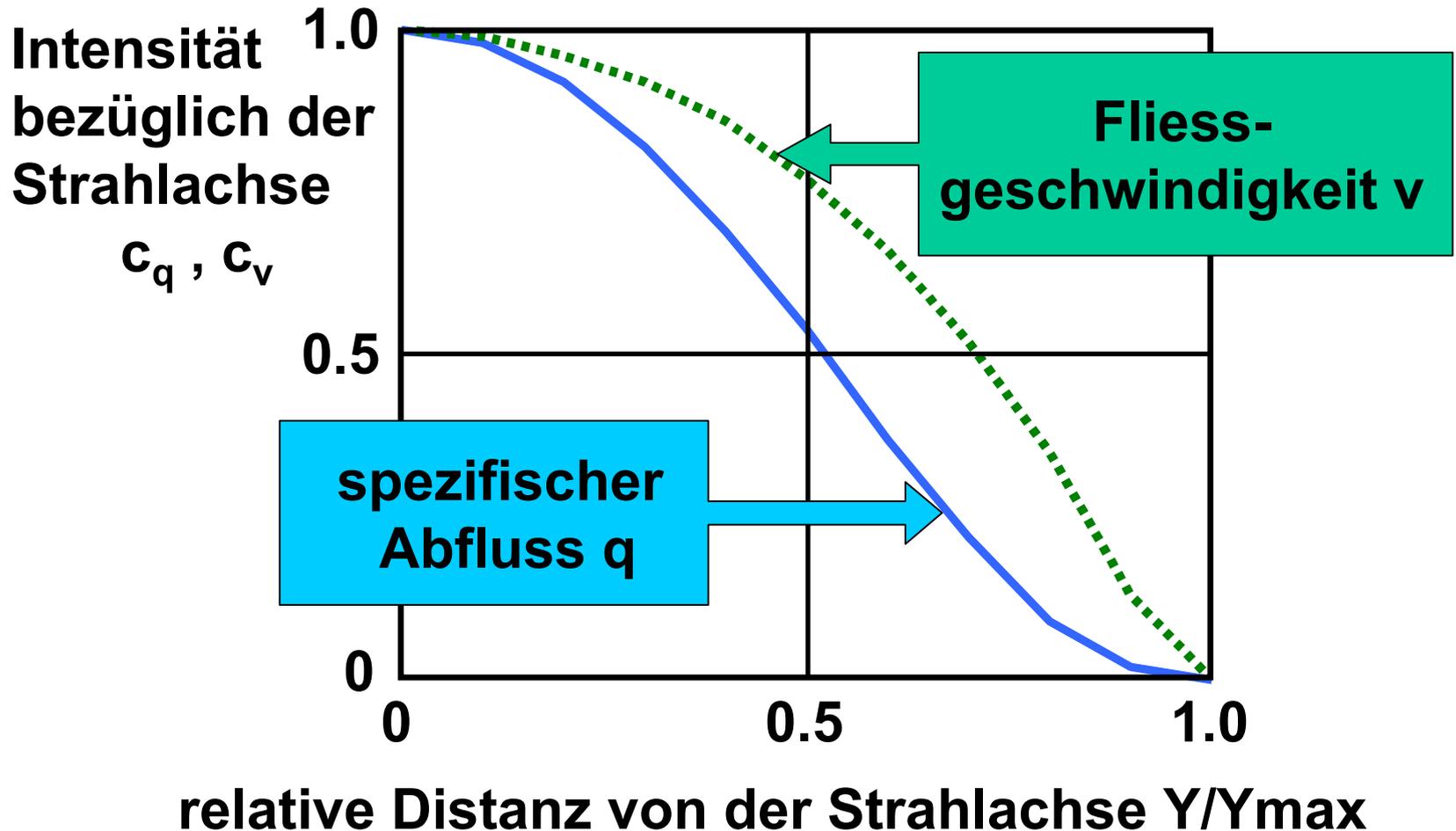
seitliche Ausbreitung



laterale Ausbreitung



Abflussintensitäten



Ergebnis



- Intensität
 $I = v \cdot h$ [m²/s]
- Kriterium
„besondere Gefahr“
erfüllt?
- Wenn ja,
Stauanlage wird der
StAV unterstellt

Kommentare zu den Folien (1)

- # Folie 1
Um zu beurteilen, ob eine Stauanlage eine besondere Gefahr darstellt, sind die Auswirkungen einer im Bruchfalle entstehenden Flutwelle abzuschätzen. Dies kann, wie gezeigt wird, auf rasche und einfache Weise erfolgen.
- # Folien 2 und 3
Inhaltsverzeichnis
- # Folie 4
Eine Stauanlage untersteht bekanntlich dann der Stauanlagenverordnung, wenn sie gewisse Abmessungen bezüglich Stauhöhe und Stauvolumen überschreitet, nämlich bei mehr als 10 m Stauhöhe bzw. bei mindestens 5 m Stauhöhe und gleichzeitig mehr als 50'000 m³ Stauvolumen. Kleinere Stauanlagen unterstehen dann der Stauanlagenverordnung, wenn sie das Kriterium der besonderen Gefahr erfüllen.
- # Folie 5
Eine besondere Gefahr besteht dann, wenn die Intensität der Überflutung beim Bruch der Stauanlage bestimmte Werte übersteigt. Die Intensität wird als Produkt von Fliessgeschwindigkeit v und Abflusshöhe h definiert, welche mit einer Flutwellenabschätzung zu ermitteln sind.
- # Folie 6
Je nach betroffenem Objekt gelten unterschiedliche Schwellenwerte der Intensität. In diesem Diagramm sind sie als Funktion der Abflusstiefe h und der Fliessgeschwindigkeit v aufgetragen. So besteht eine besondere Gefahr für Wohnhäuser, Arbeitsräume oder Eisenbahnlinien, wenn die Intensität 2 m²/s übersteigt. Für den Strassenverkehr oder Campingplätze gelten jedoch bereits Intensitäten von 0.5 m²/s als besondere Gefahr.
- # Folie 7
Die Abschätzung der Flutwelle erfolgt unter der Annahme eines Momentanbruchs des gefüllten Speichers. Dabei wird üblicherweise vom bis zum Stauziel voll gefüllten Speicher ausgegangen. In Fällen, wo keine oder eine verstopfungsanfällige Hochwasserentlastung vorhanden ist, soll vom bis zur Kronenkote gefüllten See ausgegangen werden.

Kommentare zu den Folien (2)

Folie 8

Verstopfungsanfällige Hochwasserentlastungen sind solche, wo insbesondere Gras, Laub, Astwerk und andere Objekte den geringen Durchflussquerschnitt oder die Rechen mit grösster Wahrscheinlichkeit verstopfen können und den See über die Krone zum Überlaufen bringen, was zur Breschenbildung und damit zum Bruch der Stauanlage führen kann.

Folie 9

Beim Bruch eines Absperrbauwerks entsteht eine Bresche von unterschiedlicher Grösse. Das Beispiel hier zeigt die Bresche eines Hochwasserrückhaltebeckens, das anlässlich des Hochwassers 2002 bei Glashütte in Sachsen gebrochen war. Der Erddamm wies eine Höhe von 9 m und ein Stauvolumen von 60'000 m³ auf. Die trapezförmige Bresche wurde rechts begrenzt durch die Felsoberfläche der Foundation und links durch den mit Geschwemmsel vollständig verstopften Dammdurchlass. (Foto: <http://www.heimatverein-cunnersdorf.de>)

Folie 10

Eine andere und auch grössere Bresche entstand im Jahr 2002 bei einem Speicher für Bewässerung in Syrien. Die ebenfalls trapezförmige Bresche im Damm war recht breit, entsprechend etwa der dreifachen Stauhöhe.

Folie 11

Für unsere Flutwellenabschätzungen gelten folgende Annahmen für die Breschenformen und -grössen: Bei Betonmauern wird ein Totalbruch der gesamten Mauer angenommen. Bei kleineren Dämmen, welche sicher die Mehrzahl der hinsichtlich der besonderen Gefahr zu untersuchenden Stauanlagen ausmachen, wird eine Standardbresche angenommen. Ihre Basisbreite entspricht der doppelten Wassertiefe und die seitlichen Böschungen weisen Neigungen von 45° auf.

Folie 12

Der Maximalabfluss aus der Bresche kann mit einfachen Näherungsformeln aufgrund der Breschengeometrie berechnet werden. Rechteckige Breschenformen kommen zum Beispiel bei Gewichtsmauern oder Stauwehren vor, dreieckige bei Bogenmauern, trapez- und parabelförmige Breschen kommen bei eigentlich allen Sperrtypen, aber insbesondere bei Dämmen, vor. Zu bemerken ist auch, dass bei einer Verbreiterung der Bresche der Abfluss linear zunimmt, während er bei Vergrösserung der Höhe bzw. der Breschentiefe exponentiell mit $3/2$ zunimmt.

Kommentare zu den Folien (3)

Folie 13

Um die Grösse des Abflusses in einer gewissen Distanz unterhalb der Sperre zu ermitteln, ist zuerst festzustellen, ob der Abfluss ein- oder zweidimensional erfolgt. In den meisten Fällen ist eine Talform vorhanden, wo der Abfluss in einem durch Querschnitte definierbaren Gerinne erfolgt. Hier kommt ein eindimensionales Verfahren zur Anwendung. Nur dort, wo sich der Abfluss auf einer geneigten Ebene allseitig ausbreiten kann, ist der Einsatz eines zweidimensionalen Verfahrens angebracht.

Folie 14

Für die Durchführung vereinfachter eindimensionaler Flutwellenberechnungen sind verschiedene Verfahren bekannt. Ein praktisches und übersichtliches ist das CTGREF-Verfahren aus Frankreich, welches von Hand durchgeführt werden kann. Unter dem Namen CASTOR wurde es als PC-Version weiterentwickelt. Ein weiteres einfaches Verfahren für PC ist das Simplified Dam-Break Model aus den USA, wo es sich einer gewissen Beliebtheit erfreut.

Folie 15

Damit auch einfache, zweidimensionale Flutwellenausbreitungen abgeschätzt werden können, haben wir durch Dr. Beffa ein Parameterverfahren entwickeln lassen, das es erlaubt, mit einfachen Formeln und Diagrammen die Intensität der Überflutung an vorgegebenen Stellen zu ermitteln. Andere ähnlich einfache 2D-Verfahren sind uns nicht bekannt.

Folie 16

Betrachten wir als Beispiel einer eindimensionalen Flutwellenabschätzung ein typisches Becken für eine Beschneigungsanlage. Für das an einer Hangverflachung gelegene Becken, das durch Abtrag und Dammschüttung gebildet wird, sind zuerst die massgebenden Stauhöhe und Stauvolumen zu ermitteln. Falls der Untergrund erosionsfest ist, kann die ursprüngliche Terrainlinie als Bezugshorizont dienen. Wenn aber der Untergrund nicht als erosionsfest zu betrachten ist, was meistens der Fall sein dürfte, ist die volle Stauhöhe massgebend. Man erkennt, dass im unteren Fall das Unterstellungskriterium aufgrund der Abmessungen erfüllt ist. Beim oberen Fall ist mit der Flutwellenberechnung abzuklären, ob das Kriterium der besonderen Gefahr erfüllt ist.

Kommentare zu den Folien (4)

Folie 17

Aufgrund der topographischen Situation sind das Abflussgebiet festzulegen und die Lage des oder der interessierenden Punkte zu definieren. In diesem Fall hier folgt der Abfluss dem natürlichen Gerinne bis zur Ortschaft, wo uns in einer Distanz von rund 4 km unterhalb des Speichers die Abflussintensität interessiert.

Folie 18

Mit dieser Darstellung des Längenprofils können die wenigen Größen gezeigt werden, welche für die Berechnung erforderlich sind. Nebst den vorher erwähnten Angaben zum Speicher - nämlich dem Volumen und den Breschenparametern - benötigt man das globale Gefälle J zwischen Speicher und betrachtetem Punkt sowie einen globalen K -Wert nach Strickler für die Sohlenreibung. Im betrachteten Punkt werden weiter das lokale Gefälle J_1 und die lokale Reibung K_1 benötigt.

Folie 19

Die Ermittlung des Maximalabflusses im betrachteten Punkt erfolgt mit diesem Diagramm. Die Abszisse enthält die Distanz X und das Speichervolumen V . Die Kurvenschar ist eine Funktion von Globalgefälle und K -Wert, und in der Ordinate kann der Maximalabfluss als Bruchteil des Breschenabflusses abgelesen werden. In unserem Beispiel ergibt der Wert für die Abszisse 110. Wegen des steilen Geländes wird JK^2 relativ hoch und der Maximalabfluss im Punkt X erreicht immer noch 76% der Breschenabflussmenge.

Folie 20

Um nun die Wassertiefe im betrachteten Punkt zu bestimmen, ist ein Querprofil zu legen und dieses einem der 4 Standardtypen der geometrischen Form zuzuordnen. Mit den gegebenen Werten: Maximalabfluss Q_{\max} , lokalem Gefälle J_1 und lokalem K -Wert K_1 sowie den Formparametern des Querschnitts L und m kann die gesuchte Abflusstiefe h ermittelt werden.

Folie 21

Zu diesem Zweck ist eine kleine Berechnung einer Zwischenvariablen erforderlich, die als D_{\max} bezeichnet wird. Die Formel enthält die gegebenen Werte des Querschnitts. Gelb unterlegt sind dies diejenigen für den vorliegenden Fall des Trapezprofils.

Kommentare zu den Folien (5)

Folie 22

Damit steigt man in ein weiteres Diagramm, um eine weitere Zwischenvariable U_{\max} zu ermitteln. Die 4 Kurven sind den 4 geometrischen Standardquerschnittstypen zugeordnet. In unserem Beispiel beträgt $D_{\max} = 0.232$. Auf der Kurve für das Trapezprofil wird der gesuchte Wert für $U_{\max} = 0.44$ bestimmt.

Folie 23

Und schliesslich wird die Wassertiefe h mittels einer weiteren kleinen Formel aus dieser Zwischenvariablen U_{\max} verbunden mit den Parametern der geometrischen Querschnittsform berechnet.

Folie 24

Schliesslich kann die Fliessgeschwindigkeit v aufgrund der maximalen Abflussmenge Q_{\max} und der Wassertiefe h bestimmt werden. Zuerst ermittelt man die Fläche des Durchflussquerschnitts aufgrund der Geometrie. Und anschliessend wird die Fliessgeschwindigkeit v berechnet. Damit sind h und v bekannt und somit auch die gesuchte Intensität der Überflutung.

Folie 25

Wie bereits erwähnt, ist bei einem flachen Abflussgebiet, wie zum Beispiel bei einem Längsdamm einer Flusstauhaltung, eine 2-dimensionale Modellierung der Flutwelle erforderlich.

Folie 26

Das einfache Parameterverfahren nach Beffa benötigt als Grunddaten: die Breschentiefe H und Breschenbreite B , das Speichervolumen Vol , das Sohlengefälle S des ebenen Abflussgebiets sowie einen Wert für die Rauigkeit D , welcher aus dem K -Wert nach Strickler berechnet werden kann. Für die Ermittlung der Abflusshöhe h und Fliessgeschwindigkeit v im gesuchten Punkt sind dessen Koordinaten x und y bezogen auf den Breschenmittelpunkt erforderlich.

Folie 27

Mit diesen gegebenen Daten werden normalisierte und dimensionslose Parameter gebildet, welche es nachher gestatten, mit Hilfe von Diagrammen die gesuchten Werte herauszulesen. Die dafür massgebenden Werte sind die Breschenparameter B und H sowie das Speichervolumen Vol . Im Weiteren werden aber noch skalierte Werte für den spezifischen Abfluss und die Fliessgeschwindigkeit benötigt, die hier nicht dargestellt wurden.

Kommentare zu den Folien (6)

Folie 28

Mit diesem Diagramm wird der spezifische Abfluss in Richtung der Strahlachse und in Funktion des Sohlengefälles bestimmt. Man erkennt den zunehmenden Einfluss des Sohlengefälles bei grösser werdender Distanz von der Bresche. Den spezifischen Abfluss erhält man durch Multiplikation des hier herausgelesenen Werts mit dem skalierten Wert für Q .

Folie 29

Mit einem ähnlichen Diagramm wird die Fliessgeschwindigkeit in Richtung der Strahlachse bestimmt. Hier tritt der Einfluss des Sohlengefälles noch stärker in Erscheinung. Und auch die Fliessgeschwindigkeit wird durch Multiplikation des herausgelesenen Werts mit dem skalierten Wert für v bestimmt.

Folie 30

Für die seitliche Ausbreitung der Flutwelle wurden weitere Diagramme entwickelt, und zwar für die seitliche Begrenzung Y_{\max} der Überflutung sowie für die Abflussintensitäten zwischen der Strahlachse x und der seitlichen Begrenzung.

Folie 31

Die seitliche Ausbreitung nimmt mit zunehmendem Abstand von der Bresche bzw. mit abnehmendem Sohlengefälle zu. Insbesondere ist auch zu erkennen, dass bei grossem Gefälle fast keine seitliche Ausbreitung erfolgt.

Folie 32

Die Abflussintensitäten für jeden Punkt zwischen Strahlachse und seitlicher Begrenzung der Ausbreitung können aus diesem Diagramm leicht abgelesen werden. Die Abszisse zeigt die Relativedistanz zwischen Strahlachse bei 0 und der seitlichen Begrenzung Y_{\max} bei 1. Die Ordinate zeigt die Grösse der Fliessgeschwindigkeit bzw. des spezifischen Abflusses bezogen auf deren Wert in der Strahlachse.

Folie 33

Das Ergebnis dieser Berechnungen liefert wiederum die Intensität $v \times h$. Für das betrachtete Objekt ist nun zu klären, ob das Kriterium „besondere Gefahr“ erfüllt ist. Ist das Kriterium „besondere Gefahr“ erfüllt, wird die Stauanlage der Stauanlagenverordnung unterstellt. Dies dürfte zum Beispiel bei diesem Objekt zweifellos erfüllt gewesen sein, als es beim Bruch des vorher gezeigten Hochwasserrückhaltebeckens Glashütte in Mitleidenschaft gezogen wurde. (Foto: <http://www.heimatverein-cunnersdorf.de>)