

EL MOVIMIENTO DEL AGUA EN RIOS I CANALES

POR

R. SCHECK

INJENIERO INSPECTOR DE OBRAS HIDRÁULICAS

1893

Traducido del aleman por Carlos Ehlers i Dublé

EL MOVIMIENTO DEL AGUA EN RIOS I CANALES

Si Q representa el caudal de agua en cbm., F el perfil trasversal del curso uniforme en rios i canales, entónces el cociente, $\frac{Q}{F}=v$, representa la velocidad media del agua. Aquel contorno de la seccion trasversal, que no está en contacto con el aire atmosférico, se llama el “perímetro mojado” i el cociente formado por la seccion F i este perímetro mojado p : $\frac{F}{p}=r$, llámase la profundidad media hidráulica o radio medio hidráulico. Si h es la pendiente de la superficie del agua con relacion a la longitud l , entónces tenemos que $\frac{h}{l}=a$ es la pendiente por unidad de longitud (pendiente relativa). Estos valores tienen entre sí, segun aceptacion jeneral, las siguientes relaciones:

$$v=k\sqrt{r \cdot a}$$

Eytelwein da a k un valor constante de 50.9 (para sistema métrico), lo que no es racional, porque el coeficiente de la velocidad depende de la estructura i consistencia del lecho respectivo.

Bazin ha sentado la fórmula

$$v = \sqrt{\frac{r a}{a + \frac{b}{r}}} \text{ (aplicable para } r < 0.6 \text{ m.)},$$

en que a i b son coeficientes empíricos, cuyo valor medio es en

- 1) Canales de madera bien cepillada
o cemento $a = 0.00019$, $b = 0.0000045$;
- 2) Canales de mampostería de ladrillo, piedra canteada o madera sin cepillar $a = 0.00019$, $b = 0.0000133$;
- 3) Canales de mampostería de piedra ordinaria $a = 0.00024$, $b = 0.00006$;
- 4) Canales de tierra $a = 0.00028$, $b = 0.00035$.

Sasse ha introducido en lugar de r la profundidad de las curvas correspondientes a los caudales de agua. Las mensuras de *Humphrey* i *Abbot* en el *Mississippi* han originado la redacción de nuevas fórmulas, en las cuales aparece como factor principal el rozamiento del agua en el perímetro mojado. Las mensuras i fórmulas de estos ingenieros no son, en parte, suficientemente exactas i, en parte también, demasiado incómodas; de mejor aplicación son las fórmulas de *Ganguillet* i de *Kutter*, que también están basadas en estas consideraciones. Según ellos es

$$= \left[\frac{23 + \frac{0.00155}{a} + \frac{1}{n}}{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{a} \right) \frac{n}{\sqrt{r}}} \right] \times \sqrt{r a} = K \sqrt{r a}$$

El coeficiente de rozamiento n tiene los siguientes valores:

- 1) $n=0.010$ para canales de madera perfectamente cepillada o cemento liso;
- 2) $n=0.012$ para canales de tablas sin cepillar;
- 3) $n=0.013$ para canales de piedra canteada o ladrillos bien rebocados.
- 4) $n=0.017$ para canales de piedra sin cantear.
- 5) $n=0.025$ para canales de tierra, arroyos i rios.
- 6) $n=0.030$ para arroyos i rios con rodados i plantas acuáticas.

Mensuras en la rejion superior del Danubio i de sus afluentes (rios torrenciales) han dado a n un valor de $n=0.0226-0.0284$. En las últimas mensuras practicadas en el Elba ha resultado que el valor de n aumenta no obstante que el volúmen de los sedimentos (rodados) disminuye; de esto se deduce, que los coeficientes han de emplearse con cautela, sobre todo cuando existen bunas o presas en el curso del rio. Tambien parece que n aumenta en la misma seccion con relacion directa con la profundidad i que depende, ademas, de la pendiente relativa. (Véase sobre esto el periódico *Hannov. Ztg. f. Ing. u. Tech.* 1885, páj. 621, en que se atribuye al coeficiente otro significado que el de simple coeficiente de rozamiento. Véase tambien *Zeitschr. f. Bandesen*, cuadernos 10-12.)

La fórmula *antigua de Kutter*, que en pendientes no demasiado suaves p. e. $\alpha > 0.0005$ da mui buenos resultados, se deduce de la fórmula,

$$v = k \sqrt{r \alpha},$$

en la cual k representa al coeficiente de rozamiento. La fórmula es

$$k = \frac{100 \sqrt{r}}{n + \sqrt{r}}$$

Para n dan Kutter i Grebenan los siguientes valores:

CATEGORÍA	FORMA DEL EMBALSE	CONSISTENCIA DE LOS TALUDES I SOLERAS DEL CANAL	COEFICIENTE DE ROZAMIENTO n
I	Semicircular	Cemento puro i liso	0.12
II	Rectangular	Cemento puro i madera perfectamente cepillada.....	0.15
III	"	Tablas bien labradas	0.20
IV	"	Tablas ordinarias, mampostería de ladrillo de superior calidad, piedra canteada ...	0.25
V	"	Mampostería ordinaria del ladrillo, tablonos	0.35
VI	"	Mampostería de piedra desbastada.....	0.45
VII	"	Mampostería de piedra, solera fangosa.....	0.55
VIII	"	Mampostería de piedra sin desbastar, solera fangosa.....	0.75
IX	"	Mampostería antigua pero sin musgo ni vegetacion, con solera fangosa.....	1.00
X	Trapezoidal	Terreno rocoso, solera con ménos altura que 1.50 m., pocas plantas acuáticas...	1.25
"	"	Canal de tierra construido con mucha prolijidad, sin vegetacion	1.50
XI	"	Canal de tierra con solera fangosa o pedregosa, con pocas plantas acuáticas, solera de mas de 2.0 m. de anchura ...	1.75
"	"	Mampostería en seco en mal estado de conservacion, cubierta de musgo i vegetacion, solera fangosa de ménos de 1.50 m. de anchura	2.00
"	"	Canal de tierra cubierto de vegetacion, solera con ménos de 1.50 m. de anchura; arroyos i rios como el Sena, Weser, canal de Linth, etc.....	2.00
XII	"	Canal de tierra cubierto de vegetacion, mal conservado, con solera fangosa i con ménos de 1.50 m. de anchura. Cursos de agua con rodados	2.50

En casos que no muestren coincidencia con una de las doce categorías, débese aproximar los coeficientes siguientes a una categoría, previa consideración del desarrollo longitudinal de la solera, de los taludes i de los diferentes estados de rozamientos que presente el terreno respectivo.

En arroyos con rodado ha observado *Grebenan* que los coeficientes de las categorías X-XII dejan de ofrecer seguridad i no dan resultados exactos. Para cursos de agua con ménos pendiente que 0.0005 no debe emplearse para los cálculos los coeficientes enumerados.

VALORES DEL COEFICIENTE k EN LA FÓRMULA $v = k \sqrt{r a}$

r en m	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0.01	45.5	40.0	33.3	27.0	23.2	18.2	15.2	12.2	9.7	7.6	5.6	3.9
0.03	59.0	53.6	46.4	39.0	33.1	27.8	23.6	19.4	15.7	12.4	9.4	6.6
0.05	65.1	59.9	52.9	45.3	39.0	33.2	28.6	23.7	19.4	15.5	11.8	8.4
0.07	68.8	63.9	57.0	49.5	43.1	37.1	32.1	26.9	22.2	17.8	13.7	9.8
0.10	72.5	67.8	61.2	53.9	47.5	41.3	36.1	30.5	25.4	20.6	15.9	11.5
0.11	73.2	68.6	62.1	54.9	48.5	42.3	37.1	31.4	26.2	21.3	16.5	11.9
0.12	74.0	69.5	63.1	55.9	49.5	43.3	38.0	32.3	27.0	22.0	17.1	12.3
0.13	74.7	70.3	64.0	56.9	50.5	44.3	39.0	33.2	27.8	22.7	17.7	12.8
0.14	75.5	71.2	65.0	57.9	51.5	45.2	39.9	34.1	28.6	23.4	18.3	13.3
0.15	76.3	72.0	65.9	58.9	52.5	46.2	40.9	35.0	29.4	24.1	18.9	13.7
0.16	76.8	72.5	66.5	59.6	53.2	46.9	41.6	35.6	30.0	24.6	19.3	14.0
0.17	77.3	73.2	67.1	60.3	53.9	47.6	42.3	36.3	30.6	25.2	19.8	14.4
0.18	77.8	73.7	67.8	60.9	54.7	48.3	43.0	36.9	31.2	25.7	20.2	14.7
0.19	78.3	74.3	68.4	61.6	55.3	49.1	43.7	37.6	31.8	26.3	20.7	15.3
0.20	78.8	74.9	69.0	62.3	56.1	49.8	44.4	38.3	32.4	26.8	21.1	15.5
0.25	80.4	76.7	71.1	64.7	58.6	52.3	47.0	40.8	34.8	28.9	22.9	17.0
0.30	82.0	78.5	73.2	67.0	61.0	54.9	49.5	43.2	37.1	31.0	24.7	18.4
0.35	83.0	79.7	74.6	68.6	62.7	56.7	51.3	45.0	38.8	32.6	26.1	19.5
0.40	84.0	80.8	76.0	70.1	64.4	58.4	53.0	46.7	40.4	34.1	27.5	20.6
0.45	84.8	81.7	77.0	71.3	65.7	59.8	54.4	48.1	41.8	35.4	28.6	21.6
0.50	85.5	82.5	77.9	72.4	66.9	61.1	55.8	49.5	43.2	36.7	29.7	22.5
0.55	86.0	83.2	78.7	73.3	67.9	62.2	57.0	50.7	44.4	37.8	30.7	23.3
0.60	86.6	83.8	79.5	74.2	68.9	63.3	58.1	51.8	45.5	38.9	31.7	24.1
0.65	87.0	84.3	80.1	74.9	69.7	64.2	59.0	52.8	46.4	39.8	32.5	24.8
0.70	87.5	84.8	80.7	75.6	70.5	65.1	59.9	53.8	47.4	40.7	33.4	25.5
0.75	87.9	85.2	81.2	76.2	71.2	65.8	60.7	54.6	48.2	41.5	34.2	26.2
0.80	88.2	85.6	81.7	76.8	71.9	66.5	61.5	55.4	49.0	42.3	34.9	26.8
0.85	88.5	86.0	82.2	77.4	72.5	67.2	62.2	56.2	49.8	43.1	35.6	27.4
0.90	88.8	86.4	82.6	77.9	73.0	67.8	62.9	56.9	50.5	43.8	36.2	28.0
0.95	89.0	86.7	83.0	78.3	73.5	68.4	63.5	57.6	51.2	44.4	36.9	28.6
1.00	89.3	87.0	83.3	78.7	74.0	69.0	64.1	58.2	51.8	45.0	37.5	29.1
1.50	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	56.1	49.4	41.7	32.9
2.00	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	60.3	53.7	45.9	36.7
2.50	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	62.7	56.2	48.4	39.1
3.00	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	65.0	58.7	50.9	41.5
3.50	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	66.7	60.4	52.7	43.3
4.00	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	68.3	62.1	54.5	45.0
4.50	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	69.5	63.4	55.9	46.4
5.00	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	70.6	64.8	57.3	47.8
5.50	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	71.6	65.8	58.4	49.0
6.00	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	72.5	66.8	59.5	50.1

Otras tablas que se adaptan para simplificar los cálculos son las publicadas por *Rühlmann* "*Hydromechanik*," 1888, páj. 413-417.

Hagen establece dos fórmulas: para fosos de tierra en que $a \geq 0.001$, $r \geq 0.29$ m. i $v = 4.9 r \sqrt[5]{a}$; para rios tanto pequeños como caudalosos es $v = 3.34 \sqrt{r} \sqrt[5]{a}$.

Harder, cuyas fórmulas han dado relativamente buenos resultados, separa el coeficiente k de la fórmula: $v = k\sqrt{ra}$ en $k = k_1 + k_2\sqrt{r}$ i da los siguientes valores para k :

1. Canales con muros mui lisos: $k = 70.5 + 7.254 \sqrt{r}$.
2. Canales de tablas lisas o mampostería estucada: $k = 56.0 + 7.254 \sqrt{r}$.
3. Canales de tierra o mampostería ordinaria de piedra:
 $k = 36.27 + 7.254 \sqrt{r}$.

Todas estas fórmulas exigen a lo ménos perfiles mas o ménos regulares i una velocidad aproximadamente uniforme de los rios en trechos no mui cortos. Donde no se llenan estas condiciones, serán los resultados obtenidos mas o ménos inexactos i se impone la mensura directa. Tambien parece irracional emplear una misma fórmula tanto para arroyos pequeños como para rios caudalosos.

Segun las observaciones de *von Wagner* i *Schmid*, han dado los mejores resultados las fórmulas de *Ganguillet* i *Kutter*.

La relacion que existe entre la velocidad media v de la seccion total de un rio i de la velocidad máxima v_{max} en la superficie, difiere en casi todos los cursos de agua i varía segun las crecidas. (Una fórmula jeneral que indique esta relacion no existe hasta la fecha.)

La suposicion de *Hagen*, que considera $v = \frac{6}{7} v_{max} = \sim 0.85 v_{max}$, coincide en jeneral con la realidad en muchos rios i, segun la publicacion de *Sasse* en el periódico: *Allgemeine Bauzeitung*, 1888,—de la cual resulta que $v = 0.75 v_{max}$ aparece frecuentemente como valor aproximado, no puede considerarse la apreciacion de *Hagen* como refutada del todo.

Para las velocidades en una línea vertical imaginaria de la sección transversal de un río, da *Sasse* las siguientes indicaciones:

1. Cuando la velocidad máxima se encuentra en la superficie del agua, hállese $v = \frac{1}{3} (2 v_{max.} + v_s)$, siendo v = velocidad media, $v_{max.}$ = velocidad máxima i v_s = velocidad en la solera, consideradas todas estas velocidades en la misma vertical.

2. Cuando la velocidad máxima se encuentra el valor a bajo la superficie, hállese $v = \frac{1}{3} (2 v_{max.} + v_s) + a \frac{v_s - v_s}{3t}$, siendo va = velocidad en la superficie i t = profundidad de la sección en la misma vertical.

Las mensuras dentro del cajón del río deben practicarse separadamente de las de su lecho de inundación.

Grebenan ha encontrado en pequeños arroyos $v = 0.67 v_{max.}$; otros: $v = 0.80 - 0.92 v_{max.}$, para el Rin cerca de Strasburgo; *von Wagner*: $v = 0.855 v_{max.}$

Mensuras practicadas con el tubo de *Cabeau* dan en jeneral la relación $\frac{v}{v_{max.}}$. demasiado grande. Compárese a este respecto las

mensuras de *Bürkli* en el Ródano i el Limmat. Resultados de regular exactitud suministra la fórmula de *von Wagner*: $v = 0.67 v_{max.} +$

$0.027 \frac{v_s}{v_{max.}}$. Según informes de *Harlacher* era para el Elba cerca

de Tetschen en su estado normal: $v = 0.65 v_{max.}$, i en crecidas $v = 0.75 v_{max.}$ Él mismo determinó la relación entre la velocidad superficial i la velocidad media en la vertical, que resultó $0.83 - 0.87$, término medio 0.85 . Este valor relativo ha obtenido también *Bürkli* en mensuras hidrométricas con molinetes en los ríos Ródano cerca de Jinebra i en el Limmat. Ahora si para cada mensura se dibuja la curva de las velocidades en la superficie da la anchura total del río i si se divide el espacio comprendido entre esta curva i el eje correspondiente de abscisas—por la anchura del río, se obtendrá el verdadero término medio de la velocidad en la superficie, i por medio

del valor relativo ($v = 0.85 v_{max}$, fórmulas 1 i 2 i otras) puede obtenerse en seguida tambien la velocidad media de la seccion transversal de un rio.

Darcy i *Bazin* han formado la siguiente tabla para los valores $\frac{v}{v_{max}}$ para diferentes profundidades i para las diferentes consistencias de los perímetros respectivos:

VALORES DE $\frac{v}{v_{max}}$.

r EN m	I	II	III	IV	I	II	III	IV	r EN m
0.03	0.80	0.74	0.62	.....	0.85	0.82	0.77	0.65	0.30
0.06	0.83	0.78	0.67	0.51	0.85	0.83	0.80	0.71	0.60
0.09	0.83	0.79	0.70	0.54	.....	.....	0.80	0.74	0.90
0.12	0.84	0.80	0.72	0.56	.....	.....	0.80	0.75	1.20
0.15	0.84	0.81	0.74	0.58	.....	.....	0.81	0.76	1.50
0.18	0.84	0.81	0.75	0.60	.....	.....	0.81	0.77	1.80
0.21	0.84	0.82	0.76	0.62	.....	.....	.....	0.77	2.10
0.24	0.85	0.82	0.76	0.63	.....	.....	.....	0.78	2.4-3.3
0.27	0.85	0.82	0.77	0.64	.....	.....	.....	0.79	3.6-6.0

La categoría I consiste en secciones muy lisas como cemento i madera cepillada.

La categoría II consiste en mampostería lisa, concreto, tablas labradas.

La categoría III consiste en piedra ordinaria bien ejecutada.

La categoría IV consiste en canales de tierra.

Esas comunicaciones sobre el valor de las fórmulas se encuentran en los "*Estudios hidrológicos de los ríos del reino de Baviera*" por el ingeniero *Schmid*, donde tambien se citan los estudios de *Cavall*.

La profundidad de la velocidad media se encuentra, segun *Hagen*, a $\frac{4}{9}$ de la superficie i se determina por la parábola de las velocidades de una vertical (posicion vertical o horizontal del eje.)

Conforme a las mensuras hidrométricas de *Schmid* en el Inn, Danubio superior i otros rios, resultó la relacion entre la profundidad media de la velocidad i la profundidad total: 0.59 i variaba entre 0.5 i 0.816.

