# Ermittlung des Querschnittes mit maximalem Geschiebetransportvermögen

Von Dr.-Ing. Selim YALIN


Zusammenfassung:

Diese Arbeit befasst sich mit der Ermittlung einer Querschnittsform für Strömung mit freier Oberfläche: Der Querschnitt eines geschiebeführenden Flusses soll so ausgebildet werden, dass das Geschiebetransportvermögen das mögliche Maximum erreicht. Die Aufgabenstellung ist ähnlich der Frage nach der Querschnittsausbildung mit geringstem Energieverlust oder der Frage nach der Form des Querschnittes eines offenen Gerinnes, bei dem die versickernde Wassermenge ein Minimum werden soll. Das vorliegende Problem ist besonders dort wichtig, wo Verladungen nicht stattfinden sollen. Zunächst wird die rein mathematische Analyse angeführt. Es folgt eine brauchbare Lösungsmethode, die an einem numerischen Zahlenbeispiel erläutert wird. Abschliessend wird der Einfluss der Querschnittsausbildung auf das Geschiebetransportvermögen untersucht.


Die wichtigsten Bezeichnungen:

| | |
|---|---|
| $Q_1$ | Wassermenge im Querschnitt I - I $m^3/s$ |
| $Q_2$ oder $Q$ | Wassermenge im Querschnitt II - II $m^3/s$ |
| $q$ | Entnahmewassermenge $m^3/s$ |
| $V_1$ | Jahreswasserfracht im Querschnitt I - I $m^3$ |
| $V_2$ | Jahreswasserfracht im Querschnitt II - II $m^3$ |
| $V_q$ | Jahreswasserfracht der Entnahme $m^3$ |
| $G_1$ | Geschiebemenge im Querschnitt I - I kg/s |
| $G_2$ oder $G$ | Geschiebemenge im Querschnitt II - II kg/s |
| $F$ | Jahresgeschiebefracht |
| $I$ | Sohlengefälle |
| $k_s$ | Gesamtrauhigkeitsbeiwert nach Gauckler-Strickler |
| $k_r$ | Rauhigkeitsbeiwert abhängig vom Sohlenmaterial |
| $\gamma$ | Spezifisches Gewicht des Wassers |
| $\gamma''_s$ | Spezifisches Gewicht des Sohlenmaterials unter Wasser |

$d_m$ Mittlerer Korndurchmesser des Geschiebes
$\omega$ Querschnittsfläche
$\chi$ Benetzter Umfang

## I. Vorbemerkung.

Die vorliegende Arbeit behandelt ein Problem, das besonders oft bei Wasserfassungen oder Trennbauwerken in geschiebeführenden Flüssen auftritt: Die Wahl der Querschnittsform, die bei gleichbleibenden anderen Bedingungen den grössten Geschiebetrieb im Jahresmittel erzeugt. Eine in der Praxis anwendbare Lösung dieses Problems ist bei O. Streck: "Grund- und Wasserbau", Band II(1) zu finden. Der Verfasser bestätigt, dass die Annahme einer bestimmten Wassertiefe, der bettbildenden Wassertiefe, einen Fehler in das beschriebene Verfahren bringt. Man erkennt, dass eine brauchbare Lösungsmethode die mit der Zeit veränderlichen Wassertiefen berücksichtigen müsste(2). Das von O. Streck angegebene Verfahren berücksichtigt also die in einem Zeitinterval Veränderliche durch einen bestimmten Einzelwert. Der Einfluss der Bettumgestaltung auf den Geschiebetrieb umfasst den Fluss in der gesamten zeitlichen dynamischen Veränderung. Bei der Behandlung der Aufgabe sollte daher vermieden werden, einen einzelnen Wert der Veränderlichen (Wassermenge oder Wassertiefe), der nur für einen kurzen Zeitraum innerhalb des Gesamt-Zeitintervalles zutrifft, herauszugreifen und an Stelle der mit der Zeit funktionell Veränderlichen zu setzen. LUDIN fasst das Vorgesagte in den Worten zusammen: "Eine einwandfreie und praktisch anwendbare Bestimmung muss auf dem "Zeitintegral" der Wasser- und Geschiebeführung aufbauen"(3).

Die vorliegende Arbeit macht den Versuch, eine praktisch anwendbare Lösung des aufgezeichneten Problems unter Berücksichtigung der zeitlich Veränderlichen zu finden. Für die Formulierung der Geschiebebewegung wurde ausserdem die Meyer-Peter'sche Formel, die den Einfluss der Querschnittsform auf die Sohlbewegung berücksichtigt, herangezogen. Die Abhängigkeit der Geschiebebewegung von der Form des Querschnittes ist von besonderem Interesse, da dieser Einfluss in der veralteten du BOYS'schen Formel, die von der

Annahme ausgeht, die Schleppkraft sei proportional der Wassertiefe und unabhängig von der Querschnittsform, nicht enthalten ist.

## II. Aufgabenstellung.

Es soll die Wasserfassung eines geschiebeführenden Flusses betrachtet werden, wie sie in Abb. 1 aufskizziert ist. Die Entnahmewassermenge betrage q $m^3$/s. Die zeitliche Veränderung dieser Wassermenge über das Jahr sei in Form der Wasserentnahmelinie q = q(t) gegeben.

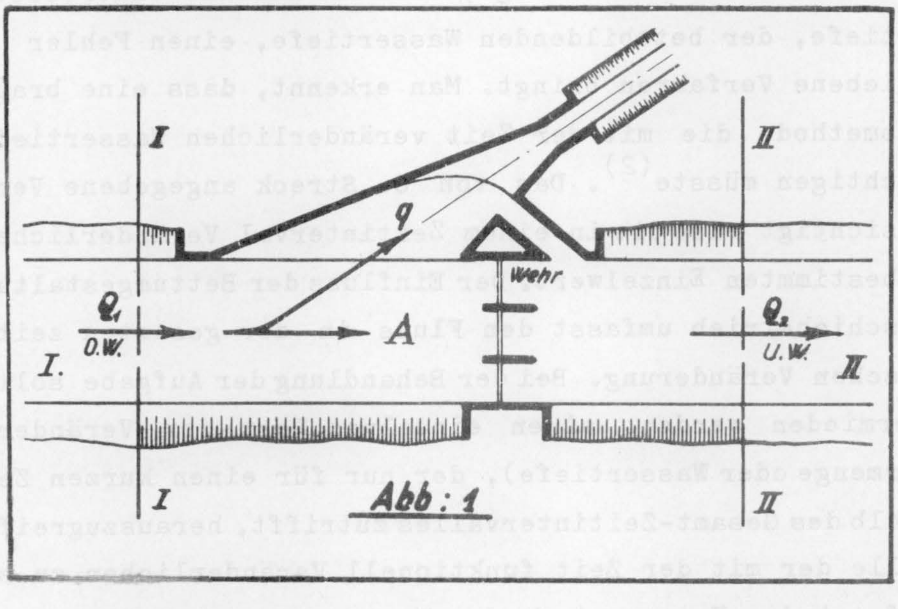

Abb: 1

Die Querschnitte I - I und II - II (Abb. 1) werden soweit ober- bzw. unterhalb der Entnahmestelle angenommen, dass die Strömung in diesen Querschnitten nicht durch die Entnahme gestört wird. Es kann somit eine gleichmässige Geschwindigkeitsverteilung angenommen werden. In den folgenden Betrachtungen werden die entsprechenden Strömungswerte durch die Indizes 1 und 2 den Querschnitten zugeordnet.

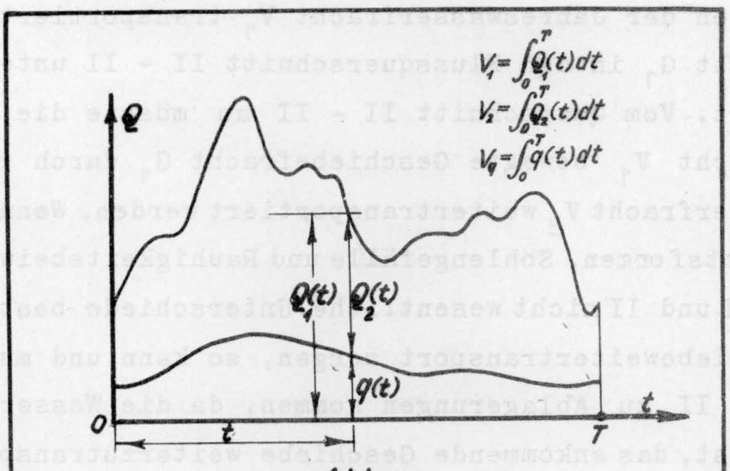


Abb: 2

Für die Abflussmengen gilt (Abb. 2):

$$Q_2(t) = Q_1(t) - q(t) \qquad (1)$$

oder für die jährliche Wasserfracht:

$$V_2 = V_1 - V_q = V_1 \left(1 - \frac{V_q}{V_1}\right) \qquad (2)$$

Es wird angenommen, dass das Trennbauwerk mit beweglichen Wehrverschlüssen ausgestattet ist, sodass der Verladung des Stauraumes durch entsprechende Schützbedienung von Zeit zu Zeit begegnet werden kann. Das im Stauraum angelandete Material wird durch den Spülvorgang ins UW transportiert.

Ausserdem wird vorausgesetzt, dass die Wasserfassung so angeordnet ist, dass der Geschiebeeintrieb in den Entnahmekanal ausgeschlossen ist. Sollte jedoch bewegliches Sohlenmaterial mit der Entnahmewassermenge über die Entnahmeschwelle wandern, so wird angenommen, dass durch Spülschleusen und Spülkanäle das Geschiebe unmittelbar hinter dem Wehr wieder dem UW des Wehres zugeführt werden kann, sodass auf jeden Fall das gesamte im OW ankommende Sohlenmaterial ins UW des Wehres gelangt. Unter diesen Bedingungen kann man also behaupten, dass im Zeitraum T, z.B. innerhalb eines

Jahres, die von der Jahreswasserfracht $V_1$ transportierte gesamte Geschiebefracht $G_1$ in den Flussquerschnitt II - II unterhalb des Wehres gelangt. Vom Querschnitt II - II an müsste die im OW von der Wasserfracht $V_1$ bewegte Geschiebefracht $G_1$ durch die um $V_q$ kleinere Wasserfracht $V_2$ weitertransportiert werden. Wenn zwischen den Querschnittsformen, Sohlengefälle und Rauhigkeitsbeiwerten der Querschnitte I und II nicht wesentliche Unterschiede bestehen, die für den Geschiebeweitertransport sorgen, so kann und muss es unterhalb II - II zu Ablagerungen kommen, da die Wasserfracht $V_2$ nicht ausreicht, das ankommende Geschiebe weiterzutransportieren. Die Wahrscheinlichkeit dieser Verladungen der Flußstrecke unterhalb II - II wächst mit dem Wert des Quotienten $\frac{V_q}{V_1}$ an.

Die vorliegende Fragestellung kann wie folgt formuliert werden: Bei Wasserfassungsanlagen wird es im allgemeinen nicht möglich sein, die unter vorerwähnten Bedingungen vom OW ins UW des Wehres transportierte Geschiebefracht $G_1$ durch die kleinere Wasserfracht weiterzubewegen. Die an das Wehr anschliessende Querschnittsausbildung ist also so zu wählen, dass die natürliche Transportfähigkeit des Flusses voll ausgenützt wird, d.h. die der Wasserfracht $V_2$ zugeordnete Geschiebefracht das Maximum erreicht. Dadurch werden die sonst regelmässig erforderlichen Baggerungen, die eine Verlandung des Flusses unterhalb des Wehres vermeiden sollen, auf ein Minimum reduziert. In den meisten Fällen werden sich die zunächst hohen, einmaligen Kosten der künstlichen Gestaltung des Flussquerschnittes mit maximalem Geschiebetransportvermögen lohnen, wenn hierdurch eine wesentliche Senkung der laufenden Betriebskosten erreicht wird.

## III. Theoretische Betrachtungen zur Aufgabenstellung.

Nach den heutigen Erkenntnissen sind die Vorgänge bei der Geschiebebewegung hauptsächlich von den physikalischen Eigenschaften des Wassers und des Sohlenmaterials, sowie von der Geschwindigkeitsverteilung der Strömung abhängig.

Die erwähnten physikalischen Eigenschaften können nicht geändert werden. Um die Geschiebebewegung zu beeinflussen, bleibt also nur die Möglichkeit, das Geschwindigkeitsprofil der Strömung derart zu ändern, dass das anzustrebende Optimum erreicht wird. Die Form der Geschwindigkeitsverteilung ist durch die geometrische Gestaltung des Flussbettes (Sohlenneigung und Querschnittsform) und die physikalischen Eigenschaften des Sohlenmaterials (Rauhigkeitsbeiwert) bedingt. Die Lösung der vorliegenden Aufgabe besteht also in der Bestimmung der für den Geschiebetransport günstigsten Querschnittsform, da sowohl die Änderung des Rauhigkeitsbeiwertes, wie auch die Vergrösserung der Sohlenneigung eine nicht sinnvolle Lösung des Problems darstellen.

Die Aufgabenstellung wird in Gleichung (3) zusammengefasst: Der Querschnitt II - II ist so auszubilden, dass die durch $Q_2 = Q_2(t)$ in der Zeiteinheit (Sekunde) transportierte Geschiebemenge das Maximum erreicht.

$$\int_0^T G_2 \, dt \longrightarrow \max \qquad (3)$$

Die folgenden Überlegungen behandeln ausschliesslich die Form des Querschnittes 2. Der Index 2 wird zur Vereinfachung nicht mehr geschrieben.

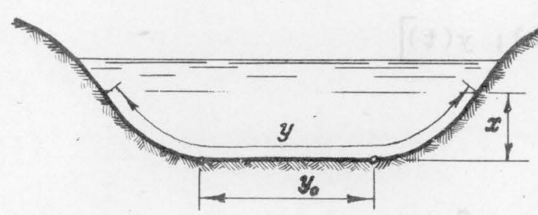


Abb: 3

Definition des Querschnittes:

Die Höhe des Querschnittes wird mit der Veränderlichen x bezeichnet und wird auf die Sohle (x = 0) bezogen. Wie aus Abb. 3

zu ersehen ist, beträgt die Höhe x und die Breite y. Zur Berechnung nach der Meyer-Peter'schen Formel, der dem Beginn des Geschiebetriebes entsprechenden Wassertiefe $h_o$ und zur Bestimmung - mit Hilfe des Wertes $h_o$ - der Breite B = y, auf der der Geschiebetrieb stattfindet, ist die Annahme notwendig: $x = 0 \quad y = y_o \neq 0$. Die Erklärung dieser Abhängigkeit ist in Müller: "Über die Geschiebebewegung"[4] zu finden.

Das Produkt $k_s \cdot I^{1/2}$ der Formel von Gauckler-Strickler wird durch die Konstante A ersetzt.

$$Q(t) = A \cdot \omega \cdot R^{2/3} \qquad (4)$$

$\omega$ = Querschnittsfläche
R = hydraulischer Radius

Die bekannten Funktionen $\omega$ und R ändern sich mit der Zeit t. Es ist zweckmässig, die funktionelle Beziehung $y = y(x)$ in der parametrischen Form darzustellen:

$x = x(t)$
$y = y(t)$

Dann nimmt die Gleichung (4) die folgende Form an, in der Q eine bekannte funktionelle Beziehung zwischen x(t) und y(t) ist:

$$Q(t) = f\left[x(t);\ y(t)\right] \qquad (5)$$

oder implizit:

$$\Phi\left[x(t);\ y(t);\ t\right] = 0 \qquad (6)$$

Die sekundliche Geschiebemenge beträgt nach Meyer-Peter:

$$G = g'' = \left(4 \cdot \gamma^{2/3} \cdot g^{1/3} \cdot \frac{k_s}{k_r} \cdot I \frac{B}{\chi} \cdot h - 4 \cdot 0{,}047 \cdot \frac{\gamma''_s}{\gamma^{2/3}} \cdot d_m \cdot g^{1/3}\right)^{3/2} \cdot B \qquad (7)$$

Folgende Substitutionen werden eingeführt:

$$h = x; \quad B = y_+ \quad (y_+ = \text{die Breite, die der Wassertiefe } x - h_o \text{ entspricht})^{(4)}$$

also:

$$y_+ = y(x - h_o)$$

Ausserdem werden die konstanten Grössen des Flussufers oder des Kanales in die Bezeichnungen $\alpha$ und ß zusammengefasst:

$$\alpha = 4 \cdot \gamma^{2/3} \cdot g^{1/3} \cdot \frac{k_s}{k_r} \cdot I$$

$$ß = 4 \cdot 0{,}047 \cdot \frac{\gamma''_s}{\gamma^{2/3}} \cdot d_m \cdot g^{1/3}$$

Die Meyer-Peter'sche Formel lautet dann:

$$G = (\alpha \cdot \frac{y_+}{\varkappa} \cdot x - ß)^{3/2} \cdot y_+$$

$$G = G\Big(x(t);\ y(t)\Big) \qquad (8)$$

Man erhält also wieder eine bekannte Funktion der unbekannten Funktion $x = x(t)$ und $y = y(t)$.

Auf Grund der vorliegenden Erklärung ist die genaue mathematische Formulierung möglich: Gesucht wird die Form der Funktion $x = x(t)$ und $y = y(t)$, dass

$$\int_0^T G\Big(x(t);\ y(t)\Big)\, dt \longrightarrow \max \qquad (9)$$

wobei die gesuchten Funktionen auch die Gleichung (6)

$$\Phi\Big(x(t);\ y(t);\ t\Big) = 0$$

erfüllen müssen. Es handelt sich also im mathematischen Sinn um ein sogenanntes "Variationsproblem mit Nebenbedingungen".

Zur Vereinfachung der Aufgabenstellung wird die Form des Ufers durch die Funktion $x = y(x)$ vorgegeben. Es wird dann die Sohlenbreite $B = y_o$ gesucht, die auch die Maximalbedingung der Gleichung (9) erfüllt. Hierdurch wird erreicht, dass an Stelle der zwei unbekannten Funktionen der Wert einer Grösse gesucht wird. Es ergibt sich somit folgende Formulierung der mathematischen Aufgabenstellung:

Die der Gleichung (5) entsprechende Gleichung lautet:

$$Q(t) = f(x;\ y_o) \qquad (10)$$

d.h. die Wassertiefe y ändert sich in Abhängigkeit von der Zeit t und der Sohlenbreite $y_o$:

$$x = x(t;\ y_o) \qquad (11)$$

und somit:

$$G = G(x;\ y_o) = G\left[x(t;\ y_o);\ y_o\right] = G(t;\ y_o)$$

Gleichung (9) wird durch Gleichung (12) ersetzt:

$$\int_0^T G(t;\ y_o)\ dt = F(T;\ y_o) \longrightarrow \max \qquad (12)$$

oder:

$$\frac{d\ F(T;\ y_o)}{d\ y_o} = 0 \qquad (13)$$

Durch Elimination der Grösse T aus den Gleichungen (11) und (13) ergibt sich der gesuchte Wert $y_o$.

Die vorstehenden Betrachtungen zeigen einen Weg, der die notwendigen Grundlagen für die Ausführung des folgenden Verfahrens darstellt.

Die praktische Anwendung des Verfahrens wird an einem Beispiel erläutert.

## IV. Lösungsverfahren.

Entsprechend den vorhergegangenen Überlegungen wird die Form des Ufers als bekannt vorausgesetzt. Gesucht wird die Sohlenbreite $B = y_o$, die maximalen jährlichen Geschiebetransport gewährleistet. Für die Querschnittsausbildung wird die Trapezform gewählt (Abb.4).

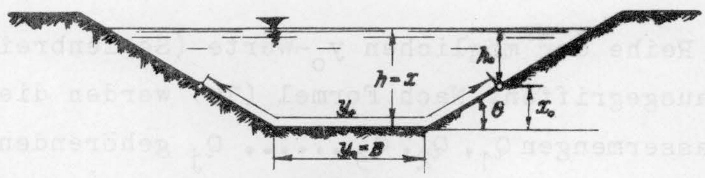


Abb: 4

Die Böschungen sind unter dem Winkel gegen die horizontale Flußsohle geneigt. Für den Querschnitt gilt:

$$\omega = (y_o + mx) \cdot x \qquad \chi = y_o + 2\,nx$$

Nach Formel (4) ergibt sich für die Wassermenge nach Gauckler-Strickler die Gleichung (14):

$$Q(t) = \frac{A \cdot \left[(y_o + mx) \cdot x\right]^{5/3}}{(y_o + 2\,nx)^{2/3}} \tag{14}$$

Es bedeuten:

$$m = \mathrm{ctg}\,\theta \quad ; \quad n = \frac{1}{\sin\theta} \quad ; \quad A = k_s \cdot I^{1/2}$$

Die Meyer-Peter'sche Formel für die Geschiebemenge der gesamten Querschnittsbreite lautet:

$$G = y_+ \left[ \alpha \frac{y_+ x}{(y_o + 2\,nx)} - \beta \right]^{3/2} \tag{15}$$

wobei

$$y_+ = y_o + 2\,n(x_o) \qquad (16)$$

Für breite Gerinne mit geringer Wassertiefe kann man den zweiten Summanden $2\,n(x_o)$ der Gleichung (16) gegenüber $y_o$ vernachlässigen. Es wird also:

$$y_+ = y_o$$

Aus der Reihe der möglichen $y_o$-Werte (Sohlenbreite) wird ein Wert $y_{o1}$ herausgegriffen. Nach Formel (14) werden die zu den angenommenen Wassermengen $Q_1, Q_2, Q_3 \ldots\ldots Q_j$ gehörenden Wassertiefen $x_{11}, x_{12}, x_{13} \ldots\ldots x_{1j}$ berechnet. Die Geschiebemengen $G_{11}, G_{12} \ldots\ldots G_{1j}$ ergeben sich mit Hilfe der Gleichung (14) durch Substitution von $x_{11}$ und Einsetzen in Gleichung (15). Derselbe Rechnungsgang wird für einen zweiten Wert der Sohlenbreite $y_{o2}$ wiederholt. Für dieselben Wassermengen $Q_1, Q_2, Q_3 \ldots\ldots Q_j$ liefert der zweite Rechnungsgang die Werte $x_{21}, x_{22}, x_{23} \ldots\ldots x_{2j}$ und somit $G_{21}, G_{22}, G_{23} \ldots\ldots G_{2j}$ usw. Auf diese Weise erhält man die den Grössen $y_{oi}$ $(i = 1,2 \ldots\ldots)$ und $Q_j$ $(j = 1,2 \ldots\ldots)$ entsprechenden Werte der Geschiebemenge $G_{ij}$ $(i = 1,2 \ldots\ldots)$ $(j = 1,2 \ldots\ldots)$. Wie in Abb. 5 gezeigt wird, findet man zu jeder Wassermenge $Q_j$ die dazugehörige Zeit $t_j$, auf deren Abszisse man die Werte $G_{ij}$ aufträgt. Es zeigt sich eine Schar von Geschiebemengenganglinien. Jede dieser Ganglinien gehört zu einer bestimmten Sohlenbreite $y_{oi}$. Die zwischen den Kurven $y_{oi}$ und der Abszissenachse liegenden Flächen $F_i$ sind proportional dem jährlichen Geschiebetransport des Querschnittes mit der Sohlenbreite $y_{oi}$.

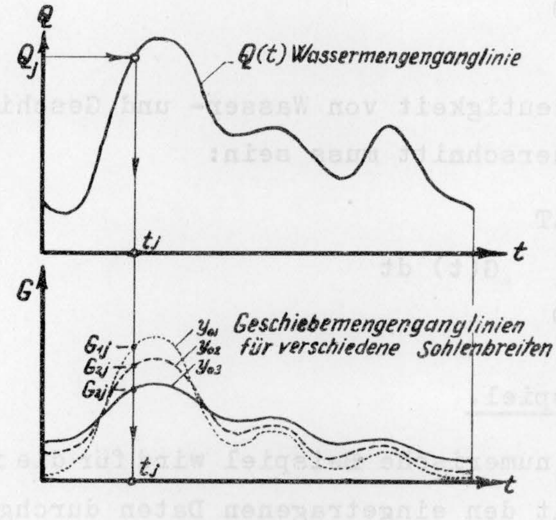


Abb: 5

Die durch Planimetrieren gefundenen Werte $F_i$ werden in einem rechtwinkligen Koordinatensystem über den zugeordneten Werten $y_{oi}$ aufgetragen (Abb. 6).

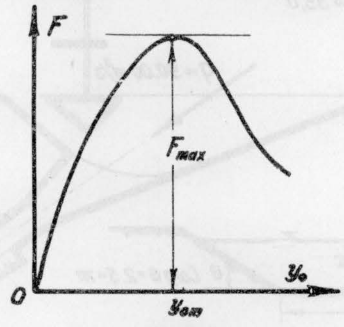


Abb: 6

Diese Darstellung liefert sofort den zum Ordinatenmaximum $F_{max}$ gehörenden Abszissenwert der gesuchten Sohlenbreite $y_{om}$.

Die bisherigen Ausführungen für die Wassermengenlinie Q(t) sind auch für die Abflussmengendauerlinie $\overline{Q}(t)$ gültig, denn es gilt:

$$\int_0^T Q(t)\,dt = \int_0^T \overline{Q}(t)\,dt$$

Wegen der Eindeutigkeit von Wasser- und Geschiebemengen für einen bestimmten Querschnitt muss sein:

$$\int_0^T G(t)\,dt = \int_0^T \overline{G}(t)\,dt$$

## V. Numerisches Beispiel.

Das folgende numerische Beispiel wird für die in Abb. 7 dargestellte Anlage mit den eingetragenen Daten durchgerechnet. Die Abflussmengendauerlinie des Flusses wird als gegeben angenommen.

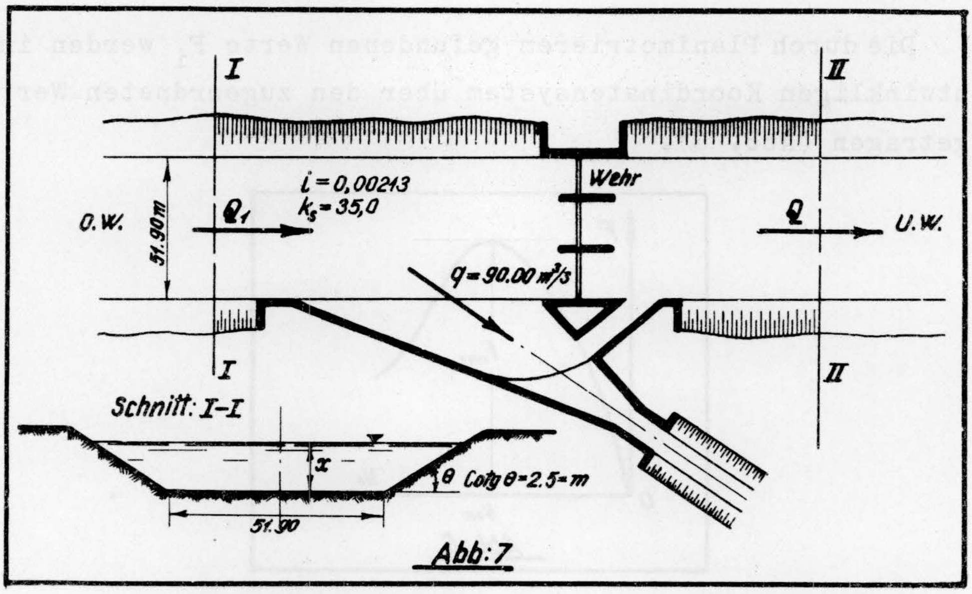


Abb:7

Ausserdem wird die Annahme gemacht, dass die Abhängigkeit zwischen Geschiebe- und Wassermengen rechnerisch oder experimentell ermittelt worden ist. Die Subtraktion $Q_1(t) - q = Q_2(t)$ ergibt die Abflussmengendauerlinie unterhalb des Wehres. Da $q = 9o\ m^3/s$ = const. ist, ergibt sich $Q_2(t)$ durch Verschiebung der Abszissenachse um den Betrag q in der positiven Ordinatenrichtung.

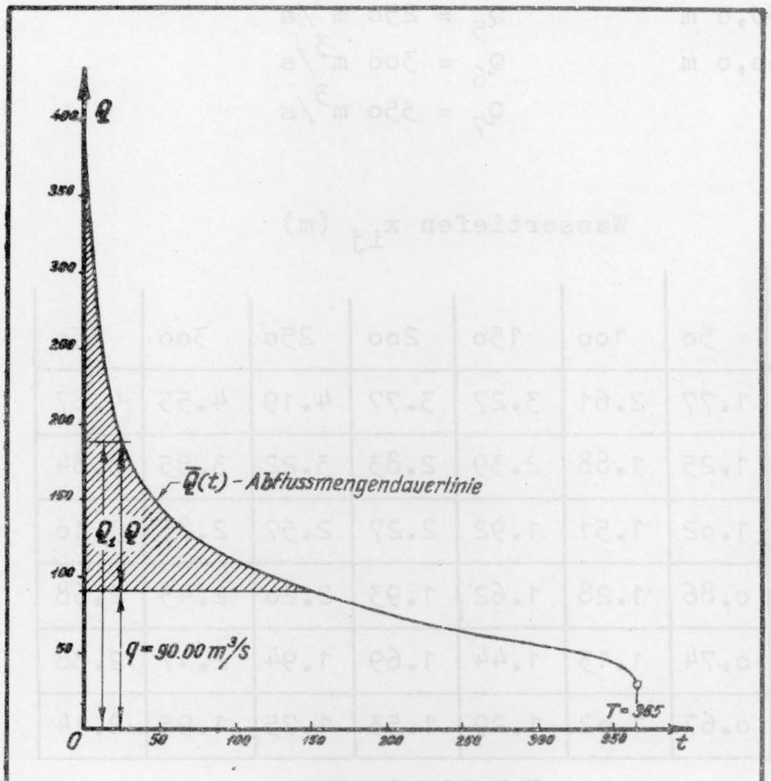


Abb:8

Die physikalischen Eigenschaften des beweglichen Sohlenmaterials stimmen oberhalb und unterhalb des Wehres überein.

$k_s = 35$;  $I = 0{,}00213$;  $m = 2{,}5$;  $n = 2{,}7$

Allgemein: $$Q = k_s \cdot I \cdot \frac{[(y_o + mx)x]^{5/3}}{(y_o + 2nx)^{2/3}}$$

Numerisch: $$Q = 1{,}61 \cdot \frac{[(y_o + 2{,}5x)x]^{5/3}}{(y_o + 5{,}4x)^{2/3}}$$

In Tabelle 1 sind die berechneten Wassertiefen $x_{ij}$ für die folgenden Sohlenbreiten und Wassermengen zusammengestellt:

$y_{o1} = 10{,}0$ m  $Q_1 = 50\ m^3/s$
$y_{o2} = 20{,}0$ m  $Q_2 = 100\ m^3/s$
$y_{o3} = 30{,}0$ m  $Q_3 = 150\ m^3/s$
$y_{o4} = 40{,}0$ m  $Q_4 = 200\ m^3/s$

$y_{o5} = 50{,}0$ m $\quad Q_5 = 250$ m³/s

$y_{o6} = 60{,}0$ m $\quad Q_6 = 300$ m³/s

$\quad Q_7 = 350$ m³/s

Wassertiefen $x_{ij}$ (m)

| $y_{oi}$ (m) \ $Q_j$ ($\frac{m^3}{s}$) | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10.00 | 1.77 | 2.61 | 3.27 | 3.77 | 4.19 | 4.55 | 4.87 |
| 20.00 | 1.25 | 1.88 | 2.39 | 2.83 | 3.22 | 3.55 | 3.84 |
| 30.00 | 1.02 | 1.51 | 1.92 | 2.27 | 2.57 | 2.85 | 3.10 |
| 40.00 | 0.86 | 1.28 | 1.62 | 1.93 | 2.20 | 2.45 | 2.68 |
| 50.00 | 0.74 | 1.13 | 1.44 | 1.69 | 1.94 | 2.17 | 2.38 |
| 60.00 | 0.67 | 1.02 | 1.29 | 1.53 | 1.75 | 1.95 | 2.14 |

Tabelle 1

Die Meyer-Peter'sche Formel lautet unter der Annahme $y = y_o$ und den folgenden Beträgen der Beiwerte: ($\gamma_s'' = 1{,}68$; $\gamma = 1{,}00$;) $d_m = 0{,}016$; $\left(\frac{k_s}{k_r}\right)^{2/3} = 0{,}690$ (wobei $k_r$ nach $k_r = \frac{26}{d_{90}^{1/6}}$ gerechnet ist[4]; $i = 0{,}00213$)

$$(g'')^{2/3} = 0{,}0126 \left(\frac{y_o x}{y_o + 5{,}4x} - 0{,}86\right)$$

oder:

$$G = g'' \cdot y_o = y_o \left[0{,}0126 \left(\frac{y_o x}{y_o + 5{,}4x} - 0{,}86\right)\right]^{2/3}$$

Über die Werte $y_{oi}$ und $x_{ij}$ werden für die Wassermengen $Q_j$ die Geschiebemengen $G_{ij}$ berechnet. Das Ergebnis dieser Rechnung zeigt Tabelle 2.

Werte $G_{ij}$ (t/s)

| $y_{oi}$ (m) \ $Q_j$ ($\frac{m^3}{s}$) | 5o | 1oo | 15o | 2oo | 25o | 3oo | 35o |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1o.oo | o.135 | 1.465 | 2.55o | 3.38o | 3.921 | 4.41o | 4.77o |
| 2o.oo | o.579 | 6.88o | 12.95o | 18.ooo | 18.8o2 | 26.3oo | 29.6oo |
| 3o.oo | o.ooo | 8.o6o | 17.8oo | 27.6o1 | 35.5oo | 43.9o1 | 51.ooo |
| 4o.oo | - | 6.22o | 18.25o | 31.o11 | 43.6o4 | 54.9oo | 66.2o4 |
| 5o.oo | - | 3.7oo | 16.62o | 3o.1o7 | 45.11o | 6o.5oo | 74.o14 |
| 6o.oo | - | 1.565 | 13.2oo | 29.1oo | 44.6oo | 6o.8oo | 75.8o3 |

Tabelle 2

Man findet mit Hilfe der Abflussdauerkurve die entsprechenden Zeitpunkte für die Wassermengen 5o, 1oo, 15o ... $m^3/s$ und überträgt auf die Abszissen (Zeitpunkte) die Ordinaten $G_{ij}$ aus Tabelle 2. So bekommt man die "Geschiebedauerlinien" für die Breiten 1o,o; 2o,o ...... m (Abb. 9a). Die Flächen zwischen der Abszissenachse und den Geschiebedauerlinien betragen:

$F_{1o}$ = 3,4 $cm^2$ (Abszissenmaßstab: 1 cm = 5 Tage)
$F_{2o}$ = 15,5 $cm^2$ (Ordinatenmaßstab: 1 cm = 5 kg/sec)
$F_{3o}$ = 2o,5 $cm^2$
$F_{4o}$ = 19,2 $cm^2$
$F_{5o}$ = 17,o $cm^2$
$F_{6o}$ = 14,4 $cm^2$

Multipliziert man diese Werte mit dem Maßstabsfaktor 1 $cm^2$ = 5 x(5 x 864oo) = 216o t, so erhält man die absoluten Werte der jährlichen Geschiebefrachten.

Die gefundenen Werte $F_i$ werden über den Breiten $y_o$ aufgetragen. Abb. 9b zeigt die Abhängigkeit der graphisch ermittelten Grössen. Die Sohlenbreite mit maximalem Geschiebetrieb ergibt sich für das vorliegende numerische Beispiel zu $y_{om}$ = 29,o m.

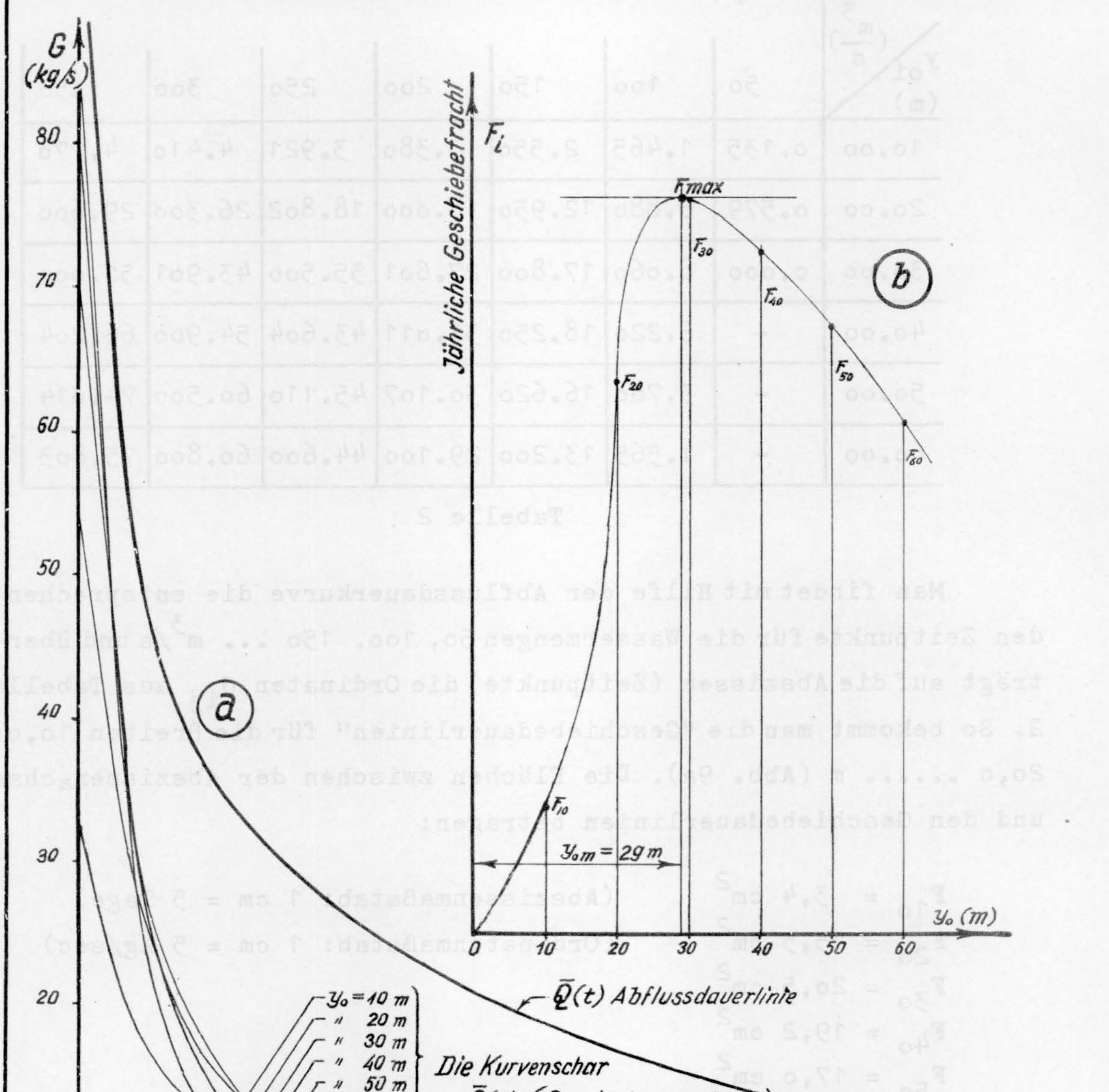
G
(kg/s)
80
70
60
50
40
30
20
10
0
a
0
10
20
30
40
50
60
t (Tage)
Jährliche Geschiebefracht
$F_i$
Fmax
$F_{10}$
$F_{20}$
$F_{30}$
$F_{40}$
$F_{50}$
$F_{60}$
b
$y_{om}$ = 29 m
$y_o$ (m)
0
10
20
30
40
50
60
$\bar{Q}(t)$ Abflussdauerlinie
$y_o$ = 10 m
" 20 m
" 30 m
" 40 m
" 50 m
" 60 m
Die Kurvenschar
$\bar{G}_i(t)$ (Geschiebedauerlinien)

Abb: 9

Bemerkenswert ist, wie sehr die jährliche Geschiebefracht von der Sohlenbreite $y_o$ abhängig ist. So wird z.B. bei annähernd doppelter Sohlenbreite $y_o$ = 6o m die Geschiebefracht nur 2/3 des möglichen Maximums für $y_o$ = 29,o m erreichen, während bei der halben Sohlenbreite $y_o$ = 15 m die jährlich transportierte Geschiebemenge nicht einmal die Hälfte des Grösstwertes beträgt.

Literatur:

1. O. Streck: "Grund- und Wasserbau in praktischen Beispielen" Band II, Seite 595 - 6o5.
2. O. Streck: "Grund- und Wasserbau in praktischen Beispielen" Band II, Seite 6o4.
3. A. Ludin: "Über den Begriff des bettbildenden Wasserstandes" Wasserwirtschaft, Wien 1932, Heft 36.
4. R. Müller: "Wasserfragen in geschiebeführenden Flüssen" Sonderheft von "Wasser- und Energiewirtschaft" (Zur Hundertjahrfeier der ETH) Zürich 1955.