



Abfluss in Freispiegelgerinnen:

Manning-Strickler-Formel

$$v_m = k_{St} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I_E^{1/2}$$

$$Q = A \cdot v_m = A \cdot k_{St} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I_E^{1/2}$$

Darin sind:

k_{St} = Rauheitsbeiwert nach Manning-Strickler

r_{hy} = hydraulischer Radius und

I_E = Energieliniengefälle.

Für stationäre Strömung ist Energieliniengefälle I_E = Sohlgefälle I_S



Im Gegensatz zu den oben behandelten Druckrohrleitungen, bei denen der Durchflussquerschnitt vollständig durch die Flüssigkeit ausgefüllt ist, ist beim Freispiegelgerinne der Fließquerschnitt durch die Lage des freien Wasserspiegels bestimmt. Dieser stellt sich in einem Freispiegelgerinne in Wechselwirkung mit dem Reibungswiderstand ein.

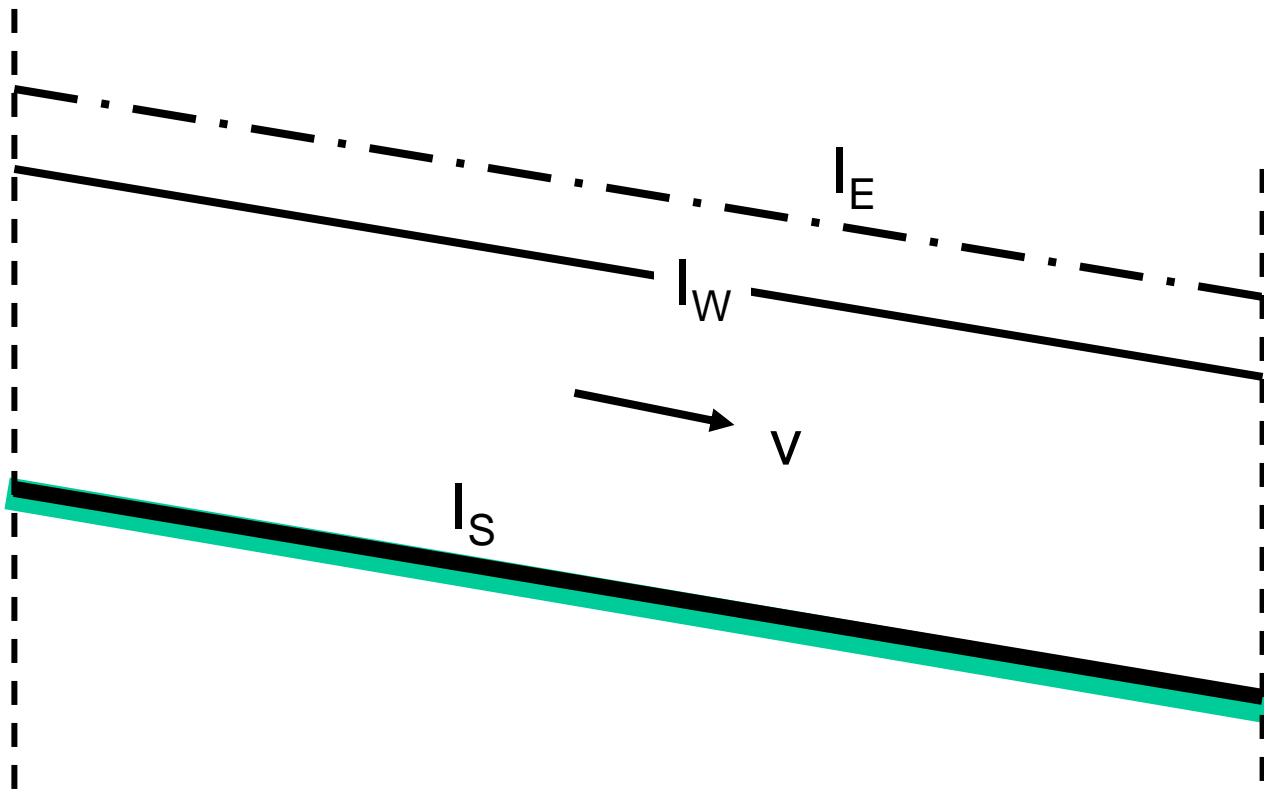
Es sind selbst bei grundsätzlich gleichbleibenden Gerinneabmessungen drei Strömungsfälle möglich:

1. Stationär gleichförmige Strömung,
2. Stationär verzögerte Strömung,
3. Stationär beschleunigte Strömung.

Alle Strömungen sind stationär, d.h., es ist $\frac{\delta v}{\delta t} = 0$

Nur im Fall 1 liegt mit $\frac{\delta v}{\delta s} = 0$ eine gleichförmige Strömung vor.

Bei negativ oder positiv beschleunigter Strömung ist $\frac{\delta v}{\delta s} \neq 0$



Stationär gleichförmiger Abfluss:

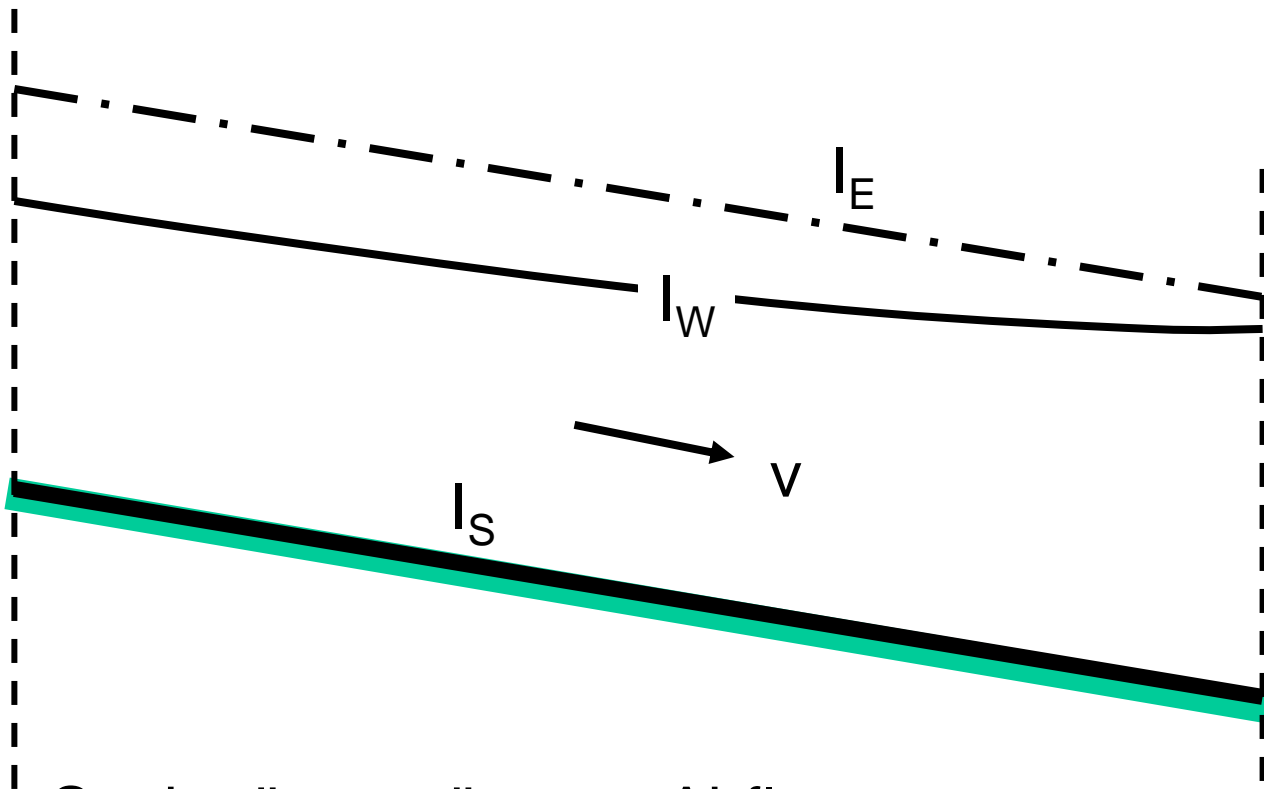
$$I_E = I_W = I_S$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} = 0$$

stationär

$$\frac{\delta v}{\delta s} = 0$$

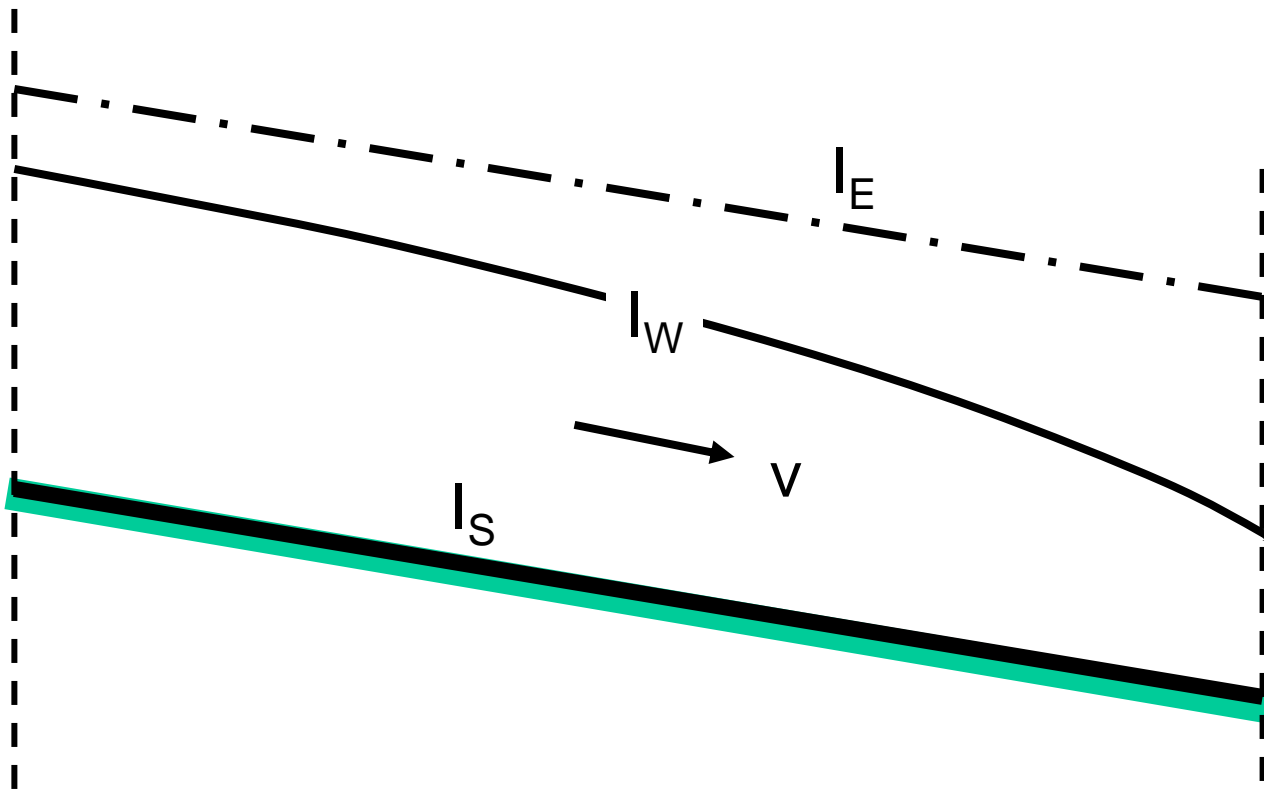
gleichförmig



Staulinie

Stationär verzögerter Abfluss:

$I_W < I_S$	$I_E > I_W$	$\frac{\delta v}{\delta t} = 0$	stationär
		$\frac{\delta v}{\delta s} < 0$	verzögert



Senkungs-
kurve

Stationär beschleunigter Abfluss:

$$I_W > I_S$$

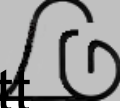
$$I_E < I_W$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} = 0$$

stationär

$$\frac{\delta v}{\delta s} > 0$$

beschleunigt



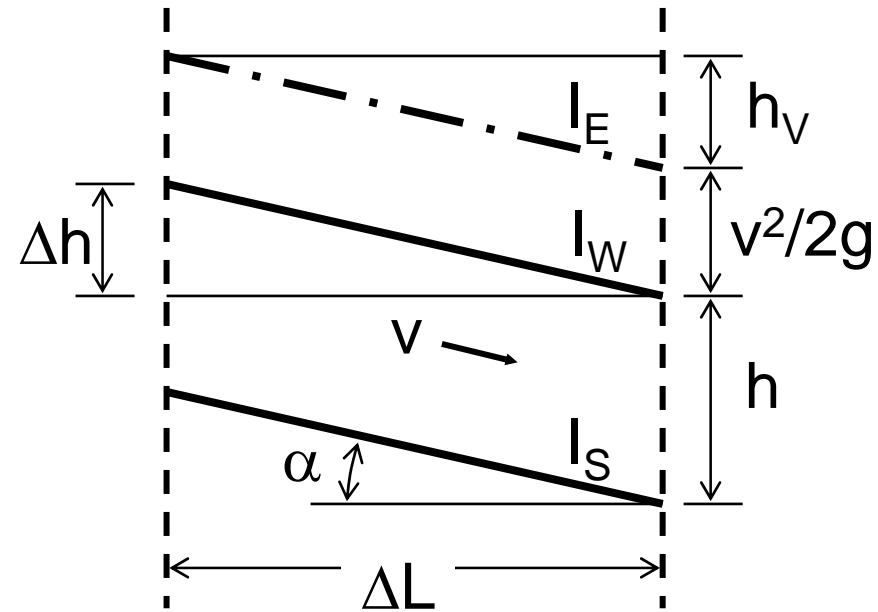
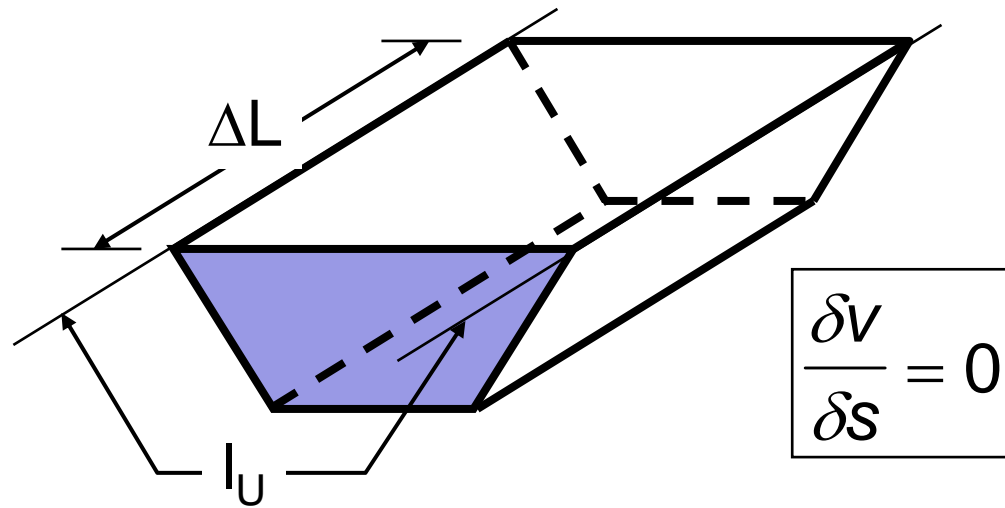
Bei gleichförmigen Strömungen ändert sich der Fließquerschnitt in Fließrichtung nicht. Andererseits haben Querschnittsänderungen immer eine ungleichförmige Strömung zur Folge.

Eine *Staukurve* entsteht immer dann, wenn durch Einbauten oder Störungen (Querschnittseinengungen durch Brücken, Wehre) ein örtlicher Energiehöhenverlust erzeugt wird. Sie können erhebliche Längen im Oberwasser aufweisen.

Senkungskurven treten in unmittelbarer Nähe von Wehren oder Abstürzen auf. Sie sind in der Länge beschränkt und oft mit *Fließwechsel* (Übergang vom Strömen zum Schießen) verbunden.

Bekannte theoretische Verfahren zur geschlossenen Berechnung von Stau- und Senkungskurven sind oft *nicht* anwendbar, weil fast immer die Gerinneform und das Gefälle Änderungen unterworfen sind. In der Praxis wird mit Näherungsverfahren die Kurve iterativ bestimmt. Bei schießendem Abfluss muss immer stromab und bei strömendem Abfluss stromauf gerechnet werden, wenn die Lösung konvergieren soll.

Widerstandsgesetz:



Es wird der Fall stationär gleichförmiger Strömung betrachtet.

$$I_E = I_W = I_S = \tan \alpha = \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad \Delta h = h_v$$



An dem dargestellten prismatischen Gerinneelement herrscht Gleichgewicht zwischen Beschleunigungs- und Verzögerungskräften. Es ist $v = \text{konst.}$, wenn

$$\Delta p \cdot A = \tau \cdot I_U \cdot \Delta L$$

(Beschleunigung) (Verzögerung)

I_U ist dabei der benetzte Gerinneumfang, auf den die Schubspannung τ wirkt.

Mit der Schubspannung

$$\tau = \rho \cdot \frac{\lambda}{8} \cdot v_m^2 \quad (\text{vergl. Kreisrohr}) \quad \text{wird}$$

$$\Delta p \cdot A = \rho \cdot \frac{\lambda}{8} v_m^2 \cdot I_U \cdot \Delta L$$



Unter Verwendung von $\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$ wird

$$\Delta h \cdot \rho \cdot g = \rho \cdot \frac{\lambda}{8} v_m^2 \cdot \frac{I_U}{A} \cdot \Delta L$$

Mit $r_{hy} = \frac{A}{I_U}$ wird

$$\Delta h = h_v = \lambda \cdot \frac{v_m^2}{8 \cdot g \cdot r_{hy}} \cdot \Delta L$$

ähnlich wie für Strömung durch Rohre mit Nichtkreisquerschnitt, vergl. 12.2.

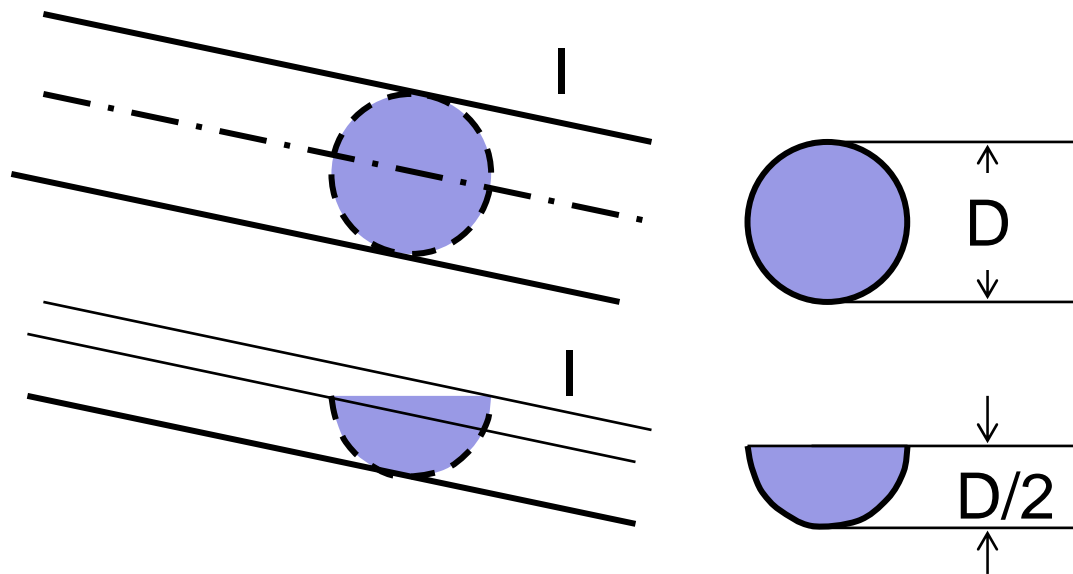
Hier besteht der Unterschied lediglich darin, dass der freie Wasserspiegel nicht in den benetzten Umfang I_U aufgenommen wird.



Empirische Fließformeln

Das allgemeine Widerstandsgesetz der turbulenten Strömung mit dem Widerstandsbeiwert λ liefert bei relativ tiefen Gerinnen mit klar definierter Rauheit sichere Resultate.

Bei natürlichen Gerinnen (Flüssen) mit relativ geringen Gefällen treten aber im Vergleich zu den Rohrleitungen Erscheinungen auf, die im Zusammenhang mit Vorgängen an der freien Oberfläche stehen. BAZIN hat den Abfluss in einem voll gefüllten Kreisrohr des Durchmessers D mit dem gleichförmigen Abfluss in einem Gerinne mit Halbkreisquerschnitt mit der Wassertiefe $D/2$ verglichen.



rohr des Durchmessers D mit dem gleichförmigen Abfluss in einem Gerinne mit Halbkreisquerschnitt mit der Wassertiefe $D/2$ verglichen.

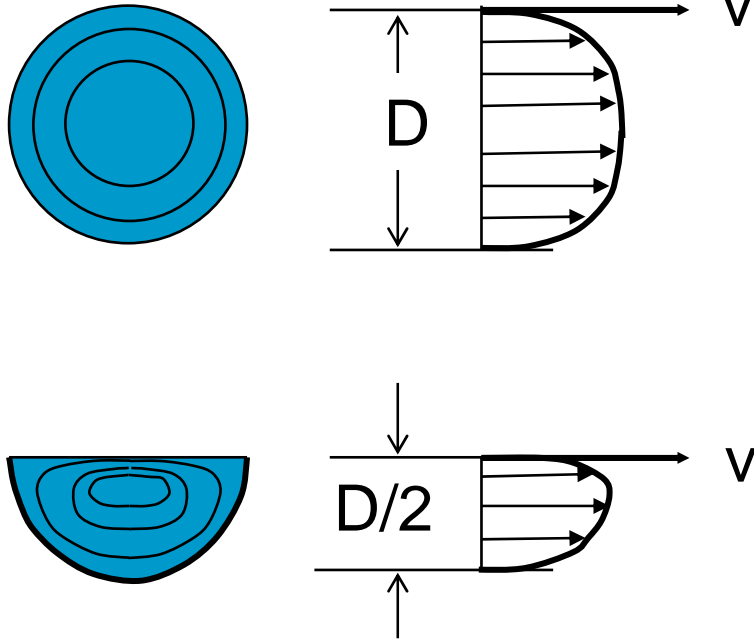


In beiden Fällen war das Gefälle gleich. Seine genauen Messungen haben ergeben, dass der Abfluss im Halbkreisgerinne

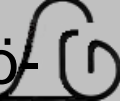
etwas kleiner als die Hälfte des Rohrabflusses ist.

Das Bild der Isotachen liefert die Erklärung:

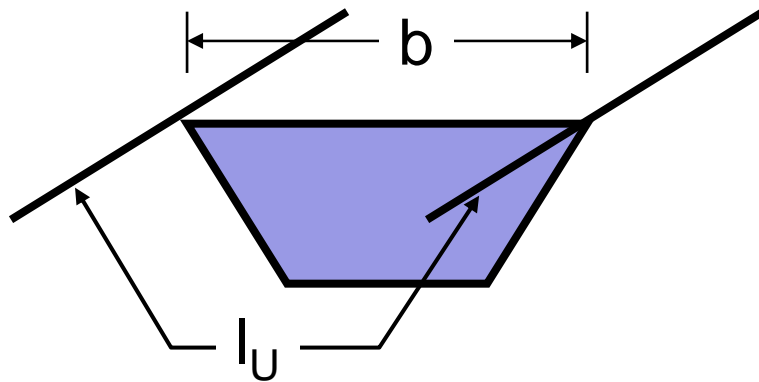
Das Maximum der Geschwindigkeit liegt beim Halbkreisquerschnitt nicht auf Höhe des Wasserspiegels, sondern etwa 10% tiefer !



Diese Erscheinung ist weniger auf die Luftreibung als *auf die fehlende feste Begrenzung* zurückzuführen. Senkrecht zur Trennfläche sind turbulente Austauschprozesse möglich, die sich u.a. in Wellen und Wirbeln äußern. Diese entziehen der Strömung Energie.



Die dadurch bewirkte Abflussminderung ist umso stärker, je größer das Verhältnis der Wasserspiegelbreite b zum benetzten Umfang I_U ist.



Bei natürlichen Flüssen, die fast immer im Vergleich zu ihrer Tiefe sehr breit sind, kann gesetzt werden:

$$\frac{b}{I_U} \approx 1$$

Bei Freispiegelgerinnen gibt es demnach die nachfolgende Abhängigkeit, die aber *noch nicht vollständig* erforscht ist:

$$\lambda = f\left(\text{Re}, k / r_{hy}, \frac{b}{I_U}\right) \quad \text{mit} \quad \text{Re} = \frac{v \cdot r_{hy}}{\nu}$$

Aus diesem Grunde finden weiterhin *empirische* Fließformeln Anwendung, die auf die ältesten Formulierungen des Quadratgesetzes des turbulenten Fließwiderstandes von BRAHMS-CHEZY zurückgehen.

BRAHMS-CHEZY:

$$v_m = c \cdot \sqrt{r_{hy} \cdot I}$$



MANNING-STRICKLER:

$$v_m = k_{St} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

Nachfolgend soll nur die letztere Fließformel behandelt werden, die ebenfalls das *Quadratgesetz* des Fließwiderstandes ausdrückt. Dies wird deutlich, wenn sowohl diese als auch diejenige des allgemeinen Widerstandsgesetzes (mit dem λ -Wert) für den Fall des gleichförmig stationären Abflussvorganges auf eine vergleichbare Form gebracht werden, d.h., nach dem „Reibungsgefälle“ der Energielinie aufgelöst werden.

Es ist:
$$I = \frac{\Delta h}{\Delta L} = \frac{1}{k_{St}^2} \cdot \frac{v_m^2}{r_{hy}^{4/3}} \quad \text{bzw.}$$

$$I = \frac{\Delta h}{\Delta L} = \lambda \cdot \frac{v_m^2}{8 \cdot g \cdot r_{hy}}$$



Die Gleichsetzung ergibt:

$$\lambda = \frac{8 \cdot g}{k_{St}^2 \cdot r_{hy}^{1/3}} \quad \text{oder}$$

$$k_{St} = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{\lambda \cdot r_{hy}^{1/3}}} \quad \left[\frac{m^{1/3}}{s} \right]$$

k_{St} ist dimensionsbehaftet und darf nicht mit der absoluten Rauigkeitserhebung k des allgemeinen Fließgesetzes verwechselt werden. Der Strömungswiderstand nimmt mit zunehmendem k_{St} - Wert (im Gegensatz zum k -Wert !) ab.

Nachfolgend wird bevorzugt die Manning-Strickler-Formel mit dem k_{St} - Wert verwendet.



Sohl- bzw. Wandmaterial	k_{St} – Wert nach
	Manning-Strickler
	in $m^{1/3}/s$
Glatter Beton	80
Klinkermauerwerk	75
Gussasphalt	70
Kies	40
Grobkies	35
Natürlicher Flusslauf	30

Weitere Werte bei PRESS-SCHRÖDER.

Bei Geschiebetrieb und Bildung von Strömungsriffeln sind zur Ermittlung von k_{St} - Werten Naturmessungen erforderlich.

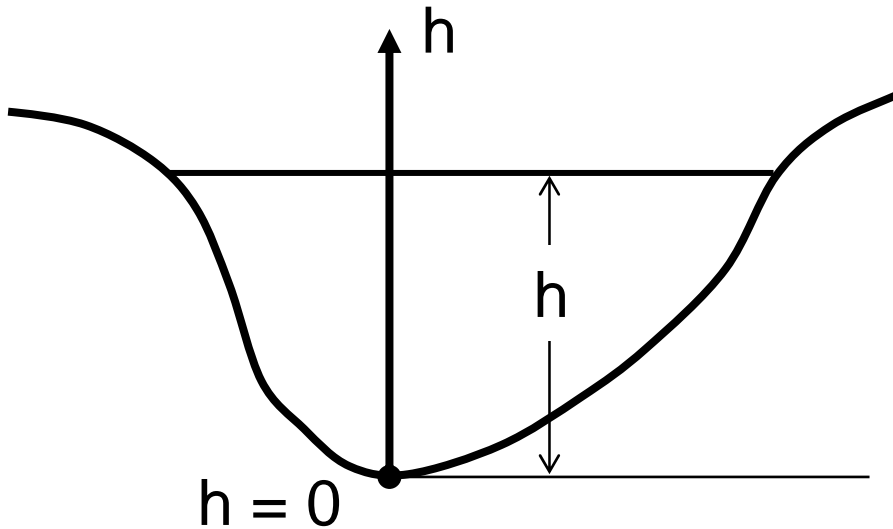


3 Grundaufgaben der Gerinnehydraulik

Wahlweise kann verwendet werden:

$$v_m = f(\lambda, r_{hy}, l) \quad \text{oder}$$

$$v_m = f(k_{St}, r_{hy}, l)$$



Die Funktionen:

$$A = A(h)$$

$$I_U = I_U(h)$$

$$r_{hy} = \frac{A(h)}{I_U(h)} = r_{hy}(h)$$

können für einfache Querschnitte als geschlossene und für unregelmäßige Querschnitte auf graphischem oder numerischem Wege angegeben werden. Alle Bemessungsaufgaben lassen sich auf nachfolgende 3 Grundaufgaben zurückführen.



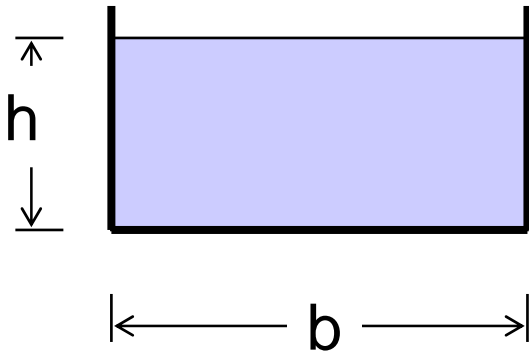
A. Gegeben: Querschnittsform, -baustoff, Tiefe und Gefälle I

Gesucht: v_m und Q

Lösung:
$$v_m = k_{St} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I^{1/2} \qquad Q = A \cdot v_m$$

(Z.B.: Prüfung der Leistungsfähigkeit von Gerinnequerschnitten.)

Beispiel: Rechteckgerinne $b = 10\text{m}$; $h = 2\text{m}$; $k_{St} = 80$; $I = 2\text{‰}$.



$$A = h \cdot b = 2 \cdot 10 = 20\text{m}^2$$

$$l_U = b + 2 \cdot h = 10 + 2 \cdot 2 = 14\text{m}$$

$$r_{hy} = \frac{20}{14} = 1,43\text{m}$$

$$v_m = k_{St} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I^{1/2} = 80 \cdot 1,43^{2/3} \cdot 0,002^{1/2} = 4,54\text{m/s}$$

$$Q = A \cdot v_m = 20 \cdot 4,54 = 90,8\text{m}^3/\text{s}$$



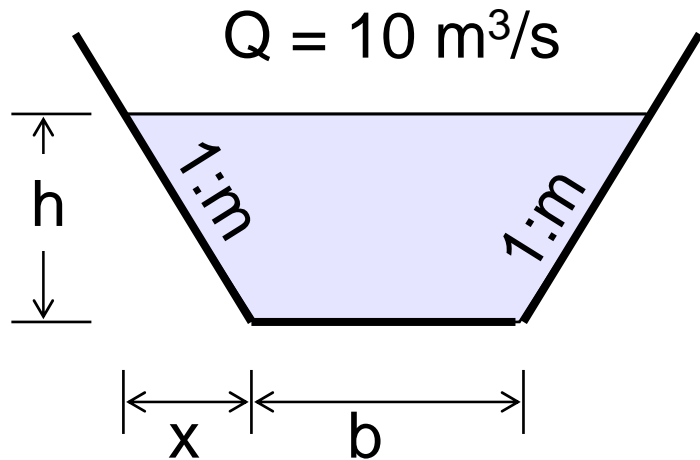
B. Gegeben: Querschnittsform, -baustoff, Tiefe und Durchfluss Q

Gesucht: erforderliches Gefälle I

Lösung: $v_m = \frac{Q}{A}$ $v_m = k_{St} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I^{1/2}$ $I = \frac{1}{k_{St}^2} \cdot \frac{1}{r_{hy}^{4/3}} \cdot v_m^2$

(Z.B.: Planung von Werkkanälen oder Bewässerungskanälen.)

Beispiel: Trapezgerinne $b = 6m$; $h = 1m$; $1:m = 1:3$; $k_{St} = 30$;



$$\frac{1}{m} = \frac{h}{x} \rightarrow x = h \cdot m = 1 \cdot 3 = 3m$$

$$A = (b + x) \cdot h = (6 + 3) \cdot 1 = 9m^2$$

$$l_U = b + 2 \cdot \sqrt{x^2 + h^2} = b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + m^2}$$

$$l_U = 6 + 2 \cdot 1 \cdot \sqrt{10} = 12,32m$$

$$r_{hy} = \frac{A}{l_U} = \frac{9,0}{12,32} = 0,73m$$

$$I = \frac{1,11^2}{30^2 \cdot 0,73^{4/3}} = 0,002 = 2\text{‰}$$

$$v_m = \frac{10}{9} = 1,11m/s$$

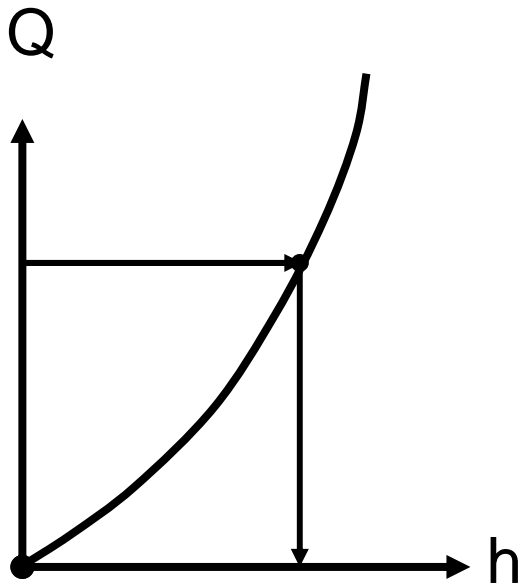


C. Gegeben: Durchfluss Q ; Querschnittsform; Gefälle I

Gesucht: Wassertiefe h

$$\text{Lösung: } Q = A \cdot v_m = A \cdot k_{St} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

$$Q = k_{St} \cdot I^{1/2} \cdot A \cdot r_{hy}^{2/3} = \textit{konst} \cdot f(h)$$



Während k_{St} und I konstant sind, ist die gesuchte Wassertiefe h sowohl im Querschnitt A als auch im hydraulischen Radius r_{hy} enthalten. Falls eine geschlossene Lösung unmöglich oder umständlich ist, erfolgt die Lösung numerisch (durch Versuchsrechnung) oder graphisch.

(Z.B.: Ermittlung erforderlicher Fließtiefen von Werkkanälen bei Pumpen- oder Turbinenzuläufen.)



Hydraulisch günstige Querschnittsformen

Gemäß Fließformel $V_m = k_{St} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I^{1/2}$

ist bei vorgegebener (konstanter) Querschnittsfläche A die größte Geschwindigkeit und damit auch der größte Abfluss dann vorhanden, wenn

$$r_{hy} = \frac{A}{I_U} \quad \text{ein Maximum aufweist.}$$

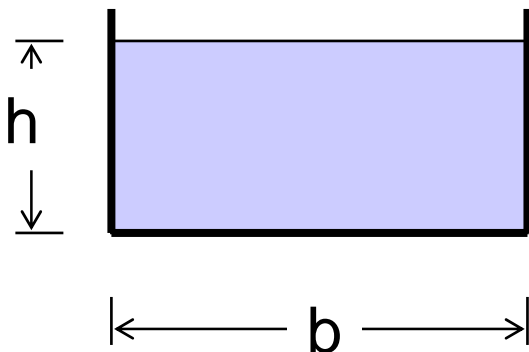
Dies führt zu der Forderung nach einem *minimalen* benetzten Umfang: $I_U = I_{U \min.}$

Beispiel Reckeckgerinne:

$$I_U = b + 2 \cdot h$$

$$b = \frac{A}{h}$$

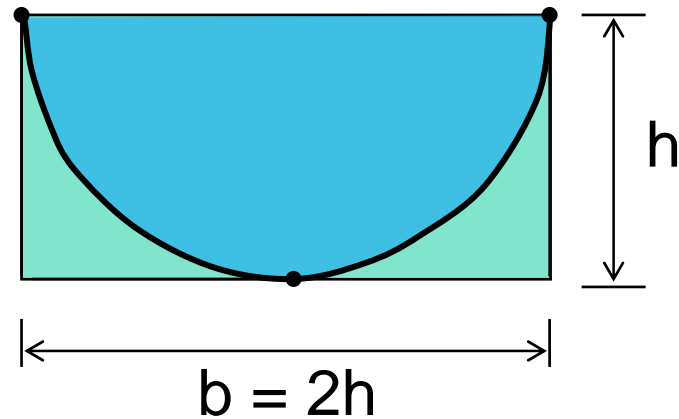
$$I_U(h) = \frac{A}{h} + 2 \cdot h$$



$$\frac{dl_U}{dh} = -\frac{A}{h^2} + 2 = 0$$

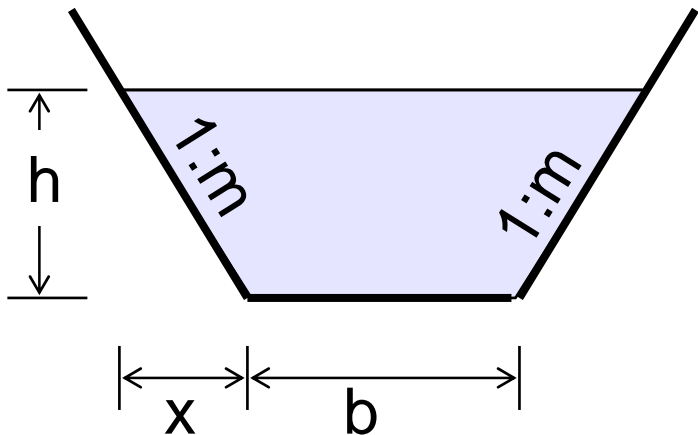
$$\frac{A}{h^2} = \frac{b \cdot h}{h^2} = \frac{b}{h} = 2$$

$$\rightarrow b = 2 \cdot h$$



Es handelt sich um das Rechteck, dessen Seiten von einem eingeschriebenen Halbkreis tangential berührt werden.

Beispiel Trapezgerinne:



$$A = b \cdot h + m \cdot h^2 \rightarrow b = \frac{A - m \cdot h^2}{h} = \frac{A}{h} - m \cdot h$$

$$l_U = b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + m^2} \quad (\text{s.o. 12.20})$$

$$l_U(h) = \frac{A}{h} - m \cdot h + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + m^2}$$

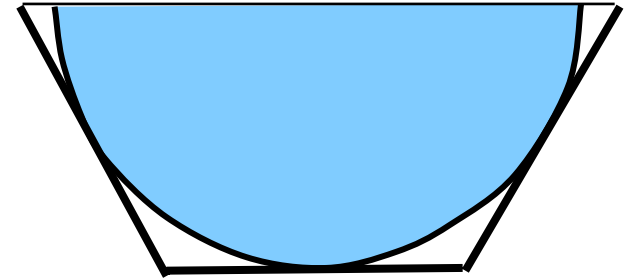


Minimum:

$$\frac{dl_U}{dh} = -\frac{A}{h^2} - m + 2 \cdot \sqrt{1 + m^2} = 0$$

mit $A = b \cdot h + m \cdot h^2$ wird

$$-\frac{b}{h} - m - m + 2 \cdot \sqrt{1 + m^2} = 0$$



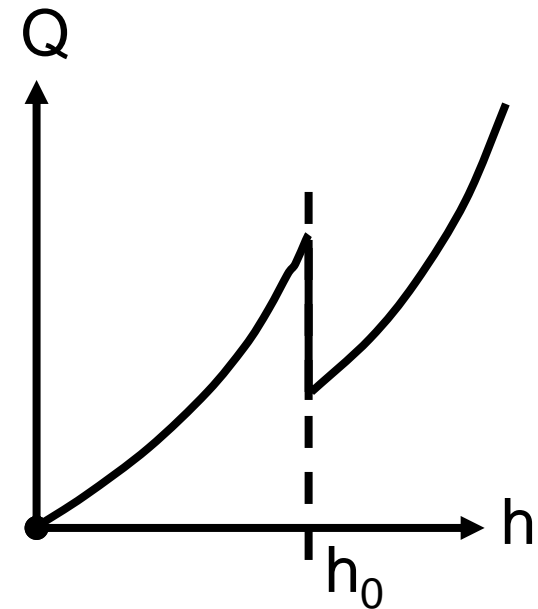
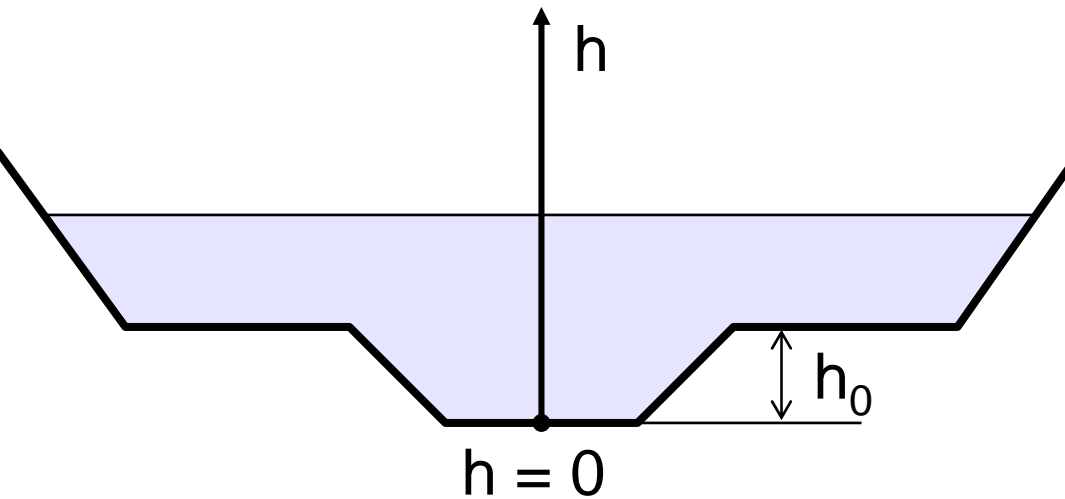
$$\frac{b}{h} = 2 \cdot \sqrt{1 + m^2} - 2 \cdot m$$

Dieses Ergebnis besagt, dass auch hier ein einbeschriebener Halbkreis die Seiten des Trapezes tangiert.

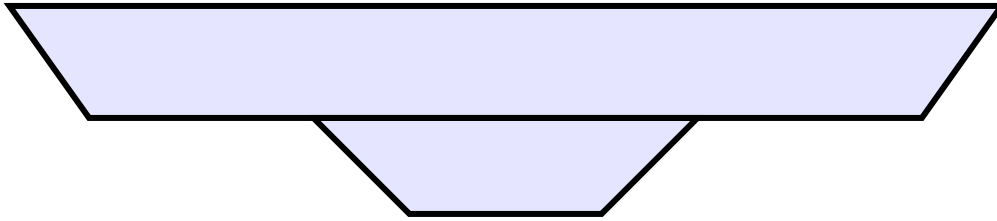
(hier: für Böschungsneigung $\tan 60^\circ$ ($m = 0,577$) wird $b = 1,155 h$)

Allgemein kann festgestellt werden, dass bei jedem Querschnittstyp die Abmessungen am günstigsten sind, bei denen das Profil einem Halbkreis am nächsten kommt, vergl. Wasserkraftanlagenbau.

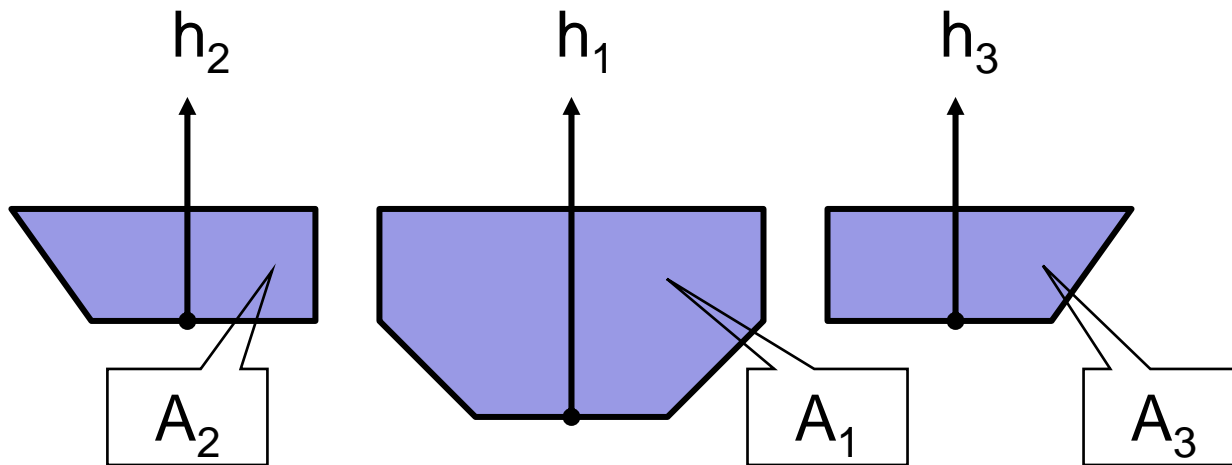
Zusammengesetzte Querschnitte



Eingedeichte Flussquerschnitte sind oft in das Mittelwasserbett und die bei HW überfluteten Vorländer untergliedert. Würde bei einem solchen Querschnitt der hydraulische Radius rein formal gebildet, ergäbe sich in der Abflusskurve beim Überschreiten der Wassertiefe h_0 ein Sprung nach unten, der physikalisch nicht möglich ist.

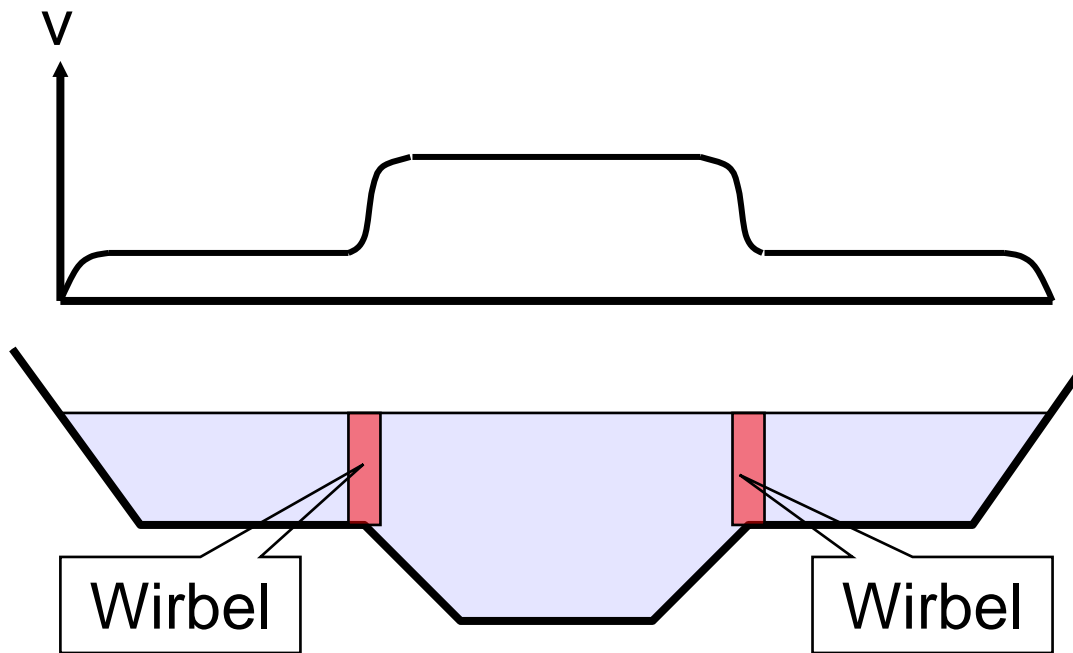


Der Gesamtquerschnitt wird in Teile zerlegt. Das Gefälle ist in allen Teilquerschnitten gleich. Rauheiten können im Strombett und auf den Vorländern unterschiedlich berücksichtigt werden.



$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q = I^{1/2} \cdot \left[k_{St1} \cdot A_1 \cdot r_{hy1}^{2/3} + k_{St2} \cdot A_2 \cdot r_{hy2}^{2/3} + k_{St3} \cdot A_3 \cdot r_{hy3}^{2/3} \right]$$



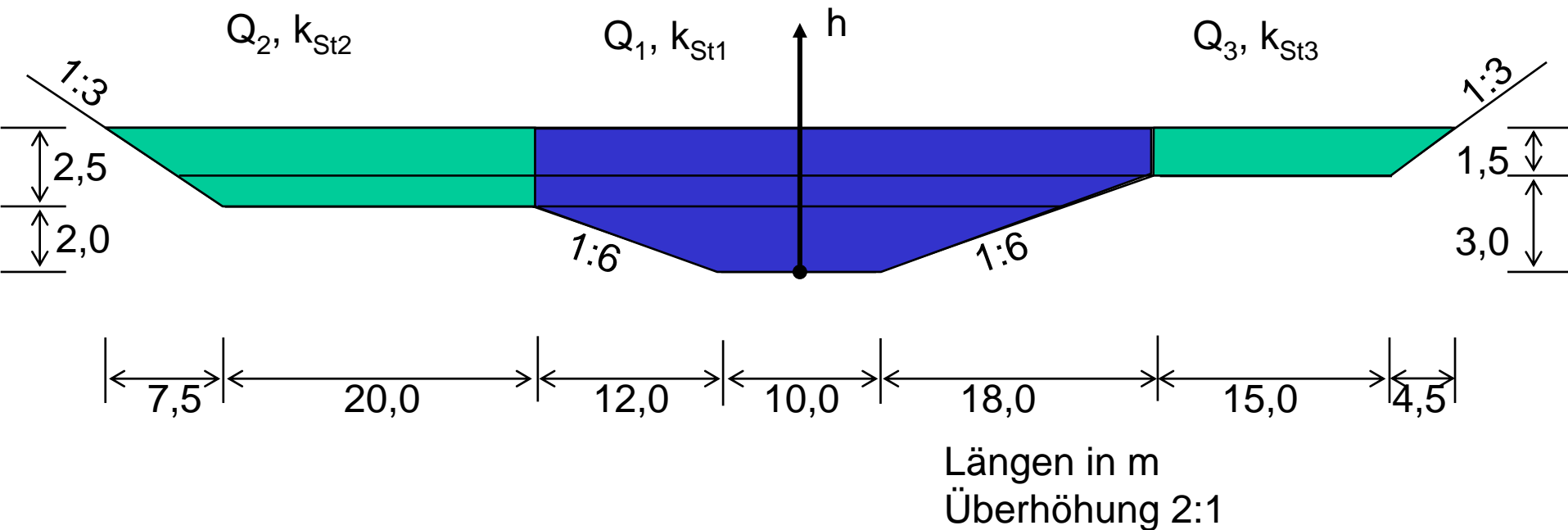
Insbesondere bei breiten Vorländern ist es gerechtfertigt, auch die Trennflächen zwischen den Teilflächen wie feste Berandungen zu berücksichtigen, da durch den Geschwindigkeitsunterschied in den betreffenden Diskontinuitätsschichten Wirbel mit vertikaler Achse auftreten können.

Zur Vermeidung von Erosion sollten die gefährdeten Bereiche durch Pflasterungen geschützt werden.

Abfluss in einem gegliederten Querschnitt



Berechnung der Abflusskurve $Q(h)$ nach Manning-Strickler unter Berücksichtigung unterschiedlicher Fließgeschwindigkeiten in den Teilquerschnitten.



$$\sum Q = \sum v_i \cdot A_i = A_1 \cdot k_{St1} \cdot r_{hy1}^{2/3} \cdot I^{1/2} + A_2 \cdot k_{St2} \cdot r_{hy2}^{2/3} \cdot I^{1/2} + A_3 \cdot k_{St3} \cdot r_{hy3}^{2/3} \cdot I^{1/2}$$



Tabellarische Berechnung der Abflüsse

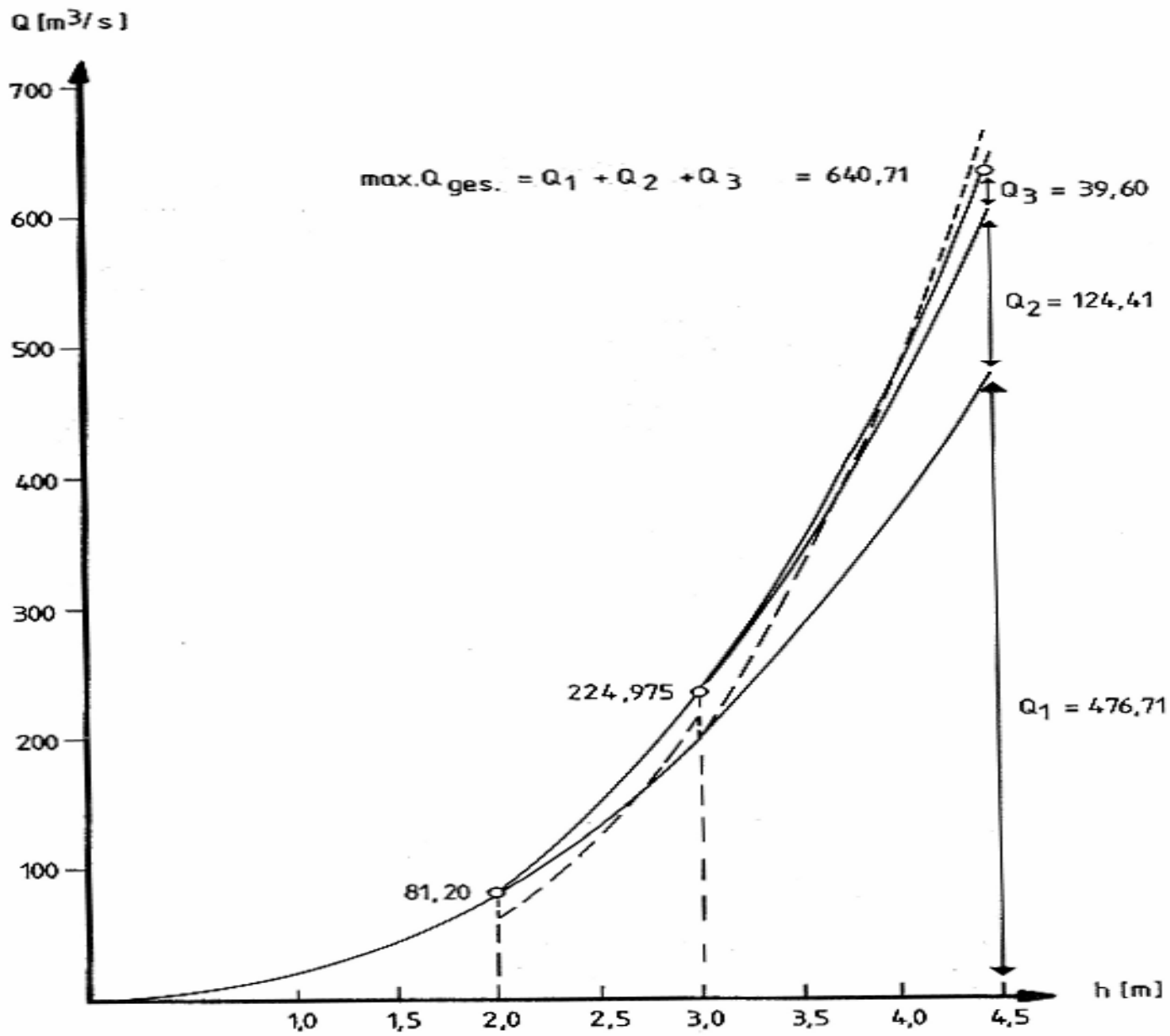
Gegeben: Gefälle

$$I = 0,002$$

Oberflächenrauigkeit $k_{St1} = 35$

$$k_{St2} = k_{St3} = 30$$

h	k_{St1}	A_1	I_{u1}	$r_{hy1}^{2/3}$	Q_1	k_{St2}	A_2	I_{u2}	$r_{hy2}^{2/3}$	Q_2	k_{St3}	A_3	I_{u3}	$r_{hy3}^{2/3}$	Q_3	ΣQ
m	-	m^2	m	m	m^3/s	-	m^2	m	m	m^3/s	-	m^2	m	m	m^3/s	m^3/s
1,0	35	16,0	22,17	0,803	20,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,11
1,5	35	28,5	28,25	1,000	44,61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	44,61
2,0	35	44,0	34,33	1,179	81,20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	81,20
3,0	35	81,0	41,41	1,564	198,29	30	21,5	24,16	0,925	26,68	-	-	-	-	-	224,97
4,0	35	121,0	43,41	1,980	375,00	30	46,0	28,23	1,381	85,23	30	16,5	19,16	0,975	21,58	481,81
4,5	35	141,0	44,41	2,160	476,71	30	59,4	30,41	1,562	124,42	30	25,9	21,24	1,141	39,60	640,73





Anmerkung zur Abflusskurve:

Die gestrichelt dargestellte Abflusskurve ergibt sich, wenn keine Unterteilung in Teilquerschnitte vorgenommen wird. Sprünge entstehen bei den Wassertiefen $h = 2,0 \text{ m}$ und $h = 3,0 \text{ m}$, da hier eine plötzliche Vergrößerung des benetzten Umfanges bei gleichbleibendem Querschnitt vorliegt.

Nachfolgend werden 3 Punkte der Abflusskurve $Q = f(h)$ nachgerechnet :

In den gekennzeichneten 3 Teilquerschnitten stellen sich unterschiedliche mittlere Abflussgeschwindigkeiten ein. Zur Berechnung der hydraulischen Radien wurden die Diskontinuitätsflächen (theoretische Trennfläche zwischen den Teilquerschnitten) jeweils mitgerechnet.



1. Abfluss in einem Trapezprofil $h = 2,0 \text{ m}$

$$A_1 = 10 \cdot 2,0 + 12 \cdot 2,0 = 44,0 \text{ m}^2$$

$$r_{hy1} = \frac{A}{l_u} = \frac{44,0}{34,33} = 1,28 \text{ m}$$

$$l_{u1} = 10 + 2,0 \cdot \sqrt{2^2 + 12^2} = 34,33 \text{ m}$$

$$r_{hy1}^{2/3} = 1,28^{2/3} = 1,179$$

$$Q = Q_1 = A_1 \cdot v_1 = A_1 \cdot k_{St1} \cdot r_{hy1}^{2/3} \cdot l^{1/2} = 44 \cdot 35 \cdot 1,179 \cdot 0,002^{1/2} = \underline{\underline{81,20 \text{ m}^3/\text{s}}}$$

2. Abfluss in zwei Teilprofilen $h = 3,0 \text{ m}$



$$A_1 = 44 + 1,0 \cdot (12 + 10 + 15) = 81,0 \text{ m}^2$$

$$r_{hy1} = \frac{A}{l_u} = \frac{81,0}{41,41} = 1,956 \text{ m}$$

$$Q_1 = A_1 \cdot v_1 = A_1 \cdot k_{St1} \cdot r_{hy1}^{2/3} \cdot l^{1/2} = 81,0 \cdot 35 \cdot 1,564 \cdot 0,002^{1/2} = 198,29 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$l_{u1} = 34,33 + 1,0 + \sqrt{6^2 + 1,0^2} = 41,41 \text{ m}$$

$$r_{hy1}^{2/3} = 1,956^{2/3} = 1,564$$

$$A_2 = 1,0 \cdot (20 + 1,5) = 21,5 \text{ m}^2$$

$$r_{hy2} = \frac{A}{l_u} = \frac{21,5}{24,16} = 0,889 \text{ m}$$

$$Q_2 = A_2 \cdot v_2 = A_2 \cdot k_{St2} \cdot r_{hy2}^{2/3} \cdot l^{1/2} = 21,5 \cdot 30 \cdot 0,925 \cdot 0,002^{1/2} = 26,68 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$l_{u2} = 20,0 + \sqrt{1,0^2 + 3,0^2} + 1,0 = 24,16 \text{ m}$$

$$r_{hy2}^{2/3} = 0,889^{2/3} = 0,925$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = 198,29 + 26,68 = \underline{\underline{224,97 \text{ m}^3/\text{s}}}$$

3. Abfluss in drei Teilprofilen $h = 4,5 \text{ m}$



$$A_1 = 81 + 1,5 \cdot (12 + 10 + 18) = 141,0 \text{ m}^2$$

$$l_{u1} = 41,41 + 2,0 \cdot 1,5 = 44,41 \text{ m}$$

$$r_{hy1} = \frac{A}{l_u} = \frac{141,0}{44,41} = 3,175 \text{ m}$$

$$r_{hy1}^{2/3} = 3,175^{2/3} = 2,160$$

$$Q_1 = A_1 \cdot v_1 = A_1 \cdot k_{St1} \cdot r_{hy1}^{2/3} \cdot l^{1/2} = 141,0 \cdot 35 \cdot 2,160 \cdot 0,002^{1/2} = 476,71 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_2 = 21,5 + 1,5 \cdot (27,5 - 2,25) = 59,37 \text{ m}^2$$

$$l_{u2} = 24,16 + 1,5 + \sqrt{1,5^2 + 4,5^2} = 30,40 \text{ m}$$

$$r_{hy2} = \frac{A}{l_u} = \frac{59,37}{30,40} = 1,953 \text{ m}$$

$$r_{hy2}^{2/3} = 1,953^{2/3} = 1,562$$

$$Q_2 = A_2 \cdot v_2 = A_2 \cdot k_{St2} \cdot r_{hy2}^{2/3} \cdot l^{1/2} = 59,37 \cdot 30 \cdot 1,562 \cdot 0,002^{1/2} = 124,41 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_3 = 1,5 \cdot \left(15 + \frac{4,5}{2} \right) = 25,875 \text{ m}^2$$

$$l_{u3} = 1,5 + 15 + \sqrt{4,5^2 + 1,5^2} = 21,24 \text{ m}$$

$$r_{hy3} = \frac{A}{l_u} = \frac{25,875}{21,24} = 1,218 \text{ m}$$

$$r_{hy3}^{2/3} = 1,218^{2/3} = 1,141$$

$$Q_3 = A_3 \cdot v_3 = A_3 \cdot k_{St3} \cdot r_{hy3}^{2/3} \cdot l^{1/2} = 25,875 \cdot 30 \cdot 1,141 \cdot 0,002^{1/2} = 39,60 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = Q_{ges} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 476,71 + 124,41 + 39,60 = \underline{\underline{640,73 \text{ m}^3/\text{s}}}$$