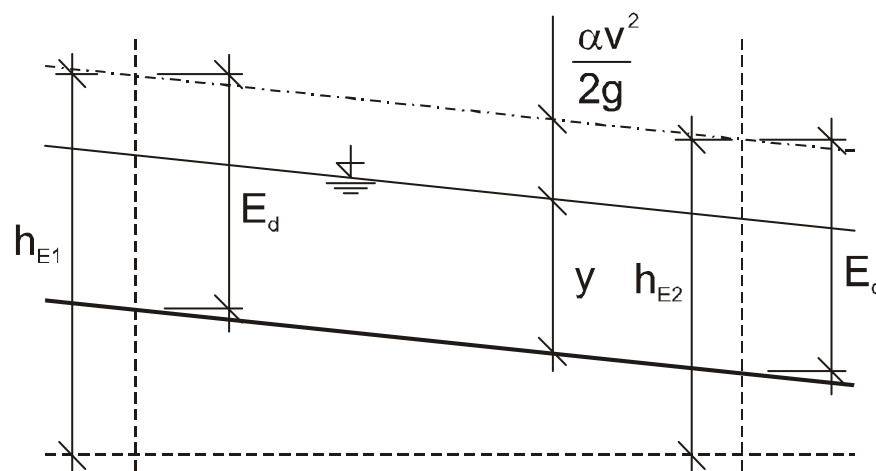
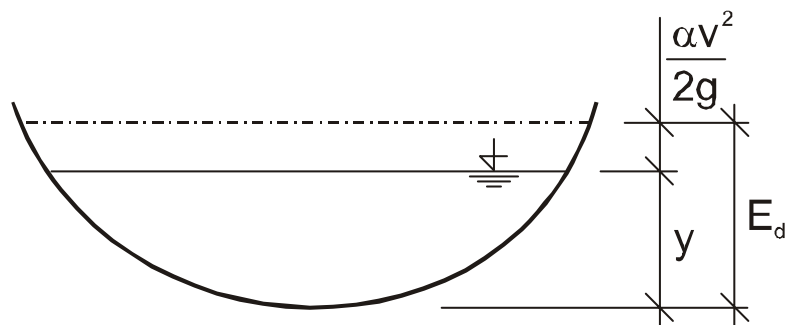


Proudění říční, kritické a bystrinné

Kritické proudění je důležitým případem ustáleného proudění v otevřených korytech. Svými charakteristikami umožňuje určit charakter proudění v korytě, což je nezbytné pro řadu úloh říční hydrauliky, zejména při stanovení průběhu hladin v korytech. Je-li vztažena mechanická energie proudu protékajícího korytem s volnou hladinou k úrovni nejnižšího bodu průřezu a je-li uvažována pro jednotku hmotnostního průtoku, získá se **energetická výška průřezu (měrná energie průřezu)**:

$$E_d = y + \frac{\alpha v^2}{2g} = y + \frac{\alpha Q^2}{2gS^2}$$

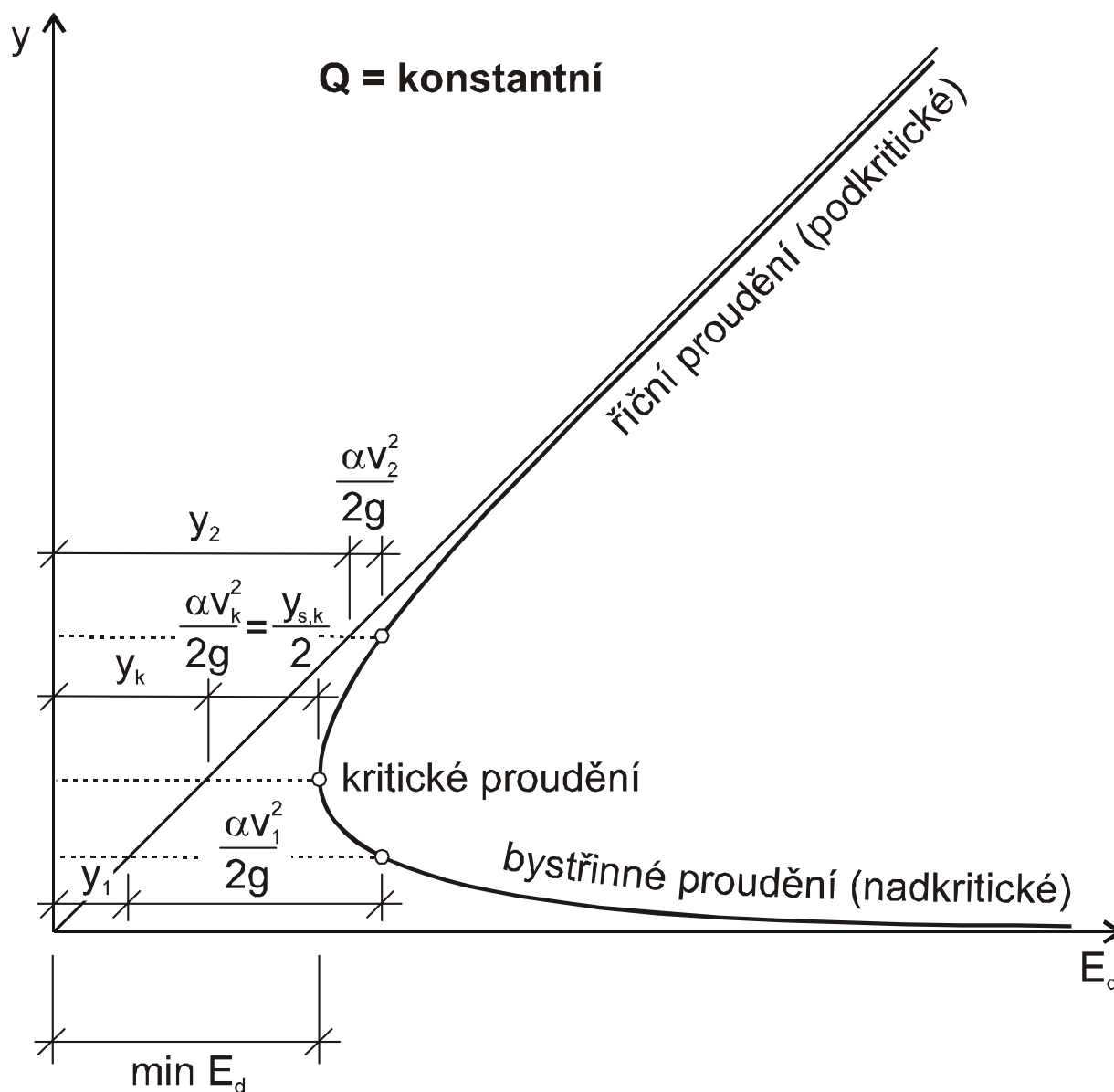


Zatímco energetická výška proudu h_E se směrem pohybu zmenšuje o ztráty, energetická výška průřezu E_d zůstává při rovnoměrném pohybu stálá. Znázorněním průběhu rovnice pro měrnou energii průřezu pro $Q = \text{konst.}$ se získá vrchol křivky A, kterým je určen kritický pohyb.

Při kritickém proudění prochází průřezem daný průtok s vynaložením minima energie.

Pro uvažovaný průtok Q je tento extrém jednoznačně určen: nastává za kritické hloubky y_k , při kritickém průřezu S_k , sklonu i_k a průtok postupuje kritickou rychlostí v_k . Z vyřešení minima funkce dané rov. v níž $S = f(y)$, vyplývá obecná podmínka kritického proudění:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{S_k^3}{B_k}$$



Dosazením za $Q = v_k S_k$ se získá zvláštní vlastnost kritického proudění:

$$\frac{\alpha v_k^2}{2g} = \frac{y_{s,k}}{2}$$

kde $y_s = S/B$ je střední hloubka průřezu. Z rovnice lze vyjádřit kritickou rychlost:

$$v_k = \sqrt{\frac{g}{\alpha} y_{s,k}} = \sqrt{\frac{g}{\alpha} \frac{S_k}{B_k}}$$

a pomocí Chézyho rovnice také kritický sklon:

$$i_k = \frac{g}{\alpha C_k^2} \frac{S_k}{B_k R_k} = \frac{g}{\alpha C_k^2} \frac{O_k}{B_k}$$

Určení Coriolisova čísla α pro uváděné rovnice:

Přímé určení Coriolisova čísla α je možné pouze na základě změřeného rychlostního pole průřezu; v návrhových úlohách se musí využívat pouze teoretickoempirických postupů určení α . Při výpočtu pravidelných koryt, u kterých se průtočná plocha buď vůbec, nebo téměř nemění, se často uvažuje $\alpha = 1,0$ až $1,1$. Podle výsledků měření je v nepravidelných korytech $\alpha \approx 1,3$ až $1,8$.

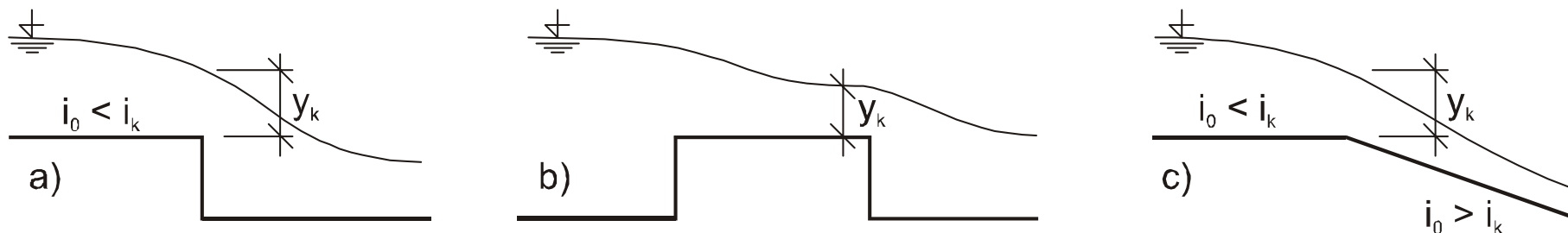
Někteří autoři se pokusili o vyjádření závislosti Coriolisova čísla α na rychlostním součiniteli C . Např. Morozov uvádí:

$$\alpha = 1,0 + 0,84 \left(\frac{3,7}{C^{0,25}} - 1 \right)^{1,8}$$

Podobnou závislost α na C uvádí Evreinov:

C	20	22	25	28	30	32	35	38	40	45	50
α	1,525	1,435	1,336	1,270	1,224	1,204	1,171	1,144	1,132	1,105	1,084
	<i>ohlast běžně používaných hodnot</i>							1,1			
C	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	>100
α	1,069	1,057	1,051	1,045	1,039	1,033	1,030	1,027	1,024	1,021	1,020
	1,05							1,0			

Výskyt kritické hloubky y_k v korytě



Vznik kritické hloubky

a) stupeň ve dně, b) přepad přes širokou korunu, c) přechod z říčního pohybu do bystřinného zlomem sklonu

V kritických průřezích není průtočnost ovlivněna, dokud spodní hladina nepřekročí y_k - pak teprve nastává b v případech na obr. zatopený přepad.

Způsoby určení režimu proudění v otevřeném korytě

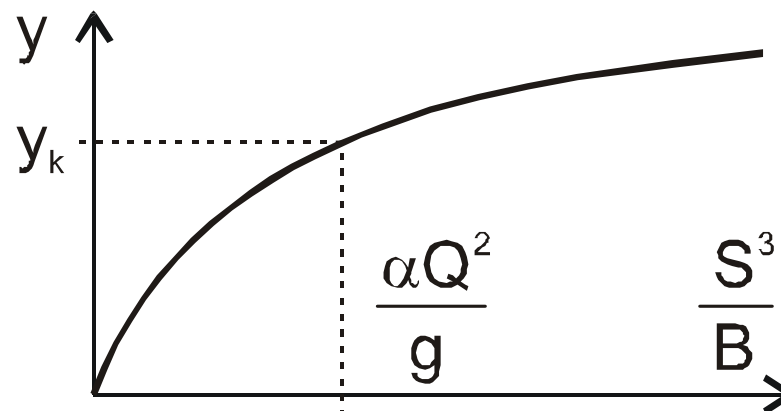
a) Porovnání hloubky rovnoměrného proudění y_0 s hloubkou kritickou y_k :

$y_0 > y_k$ - proudění je říční, $y_0 < y_k$ - proudění je bystřinné.

Určení kritické hloubky:

1) Výpočtem obecné podmínky kritického proudění - pro obdélníkový, trojúhelníkový a parabolický průřez: vyjádří se $S = f(y)$, $B = f(y)$ a řeší se $y = (y_k)$

2) Polografickou metodou - u průřezů, kde není možné řešit přímým výpočtem (především nepravidelné profily) se vynese funkce $y = f(S^3/B)$ a pro hodnotu $\alpha Q^2/g$ se najde odpovídající hodnota $y = y_k$.



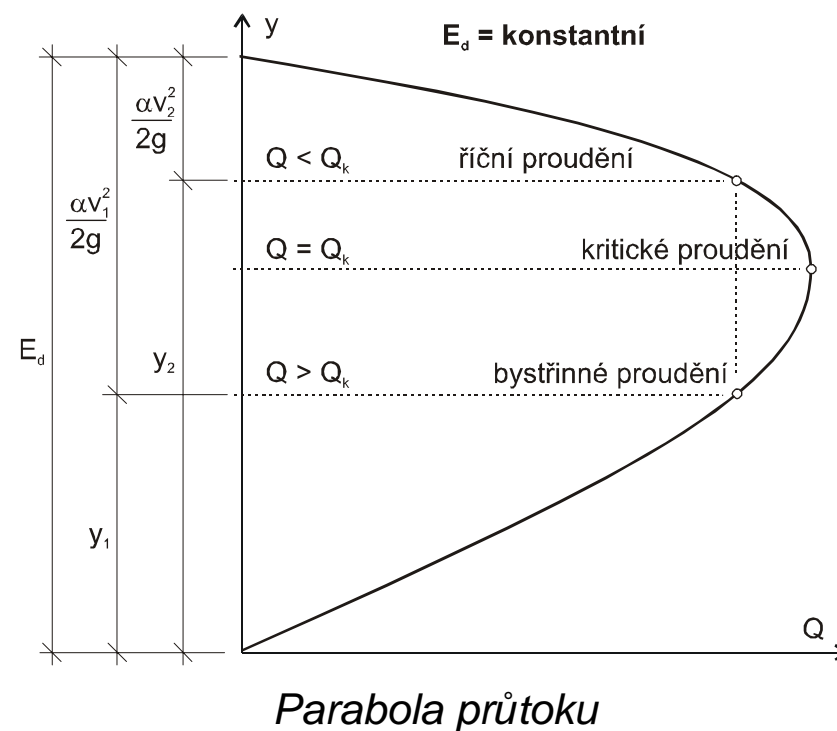
3) Vynesením průběhu funkce dané rovnicí

$$E_d = y + \frac{\alpha v^2}{2g} = y + \frac{\alpha Q^2}{2gS^2}$$

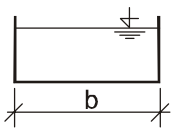
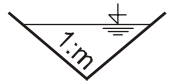
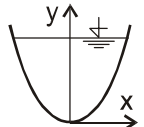
4) Parabolou průtoku.

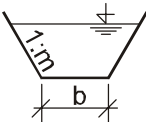
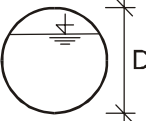
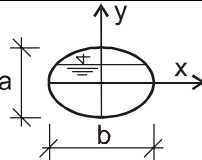
Parabola průtoku (Kochova křivka): kritické proudění lze vyjádřit též při stálé hodnotě měrné energie průřezu, tedy při $E_d = \text{konst.}$ Z rovnice pro měrnou energii dostaneme vztah pro Q :

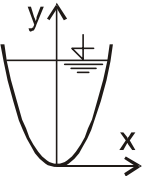
$$Q = S \sqrt{\frac{2g}{\alpha} (E_d - y)}$$



Vztahy pro určení kritické hloubky

Tvar koryta	$y_k =$	odkud	poznámka
	$\sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g b^2}}$		
	$\sqrt[5]{\frac{2\alpha Q^2}{g m^2}}$		<p>Při různých sklonech svahů m_1, m_2 se bere $m = \frac{m_1 + m_2}{2}$</p>
	$\sqrt[4]{0,84c \frac{\alpha Q^2}{g}}$		<p>Rovnice paraboly $y = cx^2$</p>

	$\left(1 - \frac{\sigma}{3} + 0,105\sigma^2\right)y_{\sigma k}$ $\text{kde } \sigma = \frac{my_{\sigma k}}{b}, y_{\sigma k} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}}$	Agroskin empirický	Pro širší lichoběžníkový průřez
	$0,81 \left(\frac{\alpha Q^2}{gm^{0,75} b^{1,25}} \right)^{0,27} - \frac{b}{30m}$	Straub empirický	Platnost: $0,1 < \frac{Q}{b^{2,5}} < 4,0$ Pro: $\frac{Q}{b^{2,5}} < 0,1$ Ize použít vztah pro obdélník
	$D \left(\frac{\alpha Q}{\sqrt{gD^5}} \right)^{0,513}$	Diskin empirický	Platnost: $0,05 \leq \frac{y_k}{D} \leq 0,85$
	$\frac{\sqrt{0,32Q}}{\sqrt[4]{D}}$	Abbot empirický	
	$0,84b^{0,22} \sqrt[4]{\frac{\alpha Q^2}{ga^2}}$	Straub empirický	$0,05 \leq \frac{y_k}{2b} \leq 0,85$

	$\left(\frac{a^3 c^{2a-2}}{4} \frac{\alpha Q^2}{g} \right)^{\frac{1}{2a+1}}$		Rovnice exponenciely: $y = cx^{\frac{1}{a-1}}$
---	---	--	---

b) Porovnání hodnoty Froudova čísla Fr s jeho mezní hodnotou pro kritické proudění.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gy_s}}$$

kde $y_s = S/B$ je střední hloubka průřezu

Při - kritickém proudění ($v = v_k$) je $Fr = 1$
- říčním proudění ($v < v_k$) je $Fr < 1$
- bystřinném proudění ($v > v_k$) je $Fr > 1$.

USTÁLENÉ PROUDĚNÍ V OTEVŘENÝCH KORYTECH

Rovnoměrné proudění

Charakteristika:

1. Hloubka vody v korytě, průtočná plocha a průřezová rychlost jsou v každém příčném řezu konstantní.
2. Čára energie, vodní hladina a dno koryta jsou rovnoběžné, takže $i_E = i = i_0$ kde i_E je sklon čáry energie, i je sklon hladiny a i_0 je sklon dna.

Rozdělení dle tvaru průtokového profilu:

1. prizmatické kanály – konst. geometrické vlastnosti po délce toku
2. neprizmatické kanály – proměnný tvar po délce, změny lze definovat jako fce S resp. O
3. přirozená koryta – nepravidelný tvar měnící se po délce toku

Dělení průřezů a koryt:

1. jednoduché (obdélník, trojúhelník, lichoběžník ...)
2. složené (kromě dna lze nalézt další vodorovnou část)
3. přirozené

Základní geometrické charakteristiky

1. rozměry průtokového profilu (šířka ve dně, sklon svahů, průměr atd.)
2. průtočná plocha ... S
3. omočený obvod ... O
4. hydraulický poloměr ... R
5. šířka v hladině ... B
6. podélný sklon ... I
7. hloubka ... y

Hydraulické charakteristiky

1. stupeň drsnosti ... n
2. rychlostní součinitel (Chezyho) ... C ($m^{1/2}.s^{-1}$)
3. střední průřezová rychlost ... v
4. průtok ... Q

Chézyho rovnice

$$V = C \sqrt{RI_0}$$

kde

v ... průřezová rychlost

C ... rychlostní součinitel ($m^{0,5}s^{-1}$)

R ... hydraulický poloměr (m)

Průtok se spočítá z rovnice spojitosti

$$Q = vS = CS\sqrt{RI_0} = K\sqrt{I_0}$$

kde

S ... průtočná plocha (m²),

K ... modul průtoku (m³s⁻¹).

Modul průtoku patří k základním hydraulickým charakteristikám koryta, neboť zahrnuje jak vliv tvaru a velikosti průtočné plochy, tak i drsnost omočeného obvodu.

Vztahy pro určení rychlostního součinitele C z Chézyho rovnice.

Manning (1889)	$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}$	platnost: $n > 0,011$ $0,3\text{m} < R < 5\text{m}$
Pavlovskij (1925)	$C = \frac{1}{n} R^P$ $P = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1)$	zjednodušené určení P: pro: $R < 1\text{m} \dots P \cong 1,5\sqrt{n}$ $R > 1\text{m} \dots P \cong 1,3\sqrt{n}$ $n > 0,025 \dots P \cong 1,6\sqrt{n}$

Agroskin (1955)	$C = 17,72 \left(\frac{0,05643}{n} + \log R \right)$	Pro R = 1 m platnost: $n > 0,009$
Martinec (1958)	$C = 17,72 \left(0,77 + \log \frac{R}{d_{50}} \right)$	odvozen z měření na českých řekách, ověřen pro: $0,15 < R < 2,25$ $0,004 \text{ m} < d_{50} < 0,25 \text{ m}$

Pro nepravidelné říční tratě Martinec doporučuje nahradit zrno d_{50} náhradní drsností $d_n = d_{50} + \Delta d$, kde $\Delta d = 0,0263 \cdot S_{\max}/S_{\min} - 0,322$. Hlavní vliv na změnu drsnosti je tedy přisuzován proměnlivosti průřezu. Mez použitelnosti byla stanovena poměrem $S_{\max}/S_{\min} = 2,1$.

Manningova rovnice

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I_0^{\frac{1}{2}}$$

kde

n ... Manningův drsnostní součinitel ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1/3}$).

V případě, že je omočený obvod složen z částí s různou drsností (např. různé typy opevnění), uvažuje se při výpočtu průměrná ekvivalentní drsnost, kterou je možné stanovit následujícími způsoby:

váženým průměrem:

$$n = \frac{\sum O_i n_i}{O}$$

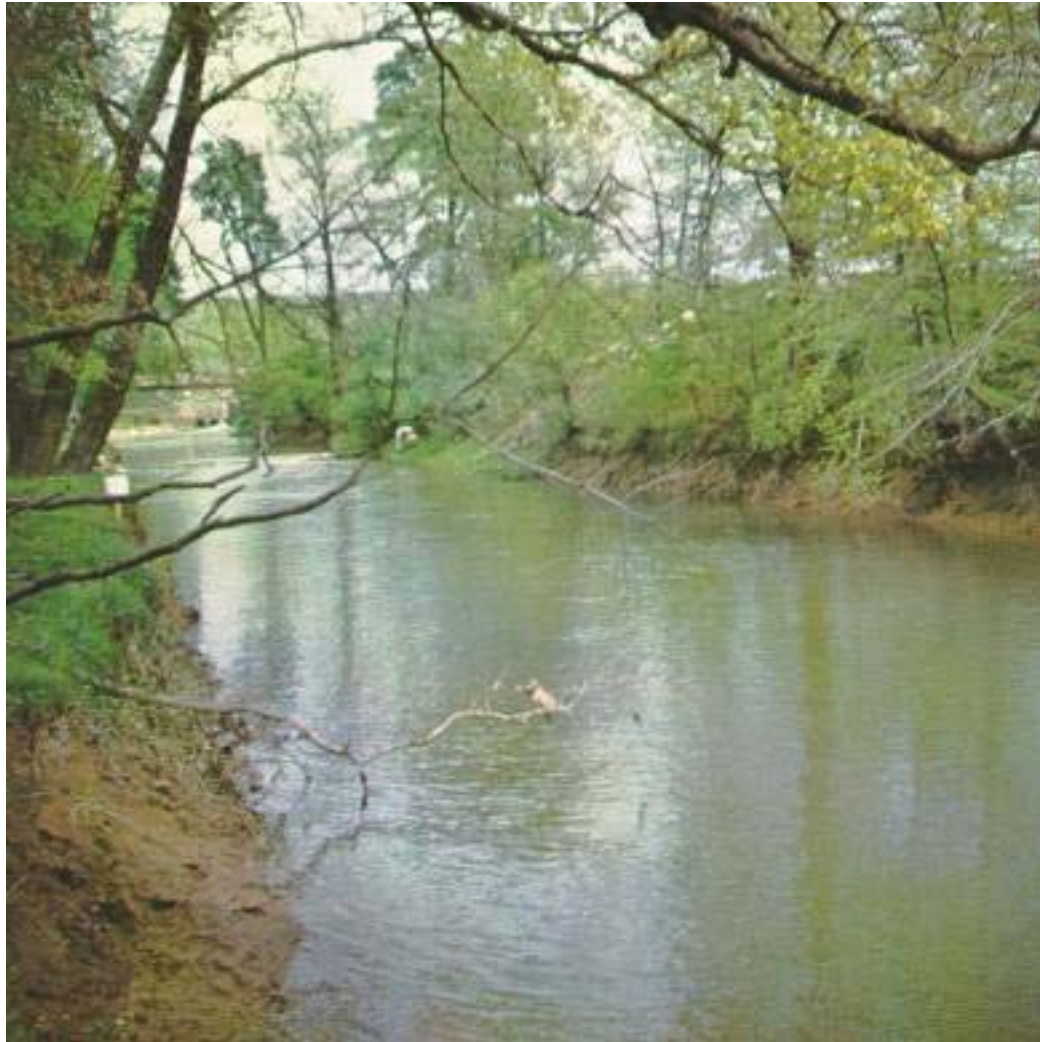
podle Pavlovského:

$$n = \left(\frac{\sum (O_i n_i^2)}{O} \right)^{\frac{1}{2}}$$

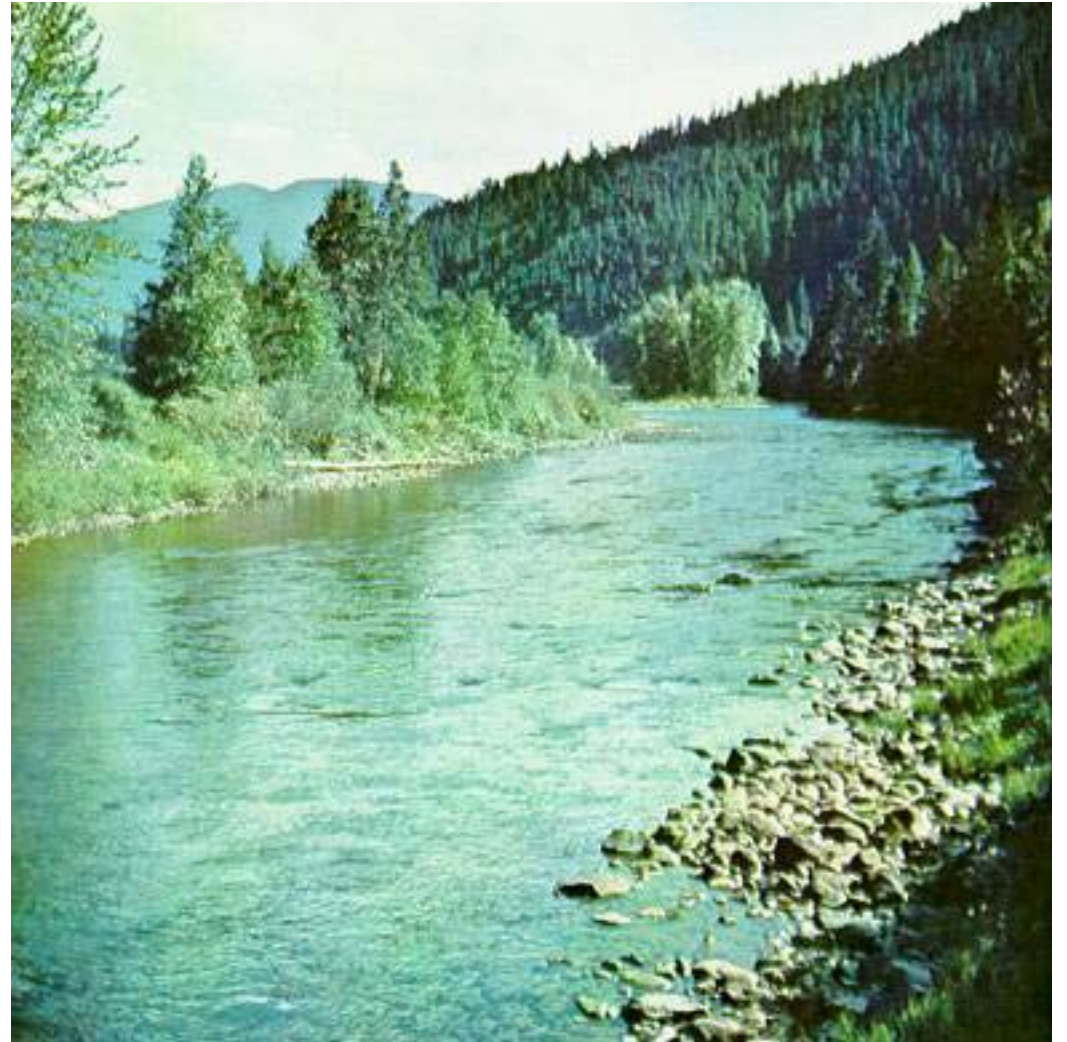
podle Hortona a Einsteina a Bankse:

$$n = \left(\frac{\sum O_i n_i^{\frac{3}{2}}}{O} \right)^{\frac{2}{3}}$$

kde i jsou dílčí omočené obvody s drsnostními součiniteli n_i .



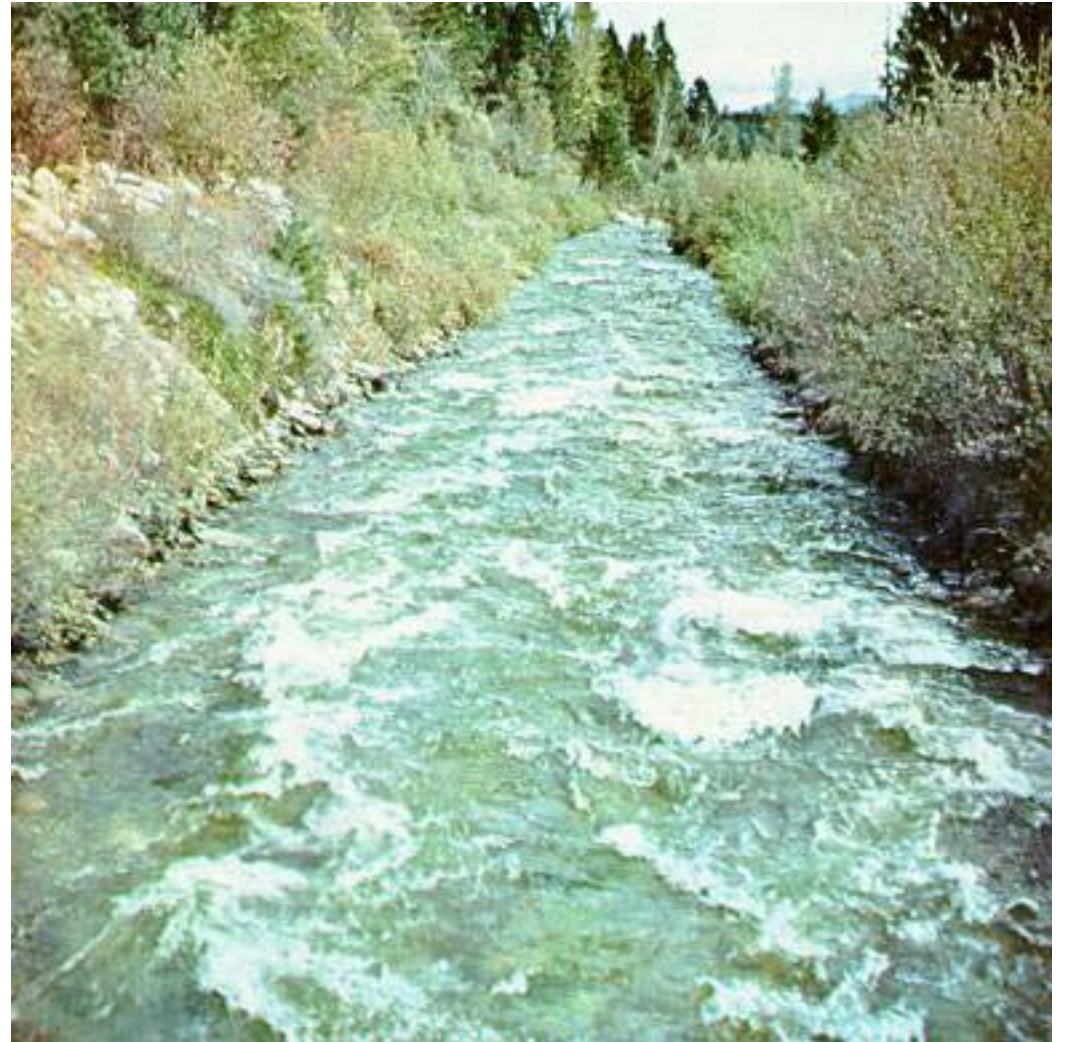
$n = 0,026$



$n = 0,038$



$n = 0,055$

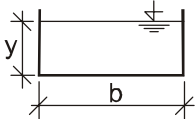
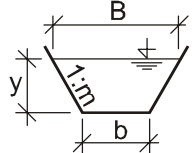
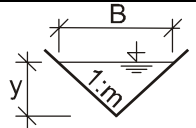
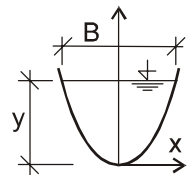
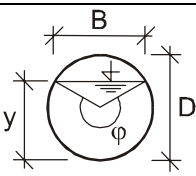


$n = 0,06$



$n = 0,075$

Geometrické charakteristiky příčného profilu koryta

Tvar koryta	Průtočná plocha S	Omočený obvod O	Hydraulický poloměr R	Šířka v hladině B	Střední hloubka průřezu y = S/B
	by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$	b	y
	$y(b + my)$	$b + 2y\sqrt{1+m^2}$	$\frac{(b + my)y}{b + 2y\sqrt{1+m^2}}$	$b + 2my$	$\frac{(b + my)y}{b + 2my}$
	my^2	$2y\sqrt{1+m^2}$	$\frac{my}{2\sqrt{1+m^2}}$	$2my$	$\frac{y}{2}$
	$\frac{2}{3}By$	$B + \frac{8}{3} \frac{y^2}{B}$ <i>přibližně pro</i> $0 < \frac{4y}{B} < 1(*)$	$\frac{2B^2y}{3B^2 + 8y^2}$	$\frac{3}{2} \frac{S}{y}$	$\frac{2}{3}y$
	$\frac{1}{8} \left(\frac{\pi\phi}{180} - \sin\phi \right) D^2$	$\frac{D}{2} \frac{\pi\phi}{180}$	$\frac{D}{4} \left(1 - \frac{\sin\phi}{\frac{\pi\phi}{180}} \right)$	$2\sqrt{y(D-y)}$	$\frac{1}{8} \frac{\left(\frac{\pi\phi}{180} - \sin\phi \right)}{\sin\frac{1}{2}\phi} D$
$*) \text{ Pro } \frac{4y}{B} > 1 \text{ je: } O = \frac{B}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{4y}{B} \right)^2} + \frac{B}{4y} \ln \left[\frac{4y}{B} + \sqrt{1 + \left(\frac{4y}{B} \right)^2} \right] \right)$					

Základní typy úloh při řešení rovnoměrného pohybu

1. **Zadáno:** rozměry koryta, drsnost, hloubka vody v korytě y_0 a sklon i_0
Počítá se: rychlost a průtok
2. **Zadáno:** rozměry koryta, drsnost, hloubka vody v korytě y_0 a průtok Q .
Počítá se: sklon i_0
3. **Zadáno:** rozměry koryta, drsnost, sklon dna koryta i_0 a průtok Q .
Počítá se: hloubka y_0
 - a) přibližováním (s využitím výpočetní techniky) - volba několika y_0 postup výpočtu Q je stejný jako pro typ 1.
 - b) sestrojením konzumční křivky $Q = f(y_0)$ a odečtením y_0 pro dané Q .
4. **Zadáno:** drsnost koryta, sklon dna koryta i_0 , hloubka y_0 sklon svahů koryta 1:m a průtok vody Q .
Počítá se: šířka dna koryta b :
 - a) obdoba postupu pro typ 3, ale s volbou několika b ,
 - b) sestrojením křivky $Q = f(b)$ a odečtením pro dané Q .
5. **Zadáno:** rozměry koryta, sklon dna koryta i_0 hloubka vody y_0 a průtok Q .
Počítá se: drsnost koryta:

Uzavřené průřezy s volnou hladinou

Nejčastější jsou průřezy kruhové, vyskytují se však i tvary vejčité, podkovovité apod. Používají se zejména v kanalizaci.

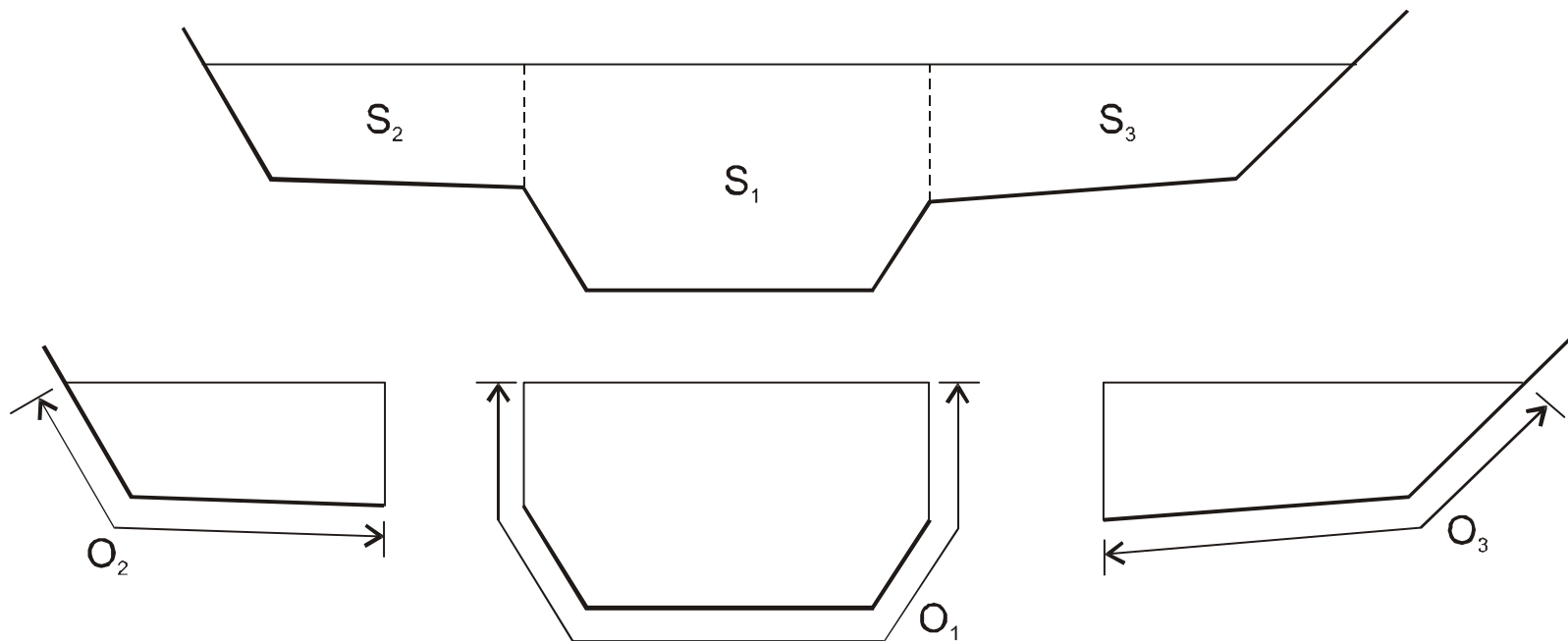
Řešení kruhového průřezu: Jednotlivé typy úloh se řeší podle základních typů úloh. Z tab. 7.1.6 s uvedenými hodnotami pro výpočet S, O a R v kruhovém profilu vyplývá, že při jejich dosazení do Manningovy, resp. Chézyho rovnice se získá výraz pro výpočet v kruhovém profilu ve tvaru:

$$Q = \frac{2}{n} \left(\frac{D}{4} \right)^{\frac{8}{3}} \frac{\left(\frac{\pi\varphi}{180} - \sin\varphi \right)^{\frac{5}{3}}}{\left(\frac{\pi\varphi}{180} \right)^{\frac{2}{3}}} i_o^{\frac{1}{2}}$$

kde úhel φ se dosazuje ve stupních.

Složené profily

Při výpočtu průtoku počítáme průtok Q_1 pro průtočnou plochu S_1 (nad kynetou), Q_2 , Q_3 pro průtočnou plochu S_2 , S_3 (nad bermami). Celkový průtok $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$, kde omočený obvod je uvažován podle schematu. Dělicím svislicím se zejména při malých hloubkách nad bermami nebo nad údolní nivou přisuzuje velmi často určitá drsnost ($n = 0,020$)



Schema pro výpočet průtoku korytem se složeným příčným řezem

Hydraulicky výhodný profil

Průtok vyjádřený s použitím Manningovy rovnice

$$Q = \frac{1}{n} S R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$$

ukazuje, že při stálém S , n , I závisí Q na $R = S/O$. Při daném S bude Q_{\max} při R_{\max} , tj. při O_{\min} . Ze všech průřezů má nejmenší obvod kruh, u otevřených koryt půlkruh. Podmínku minima O splňuje u obdélníků polovina čtverce, u lichoběžníků polovina pravidelného šestiúhelníka. Dají se použít jen výjimečně: jsou hluboké, pro stabilitu mají příkré stěny (s nutností extrémního opevnění).

Úloha se řeší spíše takto: hledá se hydraulicky výhodný průřez lichoběžníkový, který při potřebném sklonu svahů 1:m bude mít minimální O . Tvar průřezu charakterizuje poměr:

$$\beta_o = \frac{b}{y_o} = 2\left(\sqrt{1+m^2} - m\right)$$

Pro průtok

$$Q = \frac{1}{n} S R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$$

a po zavedení β_0 platí:

$$y_o = \left(\frac{Q}{A} \frac{n}{\sqrt{i}} \right)^{\frac{3}{8}} \quad b = \beta_o y$$

kde

$$A = \frac{\beta_o + m}{1,5874} \approx 0,63(\beta_o + m)$$

Vypočtené průtočné průřezy jsou poměrně hluboké: např. pro $m = 1,5$ je $y = 1,65$ m. Hydraulicky výhodné průřezy nemusí být vždy výhodné ekonomicky. Hydraulicky výhodné průřezy se mohou navrhnout v případě, když:

a) sklon i_0 je malý a při průtoku Q chceme docílit co možná největší rychlost v , jako ochranu před zanášením;

b) chceme-li pro průtok Q a potřebnou rychlost v navrhnout co nejmenší sklon i_0 (zájmy využití vodní energie, nebo při závlahách).

Rozborem hydraulicky výhodných průřezů lichoběžníkového tvaru dokázal Latyšěnkov, že lze jejich upotřebitelnost rozšířit. Zjistil, že i při malé změně $\beta_0 = b/y_0$ se v_{\max} jen málo zmenší. Sníží-li se rychlost na $0,97 v_{\max}$, zvětší se podstatně β_0 . Dostáváme tedy. průřezy širší, méně hluboké a střední rychlost se přitom podstatně neliší od nejvýhodnější hodnoty. Z Latyšěnkova rozboru vychází, že se o uvažovaná 3% (až 4%) zmenší průřezová rychlost proti rychlosti v hydraulicky výhodném průřezu, jestliže:

při sklonu svahů:	1 : 1	1 : 1,5	1 : 2	1 : 2,5	1 : 3
navrhne β_0 :	2,66	2,71	2,94	3,27	3,65

Posouzení odolnosti koryta

Při posouzení navrženého průřezu s ohledem na pohyb splavenin a z toho vyplývající stabilitu koryta či rovnováhu pohybu splavenin se zde naznačuje posouzení odolnosti dna koryta v přímém úseku vodního toku. Jde o metodu tečných napětí a metodu rychlostí.

1. Metoda tečných napětí

skutečné tečné napětí na dně:

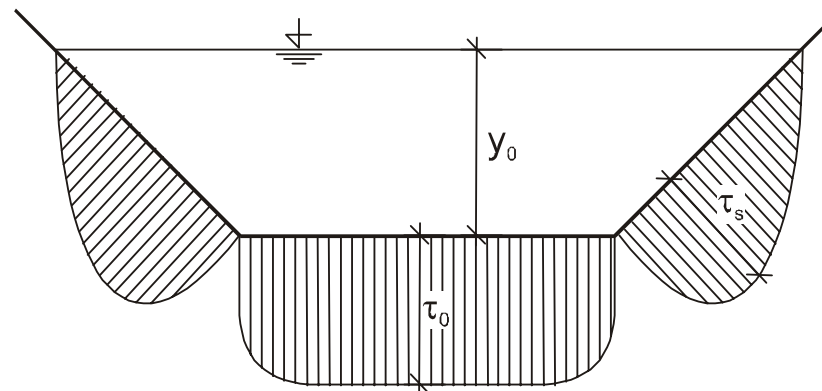
$$\tau_0 = \rho g y_0 i$$

kritické tečné napětí:

$$\tau_c = 760 d_e$$

Tečné napětí je po omočeném obvodu koryta rozloženo podle obr. Při posuzování dna koryta je dno stabilní, pokud

$$\tau_0 < \tau_c.$$



*Rozdělení tečných napětí
po omočeném obvodu koryta
(τ_s - tečné napětí na svazích koryta)*

2. Metoda rychlostí

Skutečná rychlost proudění vody v korytě je porovnávána s nevymílací rychlostí v_v a nezanášecí rychlostí v_n .

nevymílací rychlost:

$$v_v = 5,88 y_0^{\frac{1}{6}} d_e^{\frac{1}{3}}$$

nezanášecí rychlost:

$$v_n = 0,7 v_v$$

Pokud bude pro rychlost vody v platit

$$V_n < V < V_v$$

nedojde k vymílání dna, ani k jeho zanášení. Uvedené metody tečných napětí a rychlostí platí pro širší koryta, tj. pro $B/y_0 > 15$.

Pro určení t_c , v_v a v_n existují ještě další, podrobnější teoreticko-empirické výrazy a rovněž podrobnější metody zkoumání počátku pohybu splavenin. Někdy je možné se pro hrubou orientaci spokojit porovnáním průřezové rychlosti v korytě s hodnotou nevymílací rychlosti v tab. 7.1.6 a tab. 7.1.7.