

## GRUNDBEGRIFFE DER GERINNEHYDRAULIK

Helmut Kobus

## INHALT

1. Einleitung
  2. Definitionen und Grundgleichungen
    - 2.1 Definitionen
    - 2.2 Gleichungen für stationäre Gerinneströmung
    - 2.3 Druckverteilung in stationärer Strömung
  3. Reibungsfreie, stationäre Gerinneströmung
    - 3.1 Fließzustände
    - 3.2 Wasserspiegellagen bei Querschnittsänderungen
    - 3.3 Abflußkontrolle
  4. Reibungsbehaftete Gerinneströmung
    - 4.1 Normalabfluß; freifließende Gewässer
    - 4.2 Leicht ungleichförmiger Abfluß; gestaute Gewässer
    - 4.3 Strömungsverhältnisse an Abstürzen:  
Abflußkontrolle und Rückstau
- Literaturhinweise

## 1. EINLEITUNG

Abflußmeßstellen und -bauwerke in natürlichen Gewässern und Kanalsystemen dienen primär dem Zweck, an einem Gewässerquerschnitt eine eindeutige, möglichst zeitlich konstante Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluß herzustellen, so daß aus einer einfachen Wasserstandsmessung der jeweilige Abfluß ermittelt werden kann. Dies setzt voraus, daß die Abflußmeßstelle hydraulisch einwandfrei dimensioniert und angeordnet wird. Die notwendigen und verfügbaren Bemessungskriterien für die hydraulische und bauliche Gestaltung und Anordnung von Abflußmeßstellen und -bauwerken sollen im vorliegenden Fortbildungslehrgang vermittelt werden. Dies setzt Kenntnis und Verständnis der wichtigsten Grundbegriffe der Gerinnehydraulik voraus.

Im vorliegenden Beitrag werden die elementaren Grundlagen der Gerinnehydraulik zusammenfassend dargestellt, sofern

sie für das weitere Verständnis im Rahmen dieses Lehrgangs gebraucht werden. Es handelt sich also um ein gestrafftes und gezieltes Repetitorium von Begriffen und Zusammenhängen, die klassischer Bestandteil der Grundvorlesungen in Technischer Hydraulik für Bauingenieure an allen Universitäten sind und insofern bei allen Teilnehmern zunächst als bekannt vorausgesetzt werden können. Eine geraffte Auffrischung der Grundbegriffe wird dem Lehrgang dennoch vorangestellt, weil die theoretischen Zusammenhänge als Grundlage und Referenz für das Verständnis der Abflußvorgänge unerlässlich sind; die nachfolgenden Referate des Lehrgangs bauen auf diesen Grundlagen auf.

Der vorliegende Beitrag behandelt die Gerinnehydraulik in knappster Form und ausschließlich lehrgangsbezogen; für eine umfassende und ausgewogene Darstellung der Gerinnehydraulik wird auf die zahlreichen guten Lehrbücher hingewiesen, die diesem Thema gewidmet sind (siehe Literaturverzeichnis).

## 2. DEFINITIONEN UND GRUNDGLEICHUNGEN

### 2.1 Definitionen

Gerinneströmungen sind in der Regel dadurch charakterisiert, daß die Ausdehnung in Strömungsrichtung sehr viel größer ist als in Querrichtung. Aus diesem Grund lassen sich Gerinneströmungen mit hinreichender Genauigkeit durch eindimensionale Beziehungen charakterisieren, denen querschnittsgemittelte Werte zugrunde liegen.

In Bild 1 ist ein typischer Querschnitt durch ein natürliches Gewässer mit einer typischen zugehörigen Geschwindigkeitsverteilung dargestellt. Die Geschwindigkeit ist von Ort zu Ort verschieden, und die Wassertiefe variiert über die Breite des Flusses. Für eine querschnittsgemittelte, eindimensionale Betrachtung werden solche Querschnitte durch folgende Größen charakterisiert:

$$\begin{aligned}
 & \text{Querschnittsfläche } A \\
 & \text{Breite des Wasserspiegels } b_{\text{wsp}} \\
 & \text{benetzter Umfang } L_u \\
 & \text{Abfluß } Q = \int_{(A)} v \, dA \\
 & \text{hydraulischer Radius } r_{\text{hy}} = A/L_u \\
 & \text{äquivalente Wassertiefe } \bar{y} = A/b_{\text{wsp}} \\
 & \text{mittlere Geschwindigkeit } \bar{v} = Q/A \\
 & \text{Geschwindigkeitsbeiwert } \alpha = \frac{1}{A} \int_{(A)} \left( \frac{v}{\bar{v}} \right)^3 dA \\
 & \text{Geschwindigkeitsbeiwert } \beta = \frac{1}{A} \int_{(A)} \left( \frac{v}{\bar{v}} \right)^2 dA
 \end{aligned} \tag{1}$$

Die folgenden Ausführungen beziehen sich stets auf die Querschnittsmittelwerte von Wassertiefe und Geschwindigkeit, wobei im allgemeinen die Symbole  $y$  und  $v$  ohne Querstrich verwendet werden.

Die in Strömungsrichtung ( $x$ -Richtung) entlang des Gerinnes maßgeblichen Größen sind in Bild 2 dargestellt. Die aus der Bernoulli-Gleichung stammende Definition der Energiehöhe in einem Querschnitt lautet

$$H_e \equiv \frac{\alpha}{2g} v^2 + y \cos \theta + z_s \tag{2}$$

Die Gesamtenergiehöhe setzt sich zusammen aus der Geschwindigkeitshöhe, der Wassertiefe und der geodätischen Höhe der Gewässersohle über dem Bezugshorizont (Bild 2).

Die Piezometerhöhe  $h$  ist definiert als die Summe aus Druckhöhe und geodätischer Höhe:

$$h = \frac{p}{\rho g} + z_s = y \cos \theta + z_s \tag{3}$$

Eine Gerinneströmung wird charakterisiert durch die Höhenlage der Sohle, des Wasserspiegels und der Energielinie, welche um die Gesamtenergiehöhe  $H_e$  über dem Bezugshorizont



und damit an jeder Stelle um die Geschwindigkeitshöhe über dem Wasserspiegel liegt. Im allgemeinen Fall weisen Sohle, Wasserspiegel und Energielinie unterschiedliche Gefälle auf (Bild 2).

Je nach Gegebenheiten unterscheiden sich Gerinneströmungen nach folgenden Kategorien.

Zeitliche Variabilität: In stationärer Strömung sind Drücke und Geschwindigkeiten unabhängig von der Zeit, in instationärer Strömung sind sie zeitabhängig.

Variabilität in Strömungsrichtung: Wenn die Geschwindigkeiten in jedem Strömungsquerschnitt nach Größe und Richtung gleich sind (parallele Stromlinien), dann ist die Strömung gleichförmig. In ungleichförmiger Strömung ändern sich die Geschwindigkeiten nach Größe und/oder Richtung.

Strömungszustand: Bei kleinen Abmessungen und kleinen Geschwindigkeiten ist die Strömung Zähigkeitsdominiert und laminar; bei größeren Abmessungen und Geschwindigkeiten ist sie vorwiegend Rauheitsdominiert und turbulent (für natürliche Gewässer stets zutreffend).

Abflußzustand: Strömender Abfluß ("unterkritisch") bei großer Wassertiefe und kleiner Geschwindigkeit; schiesender Abfluß ("überkritisch") bei kleiner Wassertiefe und großer Geschwindigkeit.

Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf turbulente, stationäre Strömungen, da langsame Abflußänderungen oft mit guter Näherung vernachlässigt werden dürfen. Das Hauptaugenmerk gilt der gleichförmigen Strömung, bei der sich die Wassertiefe in Fließrichtung nicht ändert. Bei schwach ungleichförmiger Strömung ändert sich die Wassertiefe in Fließrichtung nur allmählich, wie im Fall von Stau- oder Absenkungskurven. Hingegen treten im Bereich von Bauwerken stark gekrümmte Stromlinien und abrupte Wassertiefenänderungen auf (stark ungleichförmiger Abfluß).



## 2.2 Gleichungen für stationäre Gerinneströmung

Aus der Strömungsmechanik stehen für die Berechnung ein-dimensionaler Gerinneströmungen drei Beziehungen in Form der Kontinuitätsgleichung, der Energiegleichung und der Impulsgleichung zur Verfügung. Diese Gleichungen werden nachfolgend für zwei Gerinnequerschnitte (jeweils im Bereich paralleler Stromlinien) angegeben, die im Abstand  $(x_2 - x_1)$  im Gerinne angeordnet sind.

Für stationäre Strömung lautet dann die Kontinuitätsgleichung

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 = Q \quad (4)$$

Die Energiegleichung lautet

$$\left( \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + y_1 \cos \theta + z_{s1} \right) - \left( \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + y_2 \cos \theta + z_{s2} \right) = H_V = I_e (x_2 - x_1) \cos \theta$$

Bedenkt man, daß das Sohlgefälle von Gewässern in der Regel im Promille-Bereich liegt, dann kann mit guter Näherung ( $\cos \theta = 1$ ) gesetzt werden. Des weiteren wird üblicherweise der Geschwindigkeitsbeiwert ( $\alpha = 1$ ) gesetzt.

Damit lautet die Energiegleichung in vereinfachter Form

$$\left( \frac{v_1^2}{2g} + y_1 + z_{s1} \right) - \left( \frac{v_2^2}{2g} + y_2 + z_{s2} \right) = H_{e1} - H_{e2} = H_V = I_e (x_2 - x_1) \quad (6)$$

Das in dieser Gleichung auftretende Energieliniengefälle  $I_e$  läßt sich mit Hilfe der Abflußgleichung von Manning-Gauckler-Strickler bestimmen (s. Kap. 4); im Sonderfall einer verlustfreien Strömung ist der Energiehöhenverlust  $H_V$  und das Energieliniengefälle  $I_e$  gleich Null (konstante Energiehöhe  $H_e$ ).

Die Impulsgleichung dient der Ermittlung von Strömungskräften, die auf die Gerinnewandung oder irgendwelche Einbauten ausgeübt werden. Sie lautet

$$\sum F_x = \rho Q (v_2 - v_1) \quad (7)$$

Hierin gibt  $\sum F_x$  die Summe aller äußeren Kräfte in x-Richtung im betrachteten Abschnitt an.

### 2.3 Druckverteilung in stationärer Strömung

In einem ruhenden Wasserkörper ( $v = 0$ ) herrscht hydrostatische Druckverteilung: Die Piezometerhöhe  $h$  ist im gesamten Gewässerkörper konstant; demgemäß nimmt die Druckhöhe mit abnehmender geodätischer Höhe linear zu ("Druckdreieck").

In einer Strömung weicht die Druckverteilung in der Regel von der hydrostatischen ab. In einem natürlichen Koordinatensystem gilt für die Piezometerhöhen an zwei verschiedenen Punkten die Beziehung /7/

$$h_1 - h_2 = \frac{1}{g} \int_1^2 \frac{v^2}{r} \, dn \quad (8)$$

Hierbei ist  $r$  der Krümmungsradius der Stromlinien im betrachteten Bereich. Diese Beziehung macht deutlich, daß im Bereich gekrümmter Stromlinien mit Abweichungen von der hydrostatischen Druckverteilung zu rechnen ist, wobei die Piezometerhöhe in Richtung auf den Krümmungsmittelpunkt zu kleiner wird. In Bereichen mit parallelen Stromlinien gilt jedoch ( $r = \infty$ ) und demgemäß ergibt sich hier ( $h_1 = h_2$ ), also wiederum eine hydrostatische Druckverteilung. Man erkennt, daß in einer gleichförmigen Strömung, gekennzeichnet durch parallele Stromlinien, die Druckverteilung senkrecht zur Strömungsrichtung hydrostatisch ist. Dies gilt für schwach ungleichförmige Strömungen (Stau- und Absenkungskurven) näherungsweise auch, während im Bereich von Bauwerken mit stark gekrümmten Stromlinien entsprechende Änderungen der Druckverteilung zu erwarten sind.

### 3. REIBUNGSFREIE, STATIONÄRE GERINNESTRÖMUNG

#### 3.1 Fließzustände

Die spezifische Energiehöhe  $H_s$  ist die Summe aus Wassertiefe und Geschwindigkeitshöhe. Für einen gegebenen Abfluß charakterisiert diese Größe die Strömungsverhältnisse in einem Querschnitt. Der Zusammenhang zwischen Abfluß, Wassertiefe und spezifischer Energiehöhe ergibt sich aus der Definitionsgleichung

$$H_s \equiv \frac{Q^2}{2g A^2} + y = \frac{v^2}{2g} + y \quad (9)$$

Zur Erläuterung dieser Beziehung betrachten wir den einfachsten Fall eines Rechteckquerschnitts. Der Abfluß pro Breitereinheit ( $q = Q/b$ ) wird spezifischer Abfluß genannt. Für diesen Fall lautet die Gleichung

$$H_s \equiv \frac{q^2}{2g y^2} + y = \frac{v^2}{2g} + y \quad (10)$$

Für einen vorgegebenen spezifischen Abfluß ( $q = \text{const.}$ ) läßt sich hieraus die Wassertiefe  $y$  als Funktion der spezifischen Energiehöhe  $H_s$  bestimmen (Bild 3). Das spezifische Energiehöhendigramm zeigt eine erforderliche Mindestenergiehöhe  $H_{s \text{ min}}$  mit einer zugehörigen Wassertiefe  $y_{gr}$  (kritischer oder Grenzabfluß), sowie für den Bereich größerer Energiehöhen jeweils zwei mögliche Wassertiefen bei einem vorgegebenen Wert von  $H_s$ .

Setzt man in Gleichung(10) die spezifische Energiehöhe  $H_s$  als konstant an, dann ergibt sich ein Zusammenhang zwischen dem spezifischen Abfluß  $q$  und der Wassertiefe, der im spezifischen Abflußdiagramm (Bild 4) dargestellt ist. Wenn die Wassertiefe  $y$  gleich der spezifischen Energiehöhe  $H_s$  ist, ist per Definition die Fließgeschwindigkeit Null und somit auch der spezifische Abfluß Null. Mit niedriger werdendem Wasserspiegel steigt der spezifische Durchfluß an und erreicht ein Maximum, wenn die Wassertiefe zwei Drittel der spezifischen Energiehöhe ausmacht: dies ent-



spricht dem Grenzabfluß  $y_{gr}$ . Bei weiterem Absinken des Wasserspiegels nimmt der spezifische Abfluß allmählich ab, da zwar die Strömungsgeschwindigkeit weiter anwächst, aber der Durchflußquerschnitt kleiner wird.

Man erkennt, daß in einem Gerinne bei vorgegebenem Abfluß und vorgegebenem Energieniveau in der Regel zwei alternative Wasserspiegellagen möglich sind. Eine strömungsmechanische Kennzahl zur Charakterisierung des Abflußzustandes ist die Froudezahl

$$Fr \equiv \frac{v}{\sqrt{g y}} \quad (11)$$

Eine Gerinneströmung, bei der die Froudezahl den Wert Eins annimmt, charakterisiert bei vorgegebener Energiehöhe den maximal möglichen Abfluß  $q_{max}$  oder entsprechend bei vorgegebenem Abfluß die minimal erforderliche spezifische Energiehöhe  $H_s min$ . Der Grenzabfluß ist dadurch charakterisiert, daß die Geschwindigkeitshöhe gleich der halben Wassertiefe ist. Für kleinere Froudezahlen ( $Fr < 1$ ) stellt sich strömender Abfluß mit vergleichsweise großer Wassertiefe und kleiner Geschwindigkeit ein; bei größeren Froudezahlen ( $Fr > 1$ ) erhält man schießenden Abfluß mit kleinen Wassertiefen und großen Geschwindigkeiten.

### 3.2 Wasserspiegellagen bei Querschnittsänderungen

Das spezifische Energiehöhendigramm und das spezifische Abflußdiagramm können direkt verwendet werden, um Wasserspiegellagen bei Querschnittsänderungen zu berechnen, sofern Energieverluste im betrachteten Abschnitt vernachlässigbar bleiben (reibungsfreie Strömung). Bild 5 gibt zwei Beispiele für den Einfluß von Querschnittsänderungen auf die Wasserspiegellage.

Im oberen Teil ist ein Rechteckgerinne konstanter Breite dargestellt, das im mittleren Teil eine Anhebung der Sohle aufweist. In diesem Fall bleibt der spezifische Abfluß  $q$  im betrachteten Abschnitt konstant, so daß das spezifische

Energiehöhendigramm Anwendung finden kann. Man erkennt, daß bei strömendem Abfluß eine Sohlanehebung eine entsprechende Absenkung des Wasserspiegels mit sich bringt, während bei schießendem Abfluß die Wassertiefe im erhöhten Bereich größer ist als im ungestörten Bereich.

Im unteren Teil ist ein Rechteckgerinne mit durchgehender horizontaler Sohle dargestellt, das im mittleren Bereich eine seitliche Einengung aufweist. Hier ändert sich definitionsgemäß der spezifische Abfluß  $q$  mit der Gerinnebreite; andererseits bleibt die spezifische Energiehöhe im betrachteten Abschnitt konstant, so daß das spezifische Abflußdiagramm zur Anwendung kommen kann. Man erkennt auch hier, daß im Bereich der Querschnittseinengung bei strömendem Abfluß die Wassertiefe abnimmt, hingegen bei schießendem Abfluß zunimmt.

Es ist aus Bild 5 leicht ersichtlich, daß bei den vorgegebenen Verhältnissen die Querschnittseinengung (Anhebung der Sohle bzw. seitliche Einschnürung) nur so weit getrieben werden kann, bis im Engpaßquerschnitt Grenzabfluß erreicht ist. Bei einer weitergehenden Einschnürung kann der vorgegebene Abfluß bei der vorgegebenen Energiehöhe nicht aufrecht erhalten werden: es müßte entweder der Abfluß verringert oder die Energiehöhe vergrößert werden. In einem solchen Fall würden die Abflußverhältnisse im Gerinne von diesem Engpaßquerschnitt "kontrolliert".

### 3.3 Abflußkontrolle

Nach dem Prinzip des kleinsten Zwanges stellt sich bei einer Gerinneströmung bei vorgegebener Strömungsberandung der Abfluß stets so ein, daß bei vorgegebenem Abfluß das Energieniveau minimiert wird bzw. bei vorgegebenem Energieniveau der maximal mögliche Abfluß abgeführt wird. Die Strömungsverhältnisse werden jeweils von einem "Kontrollquerschnitt" geprägt, der die Wasserspiegellagen und Geschwindigkeiten im gesamten Gerinne bestimmt. Als mögliche

Abflußkontrolle kann wirken;

- Gerinnequerschnitt mit  $y_{gr}$  ("Engpaßquerschnitt")
- Bauwerke, Verschlußorgane
- Unterwasser-Einstau (Rückstau)
- Wandreibung in langen Gerinnen (Normalabfluß)

Bei strömendem Abfluß wird die Wassertiefe stets von einer unterstrom gelegenen Kontrolle bestimmt; bei schießendem Abfluß kann die jeweilige Kontrolle nur oberstrom des betrachteten Abschnittes liegen.

Der mit einer Strömungsbeschleunigung verbundene Übergang vom Strömen zum Schießen kann an Kontrollquerschnitten kontinuierlich und ohne Energieverluste erfolgen. Hingegen findet der Übergang vom schießendem zum strömenden Abfluß stets in Form eines Wechselsprungs mit Deckwalze statt. Dieser diskontinuierliche Fließwechsel ist mit erheblichen örtlichen Energieverlusten verbunden.

Für die konjugierten Wassertiefen  $y_1$  und  $y_2$  vor und nach dem Wechselsprung gilt

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8(Fr_1)^2} - 1 \right) \quad (12)$$

und der zugehörige Energiehöhenverlust  $\Delta H$  ergibt sich aus

$$-\frac{\Delta H}{y_1} = \left( \frac{y_2}{y_1} - 1 \right)^3 / \left( \frac{4 y_2}{y_1} \right) \quad (13)$$

Typische Kontrollquerschnitte mit Grenzabfluß erhält man an Abstürzen sowie an Wehren und sonstigen überströmten Bauwerken (siehe Abschnitt 4.3).



#### 4. REIBUNGSBEHAFTETE GERINNESTRÖMUNG

##### 4.1 Normalabfluß; freifließende Gewässer

Für die Berechnung reibungsbehafteter Gerinneströmungen ist es notwendig, eine Beziehung für das Energieliniengefälle  $I_e$  in Abhängigkeit von den Rauheitsverhältnissen, Querschnitt und Gefälle des Gewässers zu finden. Hierfür sind eine Reihe empirischer Abflußgleichungen entwickelt worden. Die gängigste dieser Abflußbeziehungen ist die Gleichung von Manning-Gauckler-Strickler:

$$Q_N = k_{St} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot A \cdot I_e^{1/2} \quad (\text{mit } I_e = I_o) \quad (14)$$

Diese Gleichung gilt streng genommen für stationäre, gleichförmige Strömung in einem prismatischen Gerinne, wobei in diesem Fall definitionsgemäß das Energieliniengefälle sich dem Sohlgefälle  $I_o$  angleichen muß ( $I_e = I_o$ ). Eine solche gleichförmige Strömung bezeichnet man als "Normalabfluß". Die Voraussetzungen für die exakte Gültigkeit dieser Gleichung sind in Bild 6 aufgelistet; sie sind in einem natürlichen Gewässer selten oder nie erfüllt. Dennoch bietet diese Beziehung eine wesentliche Basisgröße für die Berechnung von Gerinneströmungen. Auch bei leicht ungleichförmigem Abfluß dient sie der näherungsweise Ermittlung der Energieverluste zufolge Rauheit der Gerinnewandung.

Der in Gleichung(14) auftretende Stricklersche Rauheitsbeiwert  $k_{St}$  ist genau genommen ein "Geschwindigkeitsbeiwert". Er wird primär von der Beschaffenheit der Gerinnewandung bestimmt; hierfür gibt es Erfahrungswerte, von denen eine Auswahl gängiger Zahlenwerte in Bild 7 zusammengefaßt ist. Es muß allerdings darauf hingewiesen werden, daß die Festlegung eines zutreffenden Rauheitsbeiwerts für einen Flußabschnitt in der Praxis nicht einfach ist. Verkrautungseffekte können den Rauheitsbeiwert saisonal stark verändern. An Gewässern mit Uferbewuchs wird mit zunehmendem Wasserstand die Geschwindigkeitsverteilung im Fluß

durch den Uferbewuchs zunehmend verändert, was sich ebenfalls in einer Änderung des Rauheitsbeiwerts mit zunehmendem Wasserstand oder zunehmendem Abfluß bemerkbar macht. Schließlich treten bei ausufernden Hochwasserabflüssen hydraulische Wechselwirkungen zwischen Vorland und Flußschlauch auf, die bislang noch nicht hinreichend quantifiziert werden können.

In einem natürlichen Gewässer sind größere Abschnitte mit einer geradlinigen Gerinneachse selten. Flußkrümmungen bewirken Sekundärströmungen, die unter anderem zu Umlagerungen im Fließquerschnitt führen, die örtliche Sohlenrauheit ändern und auch Veränderungen des Flußquerschnitts in Strömungsrichtung nach sich ziehen. In Fließrichtung kann sich das Sohlgefälle sowie der Bewuchs ändern und damit auch die Rauheit entlang des Flusses. Außerdem werden die Rauheitsverhältnisse durch auftretenden Geschiebetrieb stark verändert.

Aus diesen Gründen ist eine theoretische Ermittlung von Abflüssen mit Hilfe von Gleichung (14) allenfalls größenordnungsmäßig möglich; es sind umgekehrt genaue örtliche Abflußmessungen erforderlich, um aus diesen für einen Flußabschnitt verlässliche Rauheitsbeiwerte  $k_{St}$  ermitteln zu können.

#### 4.2 Leicht ungleichförmiger Abfluß; gestaute Gewässer

Wenn sich entlang eines Gerinnes die Rauheit, das Sohlgefälle oder der Fließquerschnitt verändert, dann bewirkt dies zwangsläufig Anhebungen oder Absenkungen des Wasserspiegels in Abweichung von den Normalabflußbedingungen. Diese Veränderungen lassen sich anhand der Bedingungsgleichungen für schwach ungleichförmige Gerinneströmungen als sogenannte Stau- und Absenkungskurven rechnerisch ermitteln. In Bild 8 ist der Wasserspiegelverlauf schematisch dargestellt für den Fall eines Rauheitswechsels und eines Gefälleknicks in einem Gerinne. Solche Veränderungen bewirken Abweichungen von den Bedingungen des Normal-



abflusses, welche zur Folge haben, daß in diesem Bereich das Energieliniengefälle nicht dem Sohlengefälle gleichgesetzt werden darf. Diese Beispiele illustrieren, daß auch in einem freifließenden Gewässer nur selten die idealen Verhältnisse erreicht werden, wie sie der Normalabflußgleichung zugrunde liegen.

An staugeregelten Flüssen werden die Fließverhältnisse oft über weite Strecken vom Staubauwerk kontrolliert (Bild 9). Die Wasserspiegellagen oberhalb des Staubauwerks können mit Hilfe einer Staukurvenberechnung ermittelt werden; der Querschnitt, in dem sich erste merkliche Abweichungen vom Normalabfluß im freifließenden Gewässer zeigen, wird "Stauwurzel" genannt. Für einen gegebenen Flußabschnitt verändert sich die Lage der Stauwurzel mit dem Abfluß. Demgemäß lassen sich in einem gestauten Fluß unterschiedliche Bereiche identifizieren:

- das freifließende Gewässer bei Normalabfluß;
- das freifließende Gewässer bei leicht ungleichförmigem Abfluß;
- das zeitweise eingestaute Gewässer (Rückstaueffekte machen sich nur bei Hochwasserabflüssen bemerkbar);
- das ständig eingestaute Gewässer (Abflußverhältnisse werden stets vom Staubauwerk kontrolliert).

#### 4.3 Strömungsverhältnisse an Abstürzen: Abflußkontrolle und Rückstau

Die örtlichen Verhältnisse an einem Abflußkontrollquerschnitt können anschaulich am Beispiel eines einfachen Absturzes am Ende eines Gerinnes mit strömendem Normalabfluß verdeutlicht werden. Das Strömungsbild im Bereich eines solchen Absturzes ist in Bild 10 dargestellt.

Ein Absturz stellt eine hydraulische Kontrolle dar, sofern der Unterwasserstand ausreichend tief liegt. Im Bereich der Absturzkante muß sich demgemäß die Grenztiefe  $y_{gr}$  einstellen. Im Bereich des Zuströmkanals wird sich



daher eine Absenkungskurve mit einem allmählichen Übergang von der Normalabflusstiefe  $y_n$  auf die Grenztiefe  $y_{gr}$  einstellen. Im Kontrollquerschnitt erfolgt der Übergang vom Strömen zum Schießen; unterhalb der Kontrolle ergibt sich schießender Abfluß, im vorliegenden Fall in der Form eines freien Überfallstrahls.

Im Bereich der Absturzkante sind die Stromlinien gekrümmt; demzufolge weicht auch die Druckverteilung von der hydrostatischen ab (siehe Bild 10); erst in einiger Entfernung oberhalb des Absturzes können die Stromlinien wiederum als näherungsweise parallel und damit die Druckverteilung als näherungsweise hydrostatisch angesehen werden.

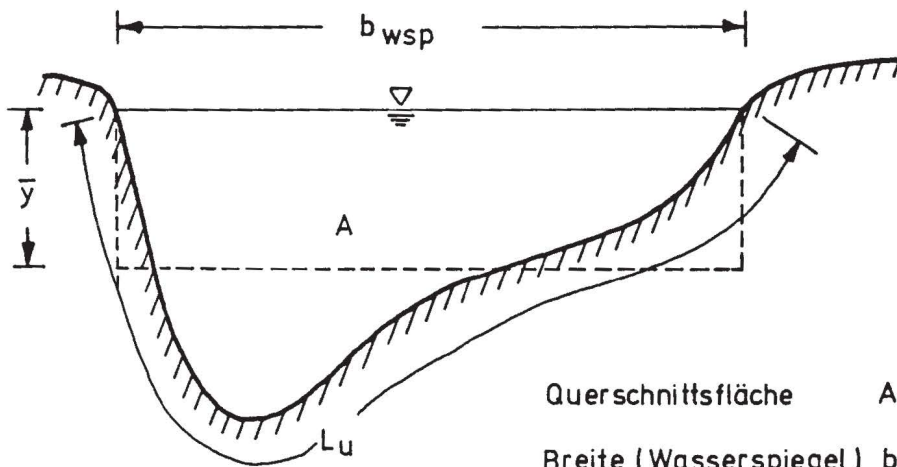
Für den Fall des rückstaufreien Abflusses werden die Wasserstände im Gerinne ausschließlich von der Kontrollbedingung am Absturz bestimmt, so daß man eine eindeutige Beziehung zwischen dem Wasserstand im Gerinne und dem Abfluß erhält. Diese Abflußbeziehung bleibt so lange vom Unterwasserstand unbeeinflusst, wie dieser weit genug unterhalb liegt. Läßt man unter sonst gleichbleibenden Bedingungen den Unterwasserstand allmählich über die Höhe der Absturzkante hinaus ansteigen, dann wird schließlich ein Punkt erreicht, von dem ab die Verhältnisse im Kontrollquerschnitt vom Unterwasser her mit beeinflußt werden ("Rückstaugrenze"). Steigt das Unterwasser über diese Rückstaugrenze an, dann wird in zunehmendem Maße das Strömungsbild am Absturz und demzufolge auch der Wasserstand im Gerinne verändert. Der Abfluß erfolgt jetzt unter Rückstau: das heißt, daß der Absturz seine Kontrollfunktion verloren hat. Die Wassertiefe im Zuströmgerinne ist in diesem Falle nicht allein vom Abfluß abhängig, sondern wird zusätzlich vom Unterwasserstand mit beeinflußt.

Der hier vorgestellte einfache Absturz stellt das elementarste Beispiel einer hydraulischen Abflußkontrolle dar, wie sie an Abflußmeßbauwerken angestrebt wird. Die Hydraulik solcher Kontrollbauwerke wird im Referat 2 näher behandelt.

## LITERATURHINWEISE

## Fachbücher in chronologischer Reihenfolge

- /1/ Jaeger, Ch.: "Technische Hydraulik", Birkhäuser Verlag, Basel 1949
- /2/ Schmidt, M.: "Gerinnehydraulik", Bauverlag GmbH, Wiesbaden, 1957
- /3/ Ven te Chow: "Open Channel Hydraulics", International Student Edition, Mc Graw-Hill Book Co., 1959
- /4/ Rouse, H., Editor: "Engineering Hydraulics", Dover Publications, New York, 1961
- /5/ Naudascher, E.: "Incompressible Fluid Flow", Handbook of the Engineering Sciences, Vol. I, van Norstrand Co., 1965
- /6/ Press-Schröder: "Hydromechanik im Wasserbau", Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1966
- /7/ Bos, M.G., Editor: "Discharge Measurement Structures", Delft Hydraulics Laboratory publication nr. 161, 1976
- /8/ Preißler-Bollrich: "Technische Hydromechanik 1", VEB Verlag für das Bauwesen, Berlin, 1980
- /9/ Kobus, H.: "Arbeitsunterlagen zur Grundfachvorlesung Technische Hydromechanik", Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1982
- /10/ DIN 4044: Hydromechanik im Wasserbau; Begriffe

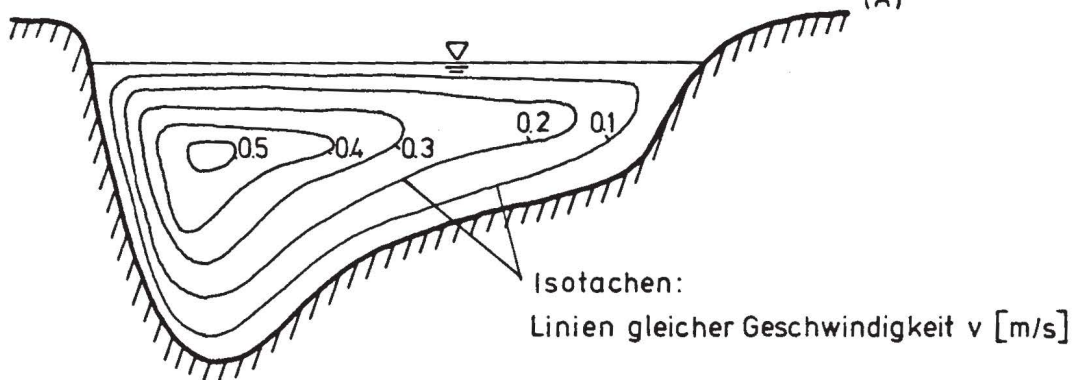


Querschnittsfläche  $A$  [m<sup>2</sup>]

Breite (Wasserspiegel)  $b_{wsp}$  [m]

Benetzter Umfang  $L_u$  [m]

Durchfluss  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] =  $\int_{(A)} v \, dA$



Isotachen:  
Linien gleicher Geschwindigkeit  $v$  [m/s]

Hydraulischer Radius  $r_{hy}$  [m] =  $A / L_u$

Äquivalente Wassertiefe  $\bar{y}$  [m] =  $A / b_{wsp}$

Mittlere Geschwindigkeit  $\bar{v}$  [m/s] =  $Q / A$

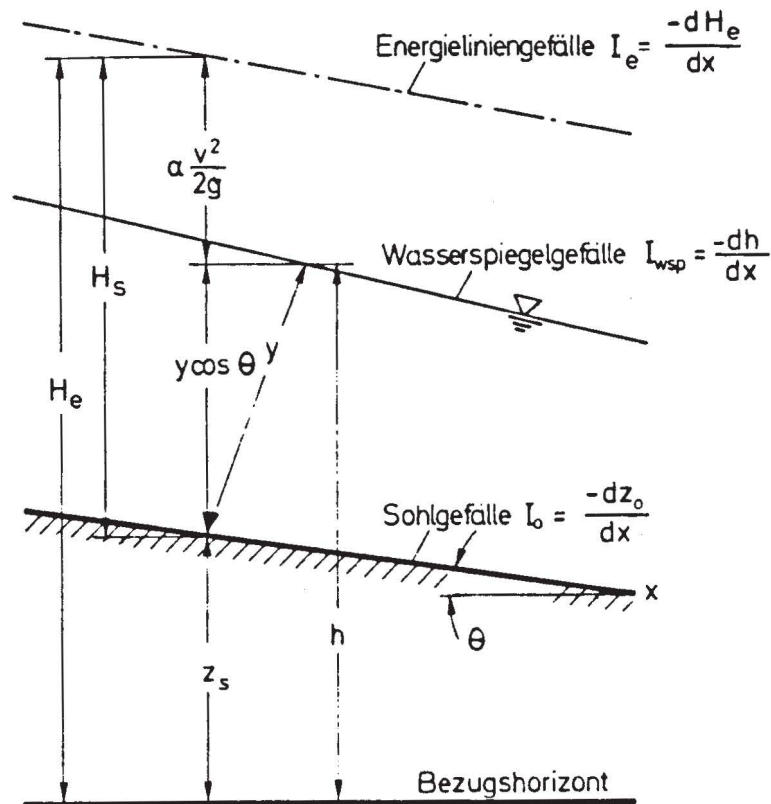
Geschwindigkeitsbeiwert  $\alpha$  [-] =  $\frac{1}{A} \int_{(A)} (v/\bar{v})^3 \, dA$

Geschwindigkeitsbeiwert  $\beta$  [-] =  $\frac{1}{A} \int_{(A)} (v/\bar{v})^2 \, dA$

(In turbulenter Strömung ist im allgemeinen  $\alpha \approx 1.02 \div 1.13$  und  $\beta \approx 1.01 \div 1.05$ )

Bild 1 : Querschnittsgemittelte Werte





Gesamtenergiehöhe (Bernoulli)  $H_e = \alpha \cdot v^2 / 2g + y \cos \theta + z_s$

Spezifische Energiehöhe  $H_s = \alpha \cdot v^2 / 2g + y \cos \theta$

$$H_e = H_s + z_s$$

Hinweis: In Abweichung von DIN 4044 wird die Wassertiefe mit  $y$  bezeichnet zur Unterscheidung von der Piezometerhöhe  $h$ .

Bild 2: Energiehöhe bei Gerinneströmungen

$$H_s \equiv \frac{Q^2}{2gA^2} + y$$

Rechteckquerschnitt:  $H_s \equiv \frac{q^2}{2gy^2} + y$

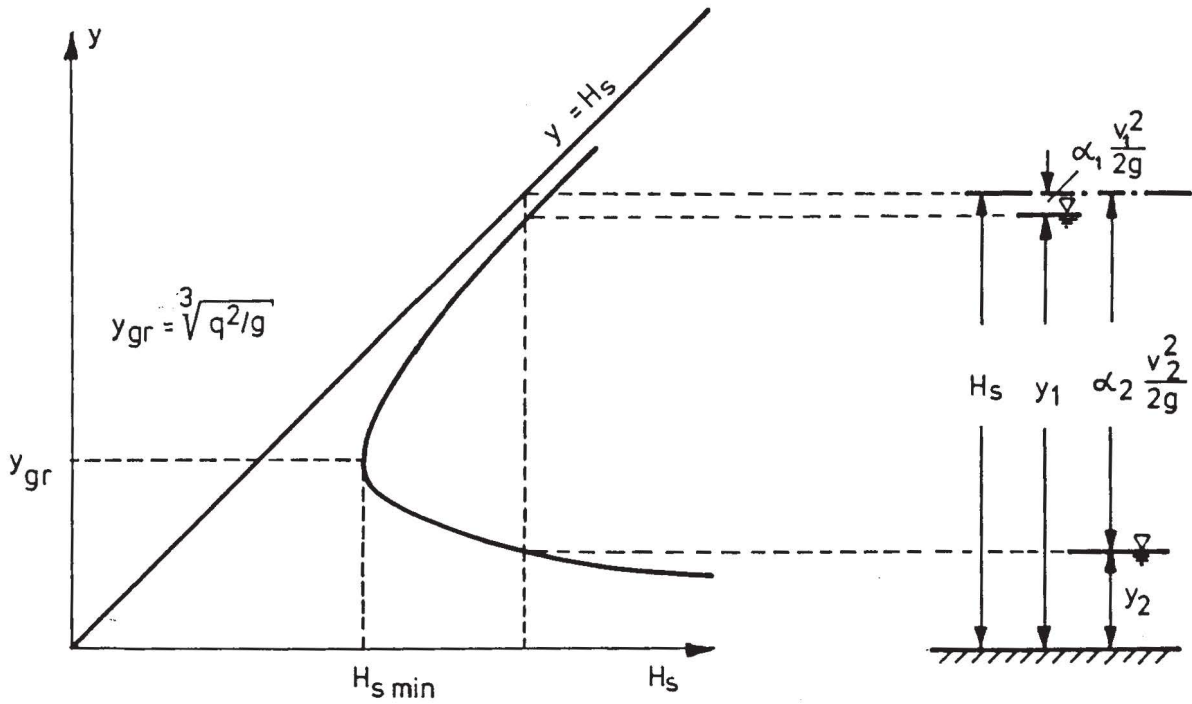


Bild 3: Spezifisches Energiehöhendigramm für  $q = Q/b = \text{const.}$

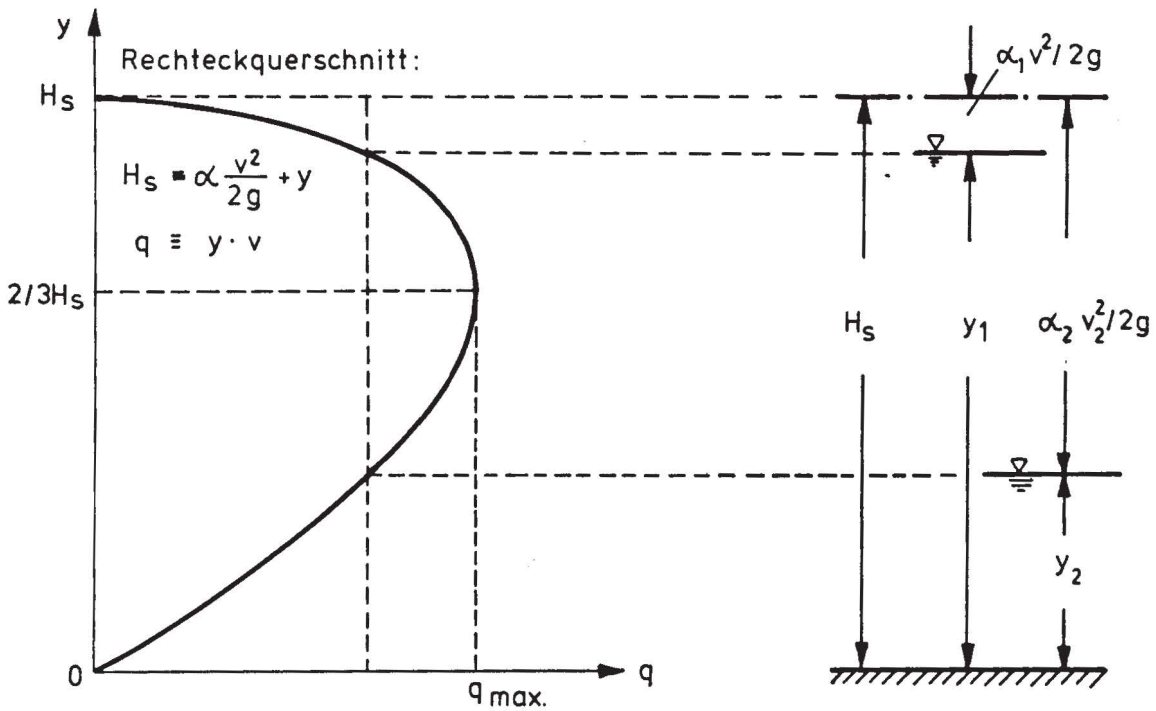


Bild 4: Spezifisches Abflußdiagramm für  $H_s = \text{const.}$

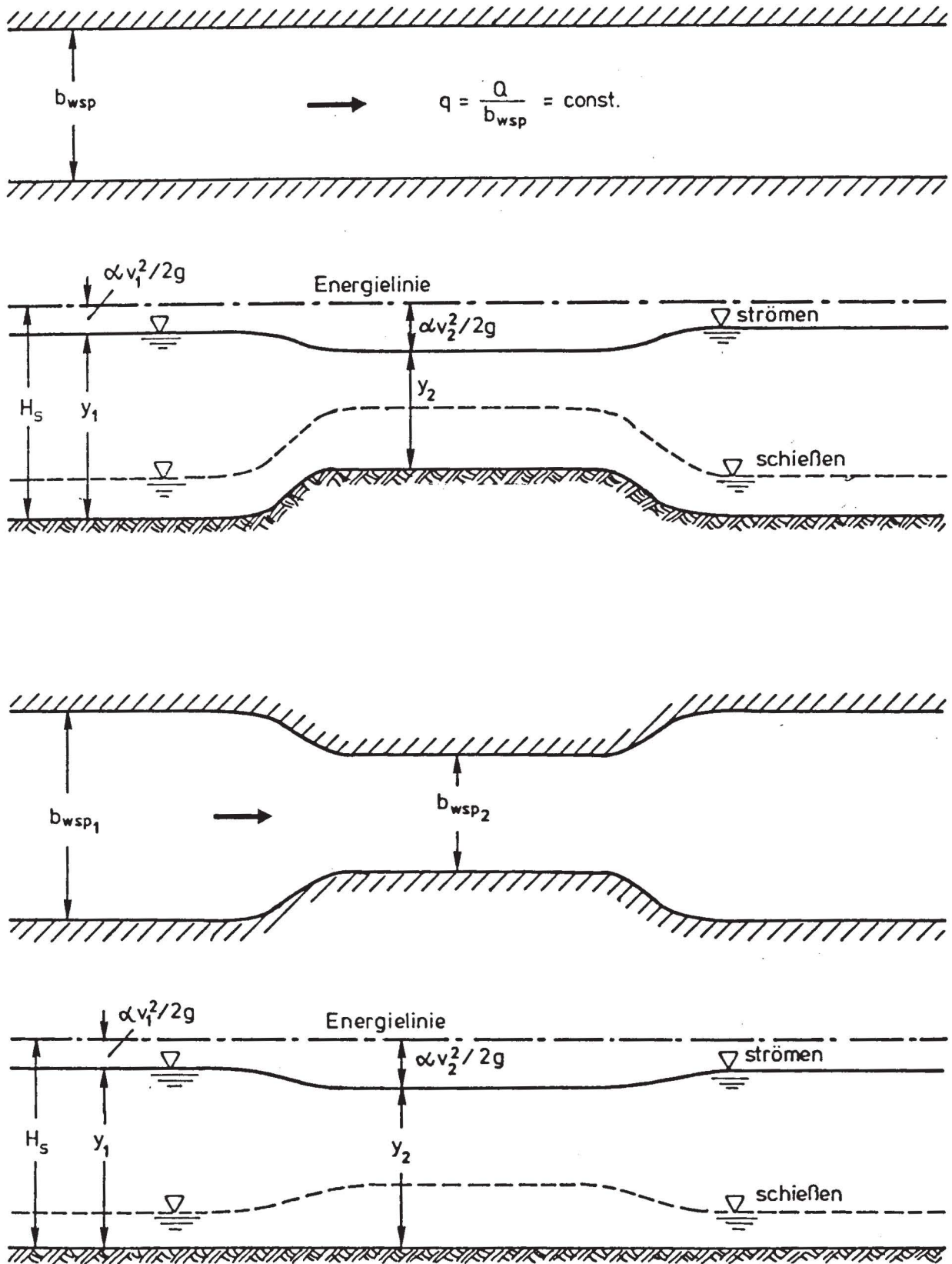
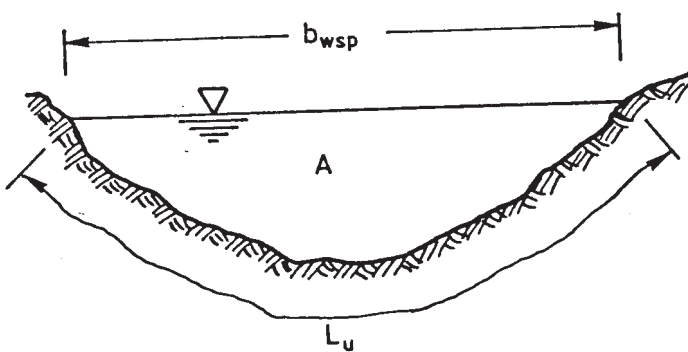
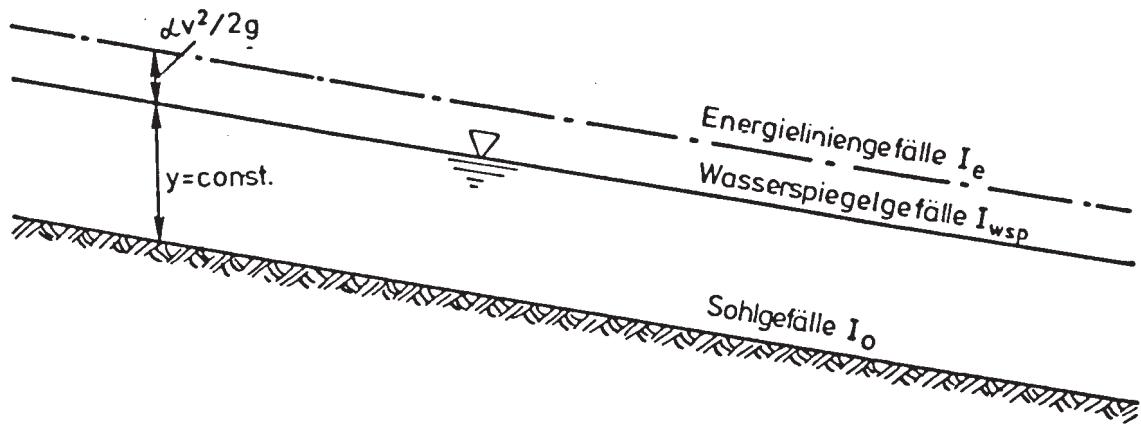


Bild 5: Wasserspiegellagen an Querschnittsänderungen





$$\text{hydraulischer Radius } r_{hy} = \frac{A}{L_u}$$

Stationäre, gleichförmige Strömung:

MANNING-GAUCKLER-STRICKLER:

$$Q_N = k_{st} r_{hy}^{2/3} A I_e^{1/2} \quad (\text{mit } I_e = I_o)$$

Vorraussetzungen:

Durchfluß  $Q = \text{const}$

Sohlgefälle  $I_o = \text{const}$

Sohlenrauheit  $k_{st} = \text{const}$

Querschnitt  $A = \text{const}$

Gerinneachse geradlinig

Bild 6: Normalabfluß

GAUCKLER- MANNING - STRICKLER - FORMEL UND BEIWERTE  
ZUR BERECHNUNG DES STATIONÄREN, GLEICHFÖRMIGEN ABFLUSSES

$$v = k_{st} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I_e^{1/2}$$

Rauheitsbeiwerte  $k_{st}$  für natürliche Gerinne:

$k_{st} [m^{1/3}/s]$

Natürliche Wasserläufe

Flußbett mit fester Sohle, ohne Unregelmäßigkeiten	40
Neckar bei Wendlingen	35
Flußbett, verkrautet	30-35
Flußbett mit Geröll und Unregelmäßigkeiten	30
Flußbett, stark geschiebeführend	28
Wildbach mit grobem Geröll (kopfgroße Steine)	19-28

Erdkanäle

in festem Material, glatt	60
Sohle aus Sand und Kies mit gepflasterten Böschungen	40-50
Feinkies, ca. 10/20/30 mm	45
Grobkies, ca. 50/100/150 mm	35
mit groben Steinen ausgelegt	25-30

Felskanäle

Mittelgrober Felsausbruch	25-30
Felsausbruch bei sorgfältiger Sprengung	20-25
Sehr grober Felsausbruch, große Unregelmäßigkeiten	15-20

Gemauerte Kanäle

Ziegel, auch Klinker, gut gefugt	80
Hausteinquader	70-80
Sorgfältiges Bruchsteinmauerwerk	70
Mauerwerk (normal)	60
Grobes Bruchsteinmauerwerk, Steine nur grob behauen	50
Bruchsteinwände, gepflasterte Böschungen m. Sohle aus Sand und Kies	45-50

Betonkanäle

Zementglattstrich, Stahlschalung	100
Glatt verputzt	90-95
Gute Verschalung, glatter unversehrter Zementputz, glatter Beton mit hohem Zementgehalt	80-90
Beton bei Verwendung von Holzschalung, ohne Verputz	65-70
Stampfbeton mit glatter Oberfläche	60-65
Alter Beton, saubere Flächen	60
Grobe Betonauskleidung	55
Ungleichmäßige Betonflächen	50

Blechgerinne

neue gußeiserne Rohre	90
genietete Rohre, Niete nicht versenkt, i. Umfang mehrm. überlappt	65-70

Sonstige Auskleidungen

Walzgußasphalt-Auskleidung in Werkkanälen	70-75
---	-------

Stollen und Betonrohrleitungen

Geschliffener Zementputz	100
Betonstollen normaler Ausführung	70-80
Betonstollen aus rauhem Beton, älterer Zementputz	65-75
Roher Felsausbruch, Sohle betoniert	40-50
Stollen in rohem Felsausbruch (Gneis-Granit)	28-35

Bild 7: Rauheitsbeiwerte für Gerinne





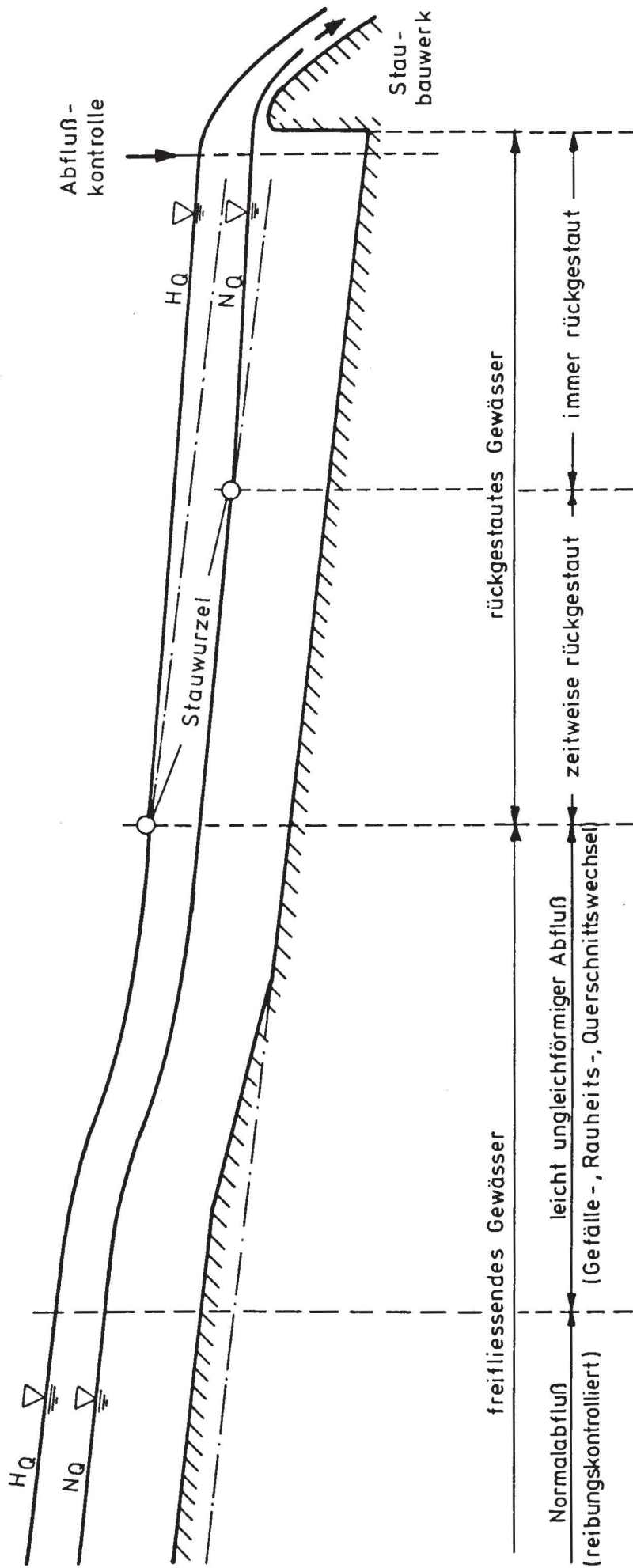
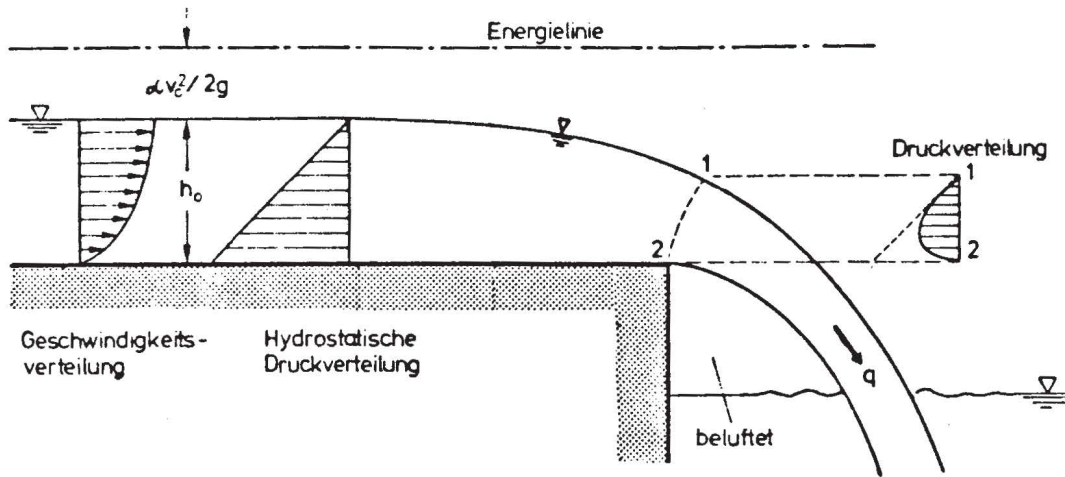


Bild 9 : Freifliessende und gestaute Fließgewässer

Strömungsverhältnisse bei vollkommenem Überfall:



Rückstau:

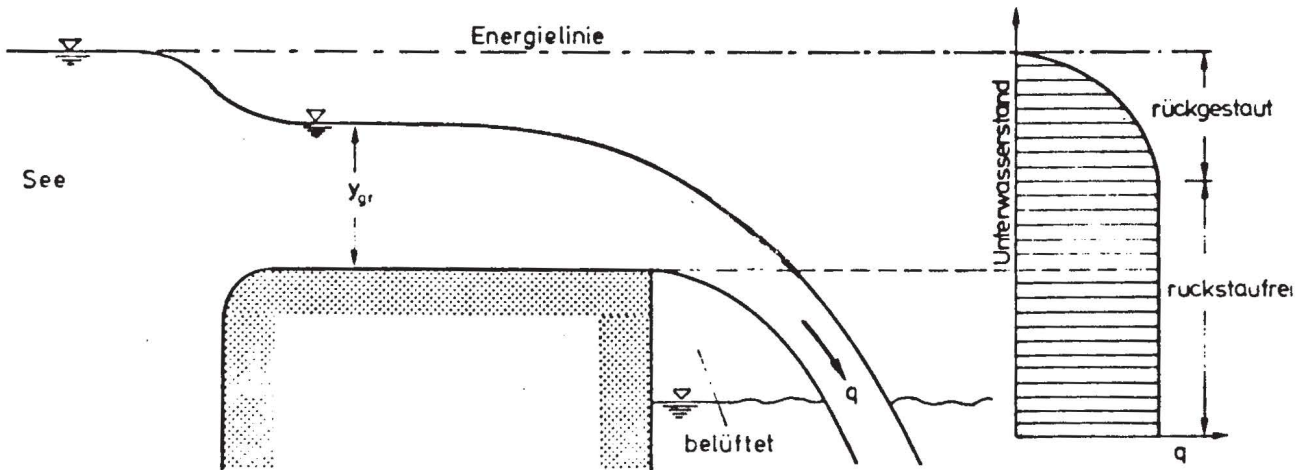


Bild 10: Strömungsverhältnisse an einem Absturz