



Vereinfachtes Verfahren zur Berechnung einer Flutwelle mit primär eindimensionaler Ausbreitung

(Verfahren „CTGREF“)

BFE Hilfsmittel

Die letzte Fassung ersetzt die früheren Fassungen

Version	Abänderung	Datum
2.0	Im Zuge der Totalrevision der Richtlinie 2002	18.6.2014



Inhaltsverzeichnis

1. Vorbemerkungen und Annahmen	3
2. Schritte der CTGREF Methodik.....	4
2.1. Schritt 1: Berechnung des Breschenabflusses Q_b	4
2.2. Schritt 2: Berechnung von Q_b'	4
2.3. Schritt 3: Berechnung des Hilfsparameters	6
2.4. Schritt 4: Berechnung von Q_{max} in der Distanz X unterhalb der Sperrstelle	6
2.5. Schritt 5: Berechnung der maximalen Wassertiefe Y_{max} im Querschnitt X	8
2.6. Schritt 6: Berechnung der Ankunftszeit der Flutwelle	10
3. Beispiel.....	11
3.1. Schritt 1: Berechnung des Breschenabflusses Q_b	11
3.2. Schritt 2: Berechnung von Q_b'	11
3.3. Schritt 3: Berechnung des Hilfsparameters	11
3.4. Schritt 4: Berechnung von Q_{max} in der Distanz X unterhalb der Sperrstelle	11
3.5. Schritt 5: Berechnung der maximalen Wassertiefe Y_{max} im Querschnitt X	Fehler!
Textmarke nicht definiert.	
3.6. Schritt 6: Berechnung der Ankunftszeit der Flutwelle	12



1. Vorbemerkungen und Annahmen

Die nachstehende Flutwellenberechnungsmethode wurde durch das CTGREF (Centre technique du génie rural des eaux et des forêts) entwickelt und 1978 publiziert:

Quelle: "*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.

Die Methode soll dem Ingenieur erlauben, die Risiken für die Unterlieger im Falle eines Stauanlagenbruchs abzuschätzen.

Die mit dieser Methode erhaltenen Resultate sind umso zuverlässiger, je gleichmässiger das Tal geformt ist und je besser die gewählten Koeffizienten den Geländebeziehungen entsprechen.

Bei grossen Unregelmässigkeiten in den Geländebeziehungen (plötzlichen Verengungen oder Erweiterungen, markanten Gefällsänderungen, etc.) ist die Methode mit grosser Vorsicht zu verwenden; in gewissen Fällen kann sie sich auch als ungeeignet erweisen. Wenn die Resultate zweifelhaft sind, oder die topographischen Verhältnisse eine Anwendung der Methode schwierig machen, ist es angezeigt, das Problem mit geeigneteren Computer-Programmen zu behandeln.

Es wird angenommen, dass sich die infolge eines Stauanlagenbruchs erzeugte Flutwelle auf trockener Sohle fortpflanzt. Diese Annahme bildet den ungünstigsten Fall für die Wassertiefen; im Gegensatz dazu ist die angenommene Fortpflanzung auf trockener Sohle langsamer als auf einer vorhandenen Wasserfläche.

Die Anwendung der vereinfachten Berechnungsmethode setzt eine gewisse Schematisierung der Geometrie der Überflutungszone voraus:

- Jedes Querprofil wird durch eine einfache geometrische Form angenähert.
- Gleichmässige Änderungen des Längsgefälles und der Talquerschnitte.
- Es wird angenommen, dass die maximale Wassertiefe Y_{\max} bei der maximalen Abflussmenge Q_{\max} eintritt, und dass bei diesem Maximum die Gleichung für Normalabfluss $I = J$ gültig sei um die Beziehung zwischen Q_{\max} und Y_{\max} herzustellen.



2. Schritte der CTGREF Methodik

2.1. Schritt 1: Berechnung des Breschenabflusses Q_b

Die Berechnungsformeln für die aus einer Bresche austretende Abflussmenge Q_b sind in Tabelle 1 für die vier in Figur 1 definierten vereinfachten Breschengeometrien angegeben.

Querschnittstyp	Abflussmenge im Breschenquerschnitt
Rechteck mit Breite L	$Q_b = 0.93 \cdot L \cdot Y_0^{3/2}$
Dreieck mit Parameter m	$Q_b = 0.72 \cdot m \cdot Y_0^{5/2}$
Trapez mit den Parametern L und m	$Q_b = 0.72 \cdot m \cdot Y_0^{5/2} + 0.93 \cdot L \cdot Y_0^{3/2}$
Parabel mit $L = p \cdot Y^{1/2}$	$Q_b = 0.54 \cdot L \cdot Y_0^{3/2}$

Tabelle 1: Abflussmenge im Breschenquerschnitt in Abhängigkeit des Querschnittstypes

Dabei bedeuten (vgl. auch Figur 1):

- L: Breite [m]
- Y_0 : Wassertiefe an der Sperrstelle vor dem Bruch [m]
- Q_b : Abflussmenge an der Sperrstelle [m^3/s]
- m: Neigung [-]

2.2. Schritt 2: Berechnung von Q_b'

Um den verschiedenen Vereinfachungen Rechnung zu tragen, wird die Abflussmenge Q_b in einen korrigierter Abfluss Q_b' umgerechnet:

$$Q_b' = \mu \cdot Q_b$$

wobei μ einen Koeffizienten darstellt, welcher die Eigenschaften des Staubeckens berücksichtigt (Kompaktheit, Form, Bodenneigung).

$$0.6 < \mu < 1.4$$

$$\mu = 1.4 \quad \text{sehr kompaktes Becken}$$

$$\mu = 1 \quad \text{normales Becken}$$

$$\mu = 0.6 \quad \text{sehr langgezogenes Becken}$$

μ kann auch nach der folgenden Formel bestimmt werden:

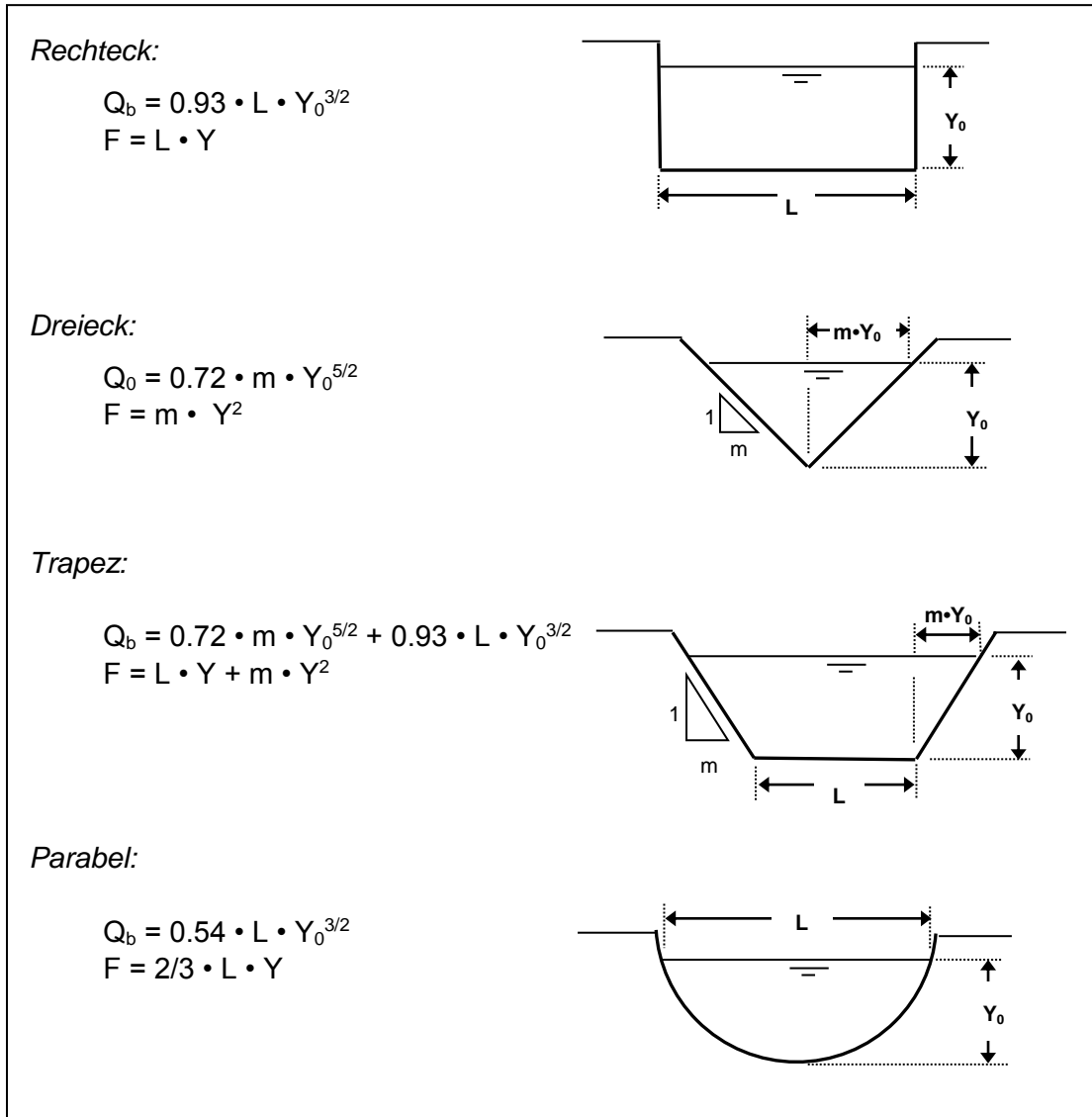
$$\mu = 1 + \log \{V_0 / (S_0 L_b)\}$$

mit

$$V_0 = \text{Staurationvolumen in } m^3$$

$$S_0 = \text{Fläche der Bresche in } m^2$$

$$L_b = \text{Länge des Staubeckens in } m$$



Figur 1: Theoretische Querschnittsformen. Abfluss Q_b aus den Breschenquerschnittsflächen und Flächen F für den benetzten Querschnitt



2.3. Schritt 3: Berechnung des Hilfsparameters

Mit dem Hilfsparameter $J \cdot K^2$ wurde eine Beziehung zwischen den dimensionlosen Variablen Q_{\max}/Q_b' und $X/V_0^{1/3}$ entwickelt. Darin bedeuten:

J = mittleres Gefälle zwischen Sperrstelle und dem Querschnitt bei X [-]

K = mittlerer Strickler-Reibungskoeffizient auf der Strecke bis X [-]

X = Distanz von der Sperrstelle aus gemessen [m]

Q_{\max} = Spitzenabfluss im betrachteten Querschnitt beim Standort X [m^3/s]

Q_b' = korrigierter Abfluss [m^3/s] aus dem Breschenquerschnitt nach Abschnitt 2.2.

V_0 = Stauraumvolumen [m^3]

Mit Hilfe des abgeschätzten Werts für K gemäss Tabelle 2 kann der Wert $J \cdot K^2$ berechnet werden.

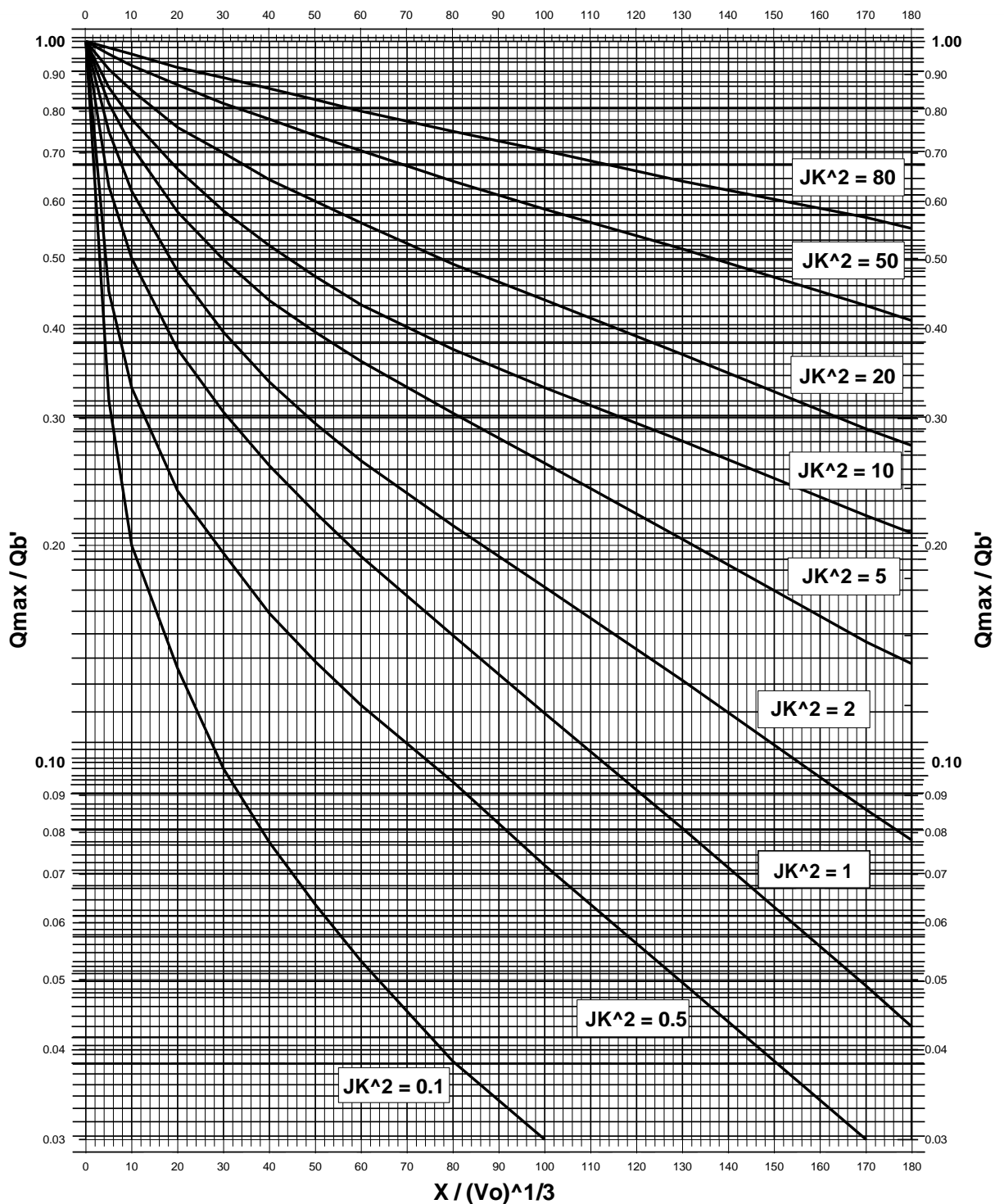
$K =$	Beschreibung des Geländes
15	urbanes Gebiet; schluchtartige Engnisse; unregelmässige Talform
20	unregelmässige, krümmungsreiche Talform mit reichlich Vegetation deren Höhe mit der Abflusstiefe vergleichbar ist
25	regelmässige Talform mit Bäumen und Hecken deren Höhe mit der Abflusstiefe vergleichbar ist
30	regelmässige Talform, niedrige Vegetation verglichen mit der Abflusstiefe
40	vorhandene Wasserflächen

Tabelle 2: Reibungsbeiwerte K (der K -Wert liegt zwischen 10 und 40 und repräsentiert einerseits die Reibung aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit, der Vegetation und der Bebauung in der durchflossenen Fläche sowie andererseits die Mäander im Tal)

2.4. Schritt 4: Berechnung von Q_{\max} in der Distanz X unterhalb der Sperrstelle

Mit dem in Schritt 3 ermittelten Hilfsparameter $J \cdot K^2$ kann aus Figur 2 die Beziehung zwischen Q_{\max}/Q_b' und $X/V_0^{1/3}$ herausgelesen werden. Dazu genügt es, $X/V_0^{1/3}$ zu berechnen und aus der Kurvenschar Q_{\max}/Q_b' in Funktion von $J \cdot K^2$ abzulesen.

Q_{\max} kann somit anschliessend mit dem Wert von Q_b' gemäss Abschnitt 2.2 berechnet werden.



X = Distanz ab Bresche in Fließrichtung [m]
Vo = Stauvolumen [m³]
Qb = Momentanabfluss aus der Bresche [m³/s]
Qb' = berichtigter Abfluss aus der Bresche [m³/s]
Qmax = Spitzenabfluss in X [m³/s]

J = Mittleres Gefälle zwischen Talsperre und Punkt X
K = Mittlerer Reibungskoeffizient auf der Strecke zwischen Talsperre und Punkt X

Figur 2: Diagramm zur Bestimmung von Q_{max}



2.5. Schritt 5: Berechnung der maximalen Wassertiefe Y_{\max} und der Fliessgeschwindigkeit v im Querschnitt X

Der Querschnitt am Standort X wird zu einer geometrischen Form nach Figur 1 vereinfacht, um entsprechend dieser Form einen Koeffizienten D_{\max} berechnen zu können. Jeder einzelne betrachtete Querschnitt wird dabei unabhängig von den andern schematisiert.

Die maximale Wassertiefe Y_{\max} im betrachteten Querschnitt X wird ermittelt durch Berechnung von D_{\max} sowie Unterscheidung von drei Fällen gemäss Tabelle 3. Für Fall 3 wird zusätzlich die Zwischenvariable U_{\max} aus Figur 3 herausgegriffen.

In Tabelle 3 bedeuten:

K_1 = Strickler-Reibungskoeffizient lokal am Standort X

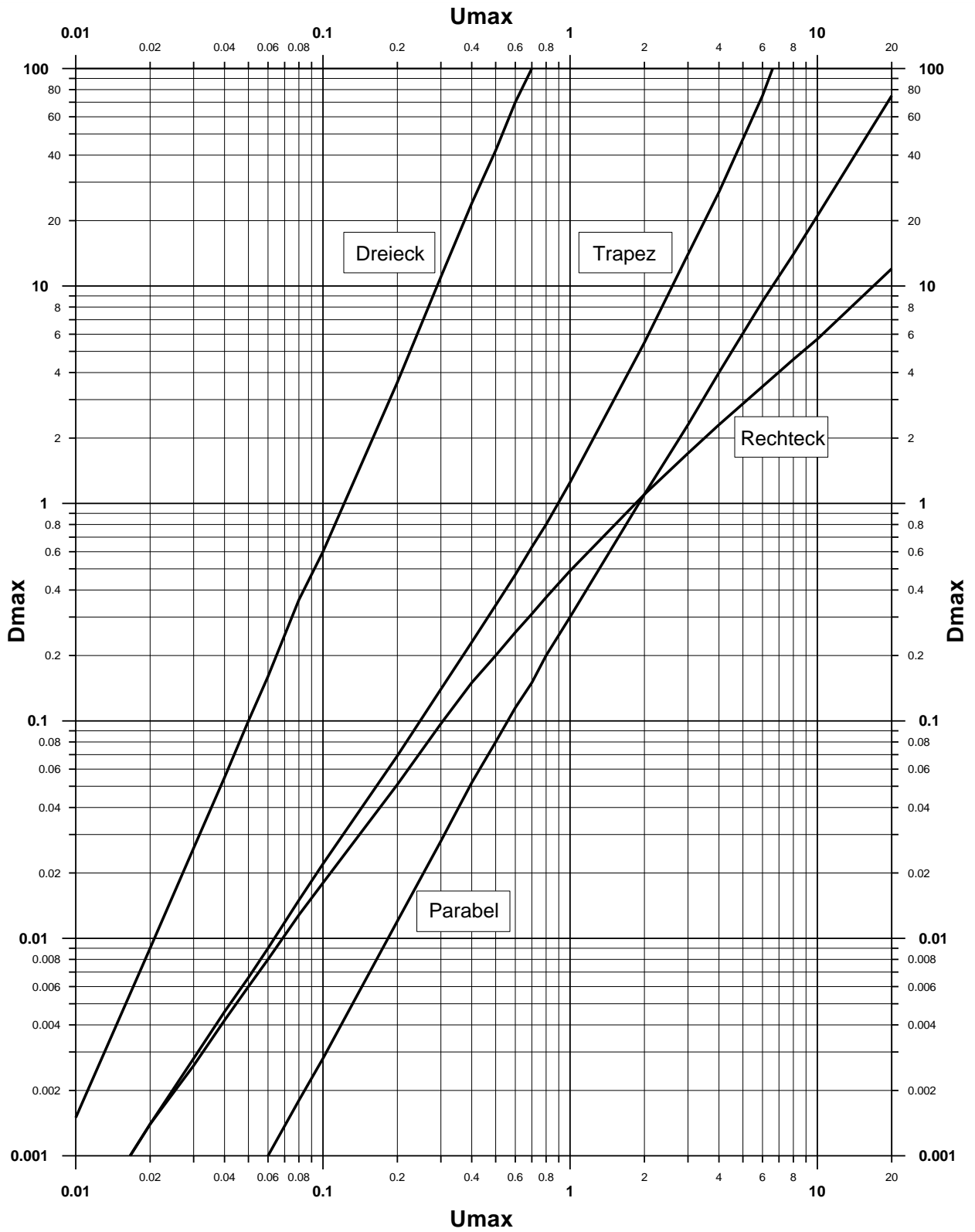
J_1 = Gefälle lokal am Standort X

Talform \ D_{\max}	D_{\max}	Fall 1: $D_{\max} \leq 10^{-3}$ Y_{\max}	Fall 2: $D_{\max} > 100$ Y_{\max}	Fall 3: $10^{-3} < D_{\max} < 100$ (U_{\max} aus Diagramm 2) Y_{\max}
Rechteck	$\frac{Q}{K_1 \cdot J_1^{1/2} \cdot L^{8/3}}$	$L \cdot D_{\max}^{3/5}$	$1.59 \cdot L \cdot D_{\max}$	$L \cdot U_{\max}$
Dreieck	$\frac{Q \cdot (1 + m^2)^{1/3}}{K_1 \cdot J_1^{1/2} \cdot m^{5/3}}$	$1.2 \cdot D_{\max}^{3/8}$	$1.2 \cdot D_{\max}^{3/8}$	$10 \cdot U_{\max}$
Trapez	$\frac{Q \cdot m^{5/3}}{K_1 \cdot J_1^{1/2} \cdot L^{8/3}}$	$\frac{L}{m} \cdot D_{\max}^{3/5}$	$1.3 \cdot D_{\max}^{3/8}$	$\frac{L}{m} \cdot U_{\max}$
Parabel	$\frac{Q}{K_1 \cdot J_1^{1/2} \cdot p^{16/3}}$	$1.37 \cdot p^2 \cdot D_{\max}^{0.46}$	$1.86 \cdot p^2 \cdot D_{\max}^{0.55}$	$p^2 \cdot U_{\max}$

Tabelle 3: Formeln zur Bestimmung der maximalen Wassertiefe Y_{\max}

Zur Ermittlung der Fliessgeschwindigkeit am Standort X wird die benetzte Querschnittsfläche F aufgrund der Wassertiefe Y_{\max} im betrachteten Querschnitt bestimmt (gemäss den Formeln in Figur 1) und anschliessend die Fliessgeschwindigkeit $v = Q_{\max}/F$ berechnet.

Soll zusätzlich die Energielinienhöhe ermittelt werden, wird aus der Fliessgeschwindigkeit die Geschwindigkeitshöhe $H_v = v^2/2g$ ermittelt und zur Wassertiefe Y_{\max} addiert. Die Kote der Energielinie ELA ergibt sich somit aus: $ELA = Z(\text{Talsole in X}) + Y_{\max} + H_v$.



Figur 3: Diagramm zur Bestimmung von U_{max} aus D_{max}



2.6. Schritt 6: Berechnung der Ankunftszeit der Flutwelle

Die Ankunftszeit der Flutwellenfront t kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$t = 10^{-5} \cdot \lambda \cdot X^2/h \quad (\text{g\u00fcltig, wenn } X^2/h > 10^4)$$

Darin bedeuten:

t = Ankunftszeit (in Minuten) der Flutwellenfront beim Standort X (in m)

h = H\u00f6hendifferenz zwischen Staukote des Sees vor dem Bruch und Sohlenkote im Talquerschnitt beim Standort X

λ = Parameter zwischen 1 und 4, wobei $\lambda = 2$ gew\u00e4hlt oder aus Tabelle 4 ermittelt werden kann.

$Y_0 / V_0 \backslash K$	<10	10	20	30	40	>40
$20 \cdot 10^{-6}$	>4	4	3	2	1.5	1
$2 \cdot 10^{-6}$	4	3	2	1.5	1.2	1
$0.2 \cdot 10^{-6}$	3	2	1.5	1.2	1	<1

Tabelle 4: λ -Werte f\u00fcr verschiedene Beckencharakteristiken und in Abh\u00e4ngigkeit von der Sohlenreibung K (Strickler), mit Y_0 = Wassertiefe bei der Sperrstelle (in m) und V_0 = Stauraumvolumen (in m^3).

Die Ankunftszeit der Flutwelle kann alternativ auch aufgrund der mittleren Flie\u00dfgeschwindigkeit in den einzelnen betrachteten Querschnitten ermittelt werden.



3. Beispiel

Gegeben:

- Speichercharakteristiken: Betrachtet wird ein Speicher mit einem Stauraumvolumen von $V_0 = 5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ und einer Stauhöhe von $Y_0 = 10 \text{ m}$. Die Form des Beckens sei normal.
- Breschenquerschnitt: Der Breschenquerschnitt sei parabolisch mit einer Breite von $L = 200 \text{ m}$ auf Kronenhöhe.
- Interessierender Querschnitt X: Betrachtet wird ein 5 km entfernter Querschnitt unterhalb der Bresche.
- Charakteristiken der Fliesstrecke: Das mittlere Gefälle flussaufwärts des betrachteten Querschnitts betrage $J = 1 \%$. Der mittlere Reibungskoeffizient sei $K = 20$.
- Charakteristiken im interessierenden Querschnitt: Der Querschnitt bei $X = 5 \text{ km}$ sei rechteckig und 200 m breit, das örtliche Gefälle J_1 betrage 5 % und der örtliche Reibungskoeffizient nach Strickler 25.

Gesucht:

- Gesucht sind die maximale Wassertiefe, die Fließgeschwindigkeit sowie die Anlaufzeit der Flutwelle im interessierenden Querschnitt 5 km unterhalb der Bresche.

3.1. Schritt 1: Berechnung des Breschenabflusses Q_b

Der Breschenquerschnitt ist parabolisch mit einer Breite von $L = 200 \text{ m}$ auf Kronenhöhe; somit ist (aus Tabelle 1 bzw. Figur 1): $Q_b = 0.54 \cdot L \cdot Y_0^{3/2} = 0.54 \cdot 200 \cdot 10^{3/2} = 3400 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.2. Schritt 2: Berechnung von Q_b'

Die Form des Beckens ist normal; somit ist nach Abschnitt 2.2:

$\mu = 1$ und somit $Q_b' = Q_b = 3400 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.3. Schritt 3: Berechnung des Hilfsparameters

Das mittlere Gefälle flussaufwärts des betrachteten Querschnitts an der Stelle $X = 5 \text{ km}$ ist $J = 1 \%$. Der mittlere Reibungskoeffizient ist $K = 20$. Somit ist $J \cdot K^2 = 4$.

3.4. Schritt 4: Berechnung von Q_{\max} in der Distanz X unterhalb der Sperrstelle

Mit $X/V_0^{1/3} = 5000 / (5 \cdot 10^6)^{1/3} = 30$ wird aus Figur 2 $Q_{\max}/Q_b' = 0.48$ herausgelesen und der maximale Abfluss in X ergibt sich somit zu $Q_{\max} = 0.48 \cdot Q_b' = 0.48 \cdot 3400 \text{ m}^3/\text{s} = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$.



3.5. Schritt 5: Berechnung der maximalen Wassertiefe Y_{\max} und der Fließgeschwindigkeit v im Querschnitt X

Der Querschnitt bei $X = 5000$ m ist rechteckig und 200 m breit, das örtliche Gefälle J_1 beträgt 5 % und der Reibungskoeffizient nach Strickler 25, somit ergibt sich (mit $L = 200$, $J_1 = 0.05$, $K_1 = 25$):

$$D_{\max} = \frac{Q}{K_1 \cdot J_1^{1/2} \cdot L^{8/3}} = 2 \cdot 10^{-4}$$

d.h. es ist $D_{\max} \leq 10^{-3}$; somit gilt Fall 1 gemäss Tabelle 3.

Die **maximale Wassertiefe** beträgt nach Tabelle 3, Fall 1: $Y_{\max} = L \cdot D_{\max}^{3/5} = 1.2$ m.

Mit einer benetzten Querschnittsfläche F von $200 \text{ m} \cdot 1.2 \text{ m} = 240 \text{ m}^2$ ergibt sich im Querschnitt eine **Fließgeschwindigkeit** $v = Q_{\max}/F = 1600 \text{ m}^3/\text{s} / 240 \text{ m}^2 = 6.7 \text{ m/s}$.

3.6. Schritt 6: Berechnung der Ankunftszeit der Flutwelle

Es ist $h = Z(\text{Wasserspiegel im See}) - Z(\text{Talsole in X})$: $h = Y_0 + 1 \% \cdot 5000 \text{ m} = 60$ m.

Mit $\lambda = 2$ (aus Tabelle 4, mit $Y_0 / V_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ und $K = 20$) ergibt sich anschliessend

$$t = 10^{-5} \cdot \lambda \cdot X^2/h = 10^{-5} \cdot 2 \cdot \{5000^2 / 60\} = 8.5 \text{ min.}$$