

# Měření malých průtoků pomocí měrných přelivů

JAN HLOM, PAVEL BALVÍN

**Klíčová slova:** ostrohranné měrné přelivy – přepadový součinitel – měření malých průtoků – chyby měření

## SOUHRN

Příspěvek prezentuje výsledky hydraulického fyzikálního výzkumu měrných přelivů pro měření malých, resp. minimálních průtoků. Výzkum se zaměřil na určení součinitelů přepadu pro nízké přepadové výšky. V příspěvku jsou uvedeny výsledky měření pro trojúhelníkový, obdélníkový a kruhový ostrohranný přeliv. Naměřená data jsou porovnávána se vztahy podle jednotlivých autorů a je určena vhodnost jejich použití pro oblast nízkých přepadových výšek. V rámci měření byly také provedeny pokusy s polokruhovou přelivnou hranou. Při laboratorním testování byly zkoumány rozdílné umístění přelivu vůči proudu a jejich vliv na výsledky měření.



Obr. 1. Měrný přeliv osazený v terénu

Fig. 1. Measuring weir situated in the stream

## ÚVOD

Pro kontinuální měření minimálních průtoků na malých vodních tocích lze použít měrné přelivy, které dokážou s velkou přesností měřit široký rozsah průtoků (obr. 1). Vlastní měření je realizováno nepřímo pomocí měření polohy hladiny nad měrným přelivem (pomocí tlakové sondy či ultrazvukového hladinoměru) a znalosti vztahu mezi výškou přepadového paprsku a odpovídající hodnotě průtoku. Vzhledem k častým suchým periodám a ke stále většímu tlaku na monitoring minimálních zůstatkových průtoků je přesnost měření minimálních průtoků na malých vodních tocích aktuálním tématem. Minimální či malý průtok lze pro námi zkoumanou oblast definovat v rozsahu jednotek litrů za vteřinu.

Při měření malých, resp. minimálních průtoků ovšem nastává celá řada obtíží a problémů. Nízké průtoky přepadají přes přeliv s malou přepadovou výškou, při které již není hodnota součinitele přepadu v rozsahu platnosti používaných vzorců. Dále dochází k problémům se zanášením přelivů plávkami, které může do značné míry zkraslit měřené průtoky.

## Seznam značek a symbolů

b	šířka přelivu [m]
B	šířka koryta před přelivem [m]
D	průměr [m]
g	gravitační zrychlení [m/s <sup>2</sup> ]
h	výška [m]
L	délka [m]
m	přepadový součinitel [-]
q	průtok při průměru kruhu 1 dm [m <sup>3</sup> /s]
Q	průtok [m <sup>3</sup> /s]
R	chyba [%]
r	poloměr přelivné hrany
s	výška vzdutí k přelivné hraně [m]
S	plocha [m <sup>2</sup> ]
t	tloušťka přelivu
$\mu$	součinitel přepadu [-]
$\xi$	součinitel zúžení [-]

## Indexy

e	efektivní
kh	kruhová hrana
max	maximální
měř	měřené
oh	ostrá hrana
p	přepadová
rel	relativní
rov	vypočítané z rovnice
t	těžiště
u	umístění
v	výtok

V rámci laboratorního testování byly ověřovány hodnoty přepadového součinitele pro různé ostrohranné měrné přelivy a pro nízké přepadové výšky. Naměřená data byla porovnána s hodnotami podle rozličných autorů a byla ověřena vhodnost jejich použití pro nízké přepadové výšky. Dále byla testována kruhová přelivná hrana a její vliv na kapacitu a chování přepadového paprsku. V rámci laboratorního testování byly zkoumány rozdílné umístění přelivu vůči proudu. Měrné přelivy byly vyrobeny metodou 3D tisku, která zajišťovala variabilitu a přesnost při výrobě různých tvarů přelivů.

## METODIKA EXPERIMENTŮ

Veškeré laboratorní experimenty probíhaly v malé vodohospodářské hale Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka, v. v. i., v pevném hydraulickém žlabu šířky 500 mm. Dodávka vody byla zajištěna pomocí čerpací stanice, která čerpala vodu z dolní nádrže do vysoko položené nádrže, jež zajišťovala stálou tlačnou výšku pomocí přelivu s dlouhou přelivnou hranou. Z této nádrže byla potrubím přivedena voda do žlabu. Průtok byl nastaven na základě velikosti otevření šoupěte na přírodním potrubí. Před vlastním vtokem do



Obr. 2. Umístění přelivu ve žlabu

Fig. 2. Measuring weir situated in the laboratory flume

žlabu byl instalován Thomsonův měrný přeliv. Voda na konci žlabu byla odvedena odpadním potrubím do dolní nádrže.

Testovaný měrný přeliv byl při každém měření umístěn ve středu žlabu ve výšce 40 cm nade dnem žlabu (obr. 2). Testovaný přeliv byl umístěn cca 3,5 metru od nátoky do žlabu. Na nátoky do žlabu byl umístěn tlumič přitékající vody, který zajišťoval její uklidnění a rovnoměrný nátok do žlabu. Tlumič byl tvořen dvěma ocelovými rošty, mezi nimiž bylo umístěno kamenivo. Testované přelivy měly šířku 10–30 cm a výšku 5–15 cm. Rozsah měřených průtoků byl od 0,2 l/s do 20 l/s.

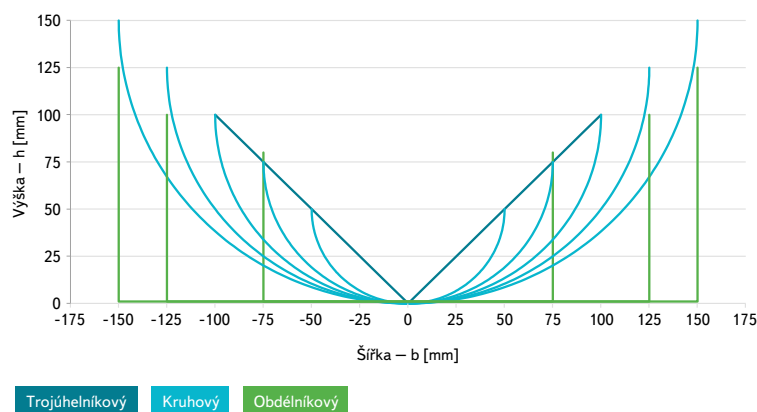
Typický průběh pokusu lze charakterizovat následovně, ve žlabu je nainstalovaný příslušný měrný přeliv (není ovlivněn dolní vodou), na Thomsonově přelivu je nastaven požadovaný průtok a poloha hladiny před měrným přelivem se nemění (stav je ustálený). V této chvíli je možné odečíst polohu hladiny před měrným přelivem pomocí hrotových měřítok. První hrotové měřítko je umístěno ve skleněném válci spojeném dnovým odběrem se žlabem, dnový odběr se nachází 45 cm před měrným přelivem, tj. vzdálenost  $3 \cdot h_{p,max}$  protiproudě před měrným přelivem. Druhé hrotové měřítko měří výšku hladiny ve stejném místě a je umístěné na posuvném nosníku na vrcholu žlabu.

Průtoky do cca 7 l/s byly měřeny pomocí kalibrované měrné nádoby. Měrná nádoba měla tvar kvádrů o rozměrech 0,4 m × 0,5 m × 0,3 m, hladina v nádobě byla měřena pomocí osazeného hrotového měřítka. Měrná nádoba byla opatřena koly, takže s ní bylo možné jednoduše a rychle manipulovat. Měření průtoky probíhalo následovně – pod přepadový paprsek pod měrným přelivem byla nasunuta měrná nádoba, v tento okamžik bylo započato měření času pomocí stopek, jakmile došlo k naplnění měrné nádoby, došlo k odsunutí měrné nádoby a zastavení stopek, tento postup byl obvykle dvakrát opakován pro každý pokus. Typická doba odběru byla 120–7 s. Nejistotu měření průtoky lze odhadnout pomocí uměle zavedené chyby měření času o velikosti 0,2 s. V mezním případě, kdy je průtok roven cca 7 l/s, je doba plnění měrné nádoby 71 s, pokud zavedeme umělou chybu  $\pm 0,2$  s, změní se hodnota měřeného průtoky o  $\pm 3$  %. Pro nízké průtoky s dlouhou dobou odběru je velikost chyby v řádech desetin procenta. Průtoky větší než 7 l/s byly měřeny pomocí kalibrovaného měrného Thomsonova přelivu umístěného před vtokem do žlabu. Lze předpokládat obdobnou přesnost měření průtoky jako pomocí měrné nádoby.

## OSTROHRANNÉ MĚRNÉ PŘELIVY

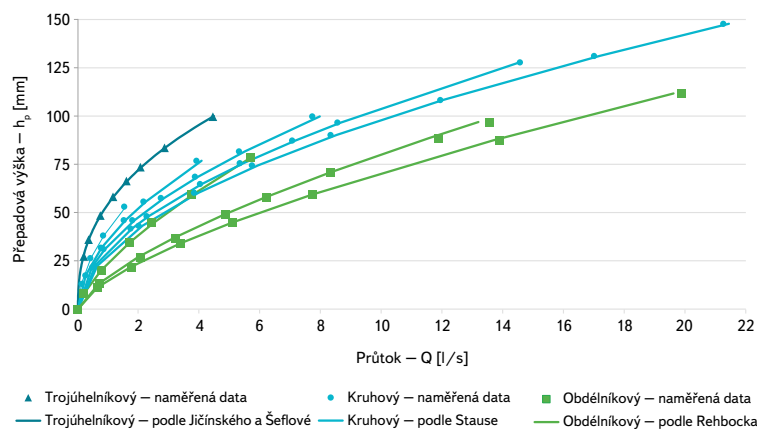
V rámci laboratorního měření byly testovány tři ostrohranné přelivy pro měření malých průtoků (trojúhelníkový, obdélníkový a kruhový přeliv). Přelivná hrana testovaných přelivů byla konstruována následovně – šířka přelivné hrany byla 1 mm a poté byla zkosena pod úhlem  $45^\circ$  pro zajištění volného přepadového paprsku. Provedení přelivné hrany je ve shodě s normou ČSN ISO 1438 [1]. Testované geometrie přelivů a naměřené konsumční křivky jsou zobrazeny na obr. 3 a 4. Naměřené hodnoty byly konfrontovány s hodnoty predikovanými jednotlivými vzorci a dále bylo zkoumáno chování jednotlivých přelivů při minimálních přepadových výškách.

Pro každý měrný přeliv byla určena hodnota přepadové výšky, pod kterou již dochází k „přilnutí“ přepadového paprsku na vlastní konstrukci měrného přelivu. Tato výška představuje limitní minimální výšku pro vlastní měření průtoky pomocí měrného přelivu. U obdélníkového přelivu dochází k přilnutí při výšce přepadového paprsku cca 10 mm, u trojúhelníkového přelivu při výšce cca 15 mm a u kruhového přelivu při výšce cca 20 mm.



Obr. 3. Rozměry testovaných měrných přelivů

Fig. 3. Tested weir dimensions

Obr. 4. Konsumční křivky ostrohranných přelivů z obr. 3 proloženy vztahy vybraných autorů  
Fig. 4. Sharp-crest weir discharge curves from fig. 3 with formulas from selected authors

## TROJÚHELNÍKOVÝ PŘELIV (THOMSONŮV)

Trojúhelníkový přeliv s vrcholovým úhlem o velikosti  $90^\circ$ , též nazýván „Thomsonův“ přeliv, je vhodný na lokality s velkým rozsahem měřených průtoků. Trojúhelníkový přeliv dokáže přesně měřit malé i velké průtoky, jeho nevýhodou je snadné zanesení průtočného profilu při minimálních přepadových

výškách. Průtok trojúhelníkovým rovnoramenným přelivem lze obecně vypočítat následovně [2]:

$$Q = \frac{8}{15} \cdot \mu \sqrt{2 \cdot g} \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot h_p^{2,5} \quad [m^3 / s] \quad (1)$$

Pro trojúhelníkový pravouhlý přeliv bývá nejčastěji udávána Thomsonova rovnice [3]:

$$Q = 1,4 \cdot h_p^{2,5} \quad [m^3 / s] \quad (2)$$

pro  $0,06 \text{ m} < h < 0,65 \text{ m}$

Havlík [4] pro tento vztah udává meze platnosti  $0,05 \text{ m} < h < 0,18 \text{ m}$  a zároveň  $B/h \geq 8$  a  $s/h \geq 3$ .

Dále je také uváděna rovnice podle Kinga [5]:

$$Q = 1,343 \cdot h_p^{2,47} \quad [m^3 / s] \quad (3)$$

pro  $0,05 \text{ m} < h < 0,55 \text{ m}$

Jičínský a Šeflová [2] navrhli na základě porovnání řady vztahů vztah pro výpočet:

$$\mu = 0,5684 \cdot h_p^{-0,023} \quad [-] \quad (4)$$

pro  $0,05 \text{ m} < h < 0,65 \text{ m}$  a  $s \geq 3h$   $B \geq 8h$

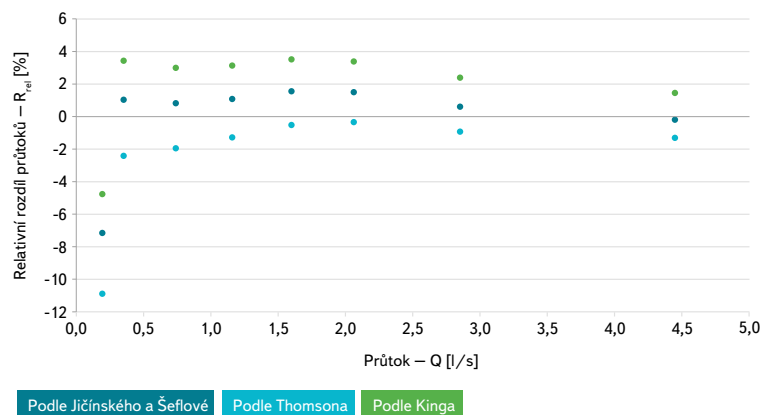
Porovnání výsledků měření na trojúhelníkovém přelivu s vrcholovým úhlem  $90^\circ$  s hodnotami stanovenými podle výše uvedených vzorců je zobrazeno na obr. 5. Porovnání je provedeno pomocí  $R_{rel}$  – relativního rozdílu měřeného průtoku a hodnotou průtoku stanoveného podle výše uvedených rovnic. Z porovnání je patrné, že největších relativních rozdílů je dosahováno při malých průtocích, resp. malých přepadových výškách. Při vyšších průtocích jsou již chyby zanedbatelné, neboť se již výška přepadového paprsku dostává do platných hodnot použitelnosti vzorců pro výpočet přepadového součinitele.

$$R_{rel} = \frac{Q_{rov} - Q_{měř}}{Q_{měř}} \cdot 100 \% \quad [%] \quad (5)$$

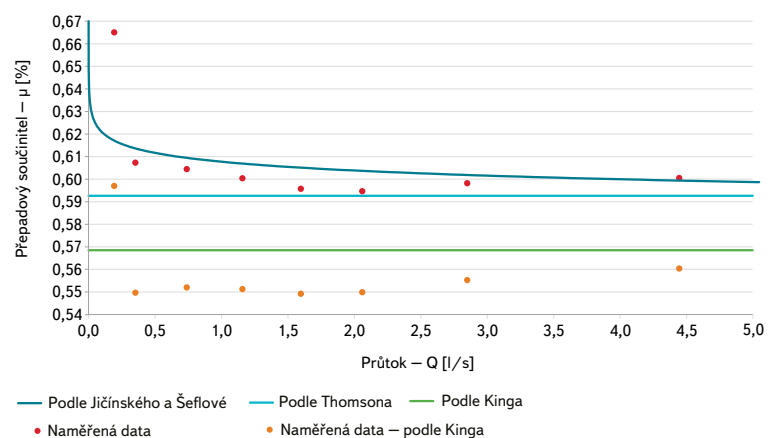
Porovnání naměřených součinitelů přepadu a hodnot součinitelů přepadu vypočtených z výše uvedených vztahů je zobrazeno na obr. 6. Pro trojúhelníkový přeliv a malé přepadové výšky se jeví jako optimální použití rovnice podle Jičínského a Šeflové (4) nebo podle Thomsona (2). Naopak podle měření nelze doporučit vztah podle Kinga (3).

## OBDELNÍKOVÝ PŘELIV

V rámci pokusů byly použity obdélníkové přelivy s kontrakcí, šířky přelivů byly 15–30 cm a výšky 8–12,5 cm. Obdélníkové přelivy lze s výhodou použít na vodní toky, jelikož mají dostatečnou kapacitu a nezpůsobí příliš velké vzdutí hladiny před měrným přelivem. Pro výpočet průtoku lze použít rovnici přepadu:



Obr. 5. Porovnání relativních rozdílů průtoků pro trojúhelníkový ostrohanný měrný přeliv  
Fig. 5. Relative flow errors comparison of triangle sharp-crested weir



Obr. 6. Porovnání přepadových součinitelů pro trojúhelníkový přeliv  
Fig. 6. Comparison of the overfall weir coefficients (triangle weir)

$$Q = m \cdot b_e \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_p^{1,5} \quad [m^3 / s], \quad (6)$$

$$\text{kde } m = \frac{2}{3} \cdot \mu, \quad b_e = b - 0,1 \cdot \sum \xi \cdot h$$

Porovnání výsledků měření na obdélníkových přelivech s hodnotami stanovenými podle výše uvedených vzorců je zobrazeno na obr. 7 a 8. Porovnání je provedeno pomocí  $R_{rel}$  (5). Z grafu je patrná poměrně dobrá shoda se vztahem podle Rehbocka (9), vztah podle Zschiedricha (8) naopak nelze doporučit. Často uváděný Héglyho vztah (7) dosahuje relativních rozdílů  $R_{rel}$  desítek až stovek procent a nelze ho pro nízké přepadové výšky doporučit. Porovnání naměřených součinitelů přepadu a hodnot součinitelů přepadu vypočtených z výše uvedených vztahů je zobrazeno na obr. 8. Z porovnání jsou patrné výše uvedené závěry o vhodnosti použití vztahů podle jednotlivých autorů.

## KRUHOVÝ PŘELIV

V rámci pokusů byly použity kruhové přelivy o poloměru 10 až 30 cm. Kruhové přelivy představují kompromis mezi trojúhelníkovým a obdélníkovým přelivem, dávají poměrně přesné hodnoty průtoku i při malých přepadových výškách a zároveň mají poměrně velkou maximální kapacitu v porovnání se stejně

Hodnota součinitele zúžení  $\xi$  byla uvažována 1. Součinitel přepadu  $m$  lze určit podle Héglyho vztahu [6]:

$$m = \left[ 0,405 + \frac{0,027}{h_p} - 0,030 \cdot \left( 1 - \frac{b}{B} \right) \right] \cdot \left[ 1 + 0,55 \cdot \left( \frac{b}{B} \right)^2 \cdot \left( \frac{h_p}{h_p + s} \right)^2 \right] \quad [-] \quad (7)$$

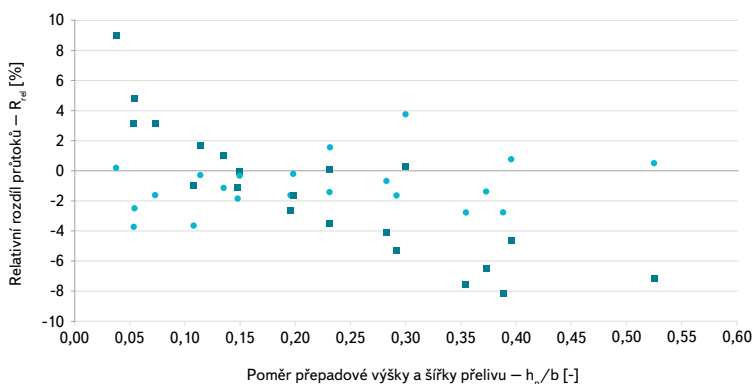
s platností  $s \geq 0,3$  m,  $b/s \leq 1$ ,  $(B/b) \cdot 0,025 \leq h \leq 0,8$  m

Součinitel přepadu lze dále určit například pomocí vztahu podle Zschiedricha [2]:

$$m = \left[ 0,392 + \frac{0,0018}{h_p + 0,02} - \frac{0,0036}{b + 2 \cdot h_p} \cdot \left( 1 - \frac{b}{B} \right) \right] \cdot \left[ 1 + 0,5 \cdot \left( \frac{b}{B} \right)^3 \cdot \left( \frac{h_p}{h_p + s} \right)^2 \right] \quad [-] \quad (8)$$

Případně lze určit přepadový součinitel  $\mu$  podle Rehbocka [7]:

$$\mu = 0,611 + 0,08 \cdot \frac{h_p}{b} + \frac{h_p}{1000} \quad [-] \quad (9)$$



Podle Zschiedricha    Podle Rehbocka

Obr. 7. Porovnání relativních rozdílů průtoků pro obdélníkový ostrohanný měrný přeliv  
Fig. 7. Relative flow errors comparison of rectangular sharp-crested weir

vysokým trojúhelníkovým přelivem. Pro výpočet průtoku kruhovým přelivem lze použít vztah odvozený Stausem [8]:

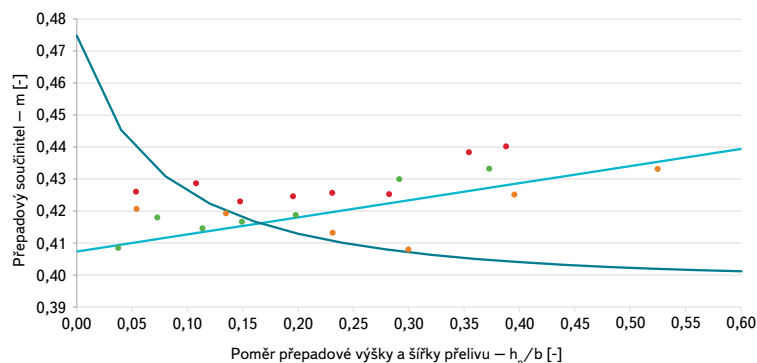
$$Q = \mu \cdot q \cdot D^{2,5} \quad [m^3 / s] \quad (10)$$

0,2 m < D < 0,3 m

$$\text{kde } \mu = 0,555 + \frac{D}{110 \cdot h_p} + 0,041 \cdot \frac{h_p}{D} \quad [-] \quad (11)$$

kde  $q$  je průtok při průměru kruhu 1 dm v závislosti na poměru  $h_p/D$ .

Porovnání výsledků měření na kruhových přelivech s hodnotami stanovenými podle výše uvedeného vzorce je zobrazeno na obr. 9 a 11. Na obr. 9 je zobrazeno porovnání relativních rozdílů průtoků  $R_{rel}$  (5) se vztahem podle Stause. Z grafu je patrné, že pro nízké hodnoty přepadových výšek je relativní rozdíl



Naměřená data – b = 15 cm    Naměřená data – b = 25 cm    Naměřená data – b = 30 cm

Podle Zschiedricha    Podle Rehbocka

Obr. 8. Porovnání přepadových součinitelů pro obdélníkový přeliv  
Fig. 8. Comparison of the overflow weir coefficients (rectangular weir)

největší – cca 4 % a poté se plynule snižuje na cca 2 %. Porovnání naměřených přepadových součinitelů je zobrazeno na obr. 11, naměřené součinitele se liší od hodnot určených vztahem (11). Naměřená data byla proložena následující funkcí (byla vyřazena data, kdy byl průtok větší než 7 l/s, tj. stavy, kdy průtok nebyl měřen kalibrovanou nádobou):

$$\text{kde } \mu = 0,565 + 0,0042 \cdot \frac{D}{h_p} + 0,0055 \cdot \frac{h_p}{D} \quad [-] \quad (12)$$

Vztah je ověřen pro přelivy o průměru 10 až 30 cm s ostrou hranou definovanou na začátku kapitoly a minimální přepadovou výškou 2 cm.

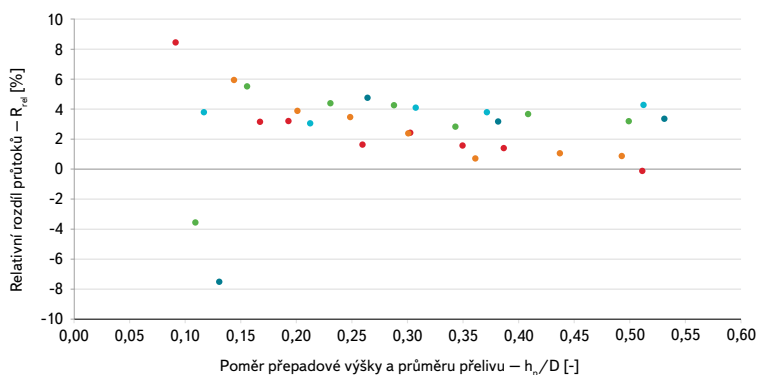
Na obr. 10 je zobrazen vliv uměle zanesené chyby při měření průtoků kalibrovanou měrnou nádobou definovanou výše v kapitole metodika experimentů. Pro přeliv o průměru 20 cm byly změněny doby plnění měrné nádoby o  $\pm 0,2$  s a následně byly určeny tomu odpovídající průtoky a přepadové součinitele.

Chyby při měření průtoků mohou zásadně ovlivňovat výsledky měření až při průtoku vyšším než cca 7 l/s, velikost této chyby byla redukována opakovaným měření průtoku kalibrovanou nádobou.

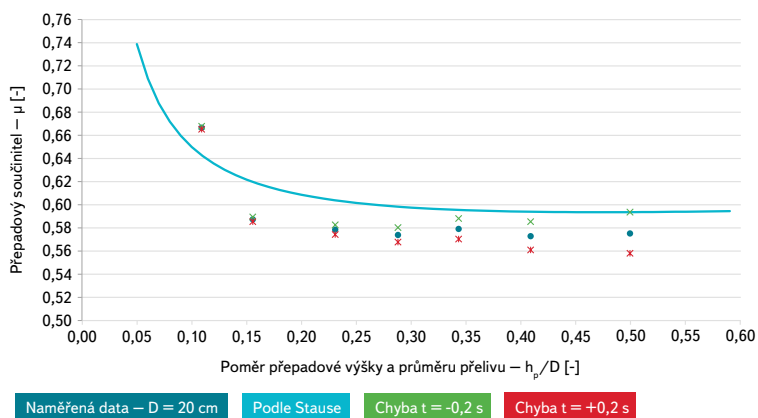
## MĚRNÉ PŘELIVY S KRUHOVOU PŘELIVNOU HRANOU

Velkým problémem, který nastává zejména v podzimních měsících, je ulpívání listů na přelivné hraně měrných přelivů. Polokruhová přelivná hrana je lépe, vůči ostré hraně, hydraulicky tvarovaná a listy by na ní nemusely ulpívat v takové míře a zkreslovat naměřená data. V rámci výzkumu byly proto testovány měrné přelivy s kruhovou přelivnou hranou (obdélníkový ( $b = 15 \text{ cm}$  a  $h = 8 \text{ cm}$ ) a kruhový ( $D = 20 \text{ cm}$ )). Přelivná hrana byla tvořena půlkruhem o poloměru 2,5 mm, tj. tloušťka konstrukce přelivu byla celkem 5 mm, na vrcholu této konstrukce byla umístěna polokruhová přelivná hrana o poloměru 2,5 mm.

Porovnání naměřených konsumčních křivek je zobrazeno na obr. 12. Z grafu je patrná větší kapacita měrného přelivu s polokruhovou hranou oproti ostré přelivné hraně. Zároveň je zde uveden vztah podle Gonga a kol. [9], kteří se zabývali měrnými obdélníkovými přelivy s polokruhovou přelivnou hranou.

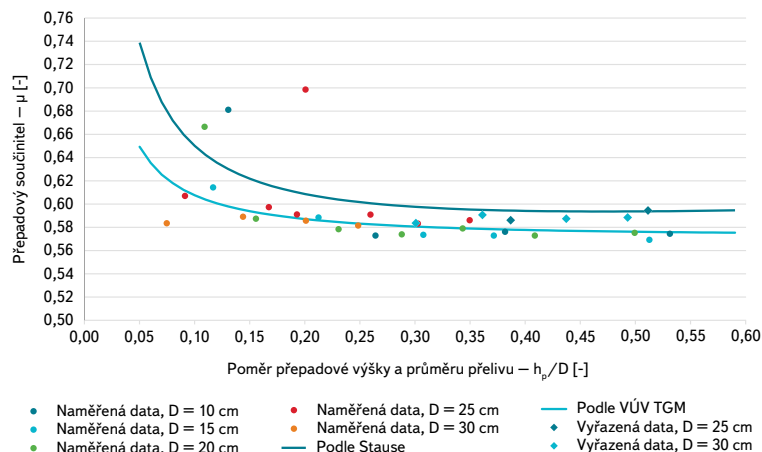


Obr. 9. Porovnání relativních rozdílů průtoků pro kruhový ostrohranný měrný přeliv  
Fig. 9. Relative flow errors comparison of circular sharp-crested weir



Obr. 10. Závislost hodnoty přepadového součinitele na přesnosti měření průtoku  
Fig. 10. Dependency of the overfall weir coefficients on the flow measuring

Gong a kol. prováděli měření na větších obdélníkových přelivech než jsou naše naměřená data, proto si nejspíše neodpovídají naměřená data s jejich odvozeným vztahem [9]:



Obr. 11. Porovnání přepadových součinitelů pro kruhový přeliv  
Fig. 11. Comparison of the overfall weir coefficients (circular weir)

$$m = \frac{2}{3} \cdot \left( 0,05 \cdot \frac{r}{t \cdot 0,5} + 0,645 \right) \cdot \left( \frac{h_p}{s} \right)^{-0,075 \cdot \frac{r}{t \cdot 0,5} + 0,0055} \quad [-] \quad (13)$$

V rámci pokusů byly také určeny přepadové výšky, při nichž již dochází k přilnutí paprsku na konstrukci přelivu a jeho neodtržení od přelivné hrany. Pro obdélníkový přeliv je to cca 20 mm a pro kruhový přeliv cca 30 mm. Porovnání naměřených dat pro kruhovou hranu s ostrou přelivnou hranou pomocí relativních rozdílů velikosti průtoků je zobrazeno na obr. 13. Z grafu je patrné, že kruhová přelivná hrana je o cca 10 % kapacitnější než ostrá hrana. Porovnání je provedeno pomocí  $R_{rel,KH}$ :

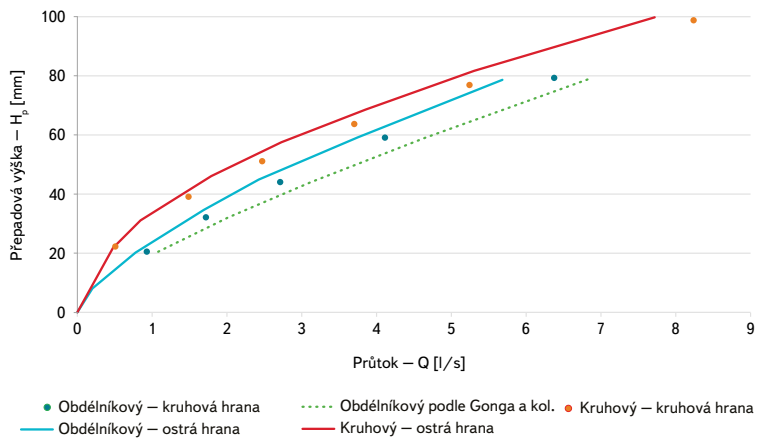
$$R_{rel,KH} = \frac{Q_{KH} - Q_{OH}}{Q_{OH}} \cdot 100 \% \quad [%] \quad (14)$$

Porovnání naměřených součinitelů přepadu pro kruhovou a ostrou přelivnou hranu je zobrazeno na obr. 14.

## UMÍSTĚNÍ MĚRNÉHO PŘELIVU VŮČI SMĚRU NATÉKAJÍCÍHO PROUDU

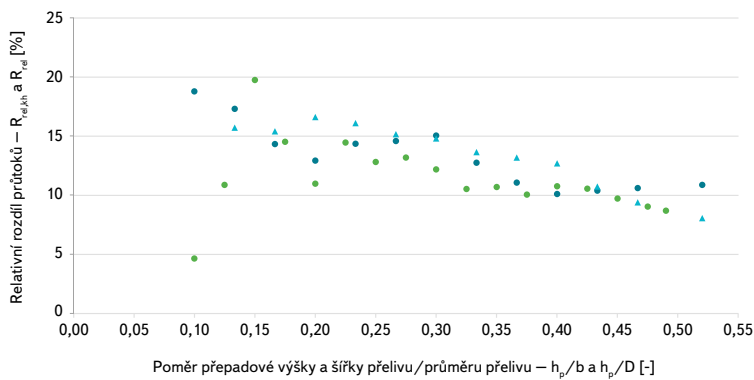
V rámci pokusů prováděných ve žlabu byly také realizovány pokusy se záměrně „chybně“ umístěnými přelivy. Jako správně geometricky instalovaný přeliv lze definovat takový, který je svislý a půdorysně kolmý na osu koryta. Na vodním toku může dojít ke změně geometrie usazení přelivu například při vlastní chybné instalaci přelivu. Celkem byly testovány tři varianty změněného umístění přelivu (viz obr. 15) – vertikální náklon 1 a 2 (po a proti proudu, vlastní přeliv byl vůči svislému přelivu nakloněn o  $\pm 10^\circ$ ) a horizontální náklon 3 (tj. přeliv nebyl kolmo vůči ose koryta, úhel mezi osou toku a přelivem byl  $65^\circ$ ). Pokusy byly uskutečněny na obdélníkovém přelivu šířky 15 cm a výšky 8 cm. Výsledky této citlivostní analýzy jsou zobrazeny na obr. 16 pomocí relativní chyby  $R_{rel,u'}$  kde  $Q_{kolmý}$  je roven průtoku přes geometricky správně usazený přeliv a  $Q_{upravený}$  je rovný průtoku přes geometricky „chybně“ umístěný přeliv:





Obr. 12. Porovnání konsumčních křivek ostrohranné a kruhové přelivné hrany obdélníkového a kruhového přelivu

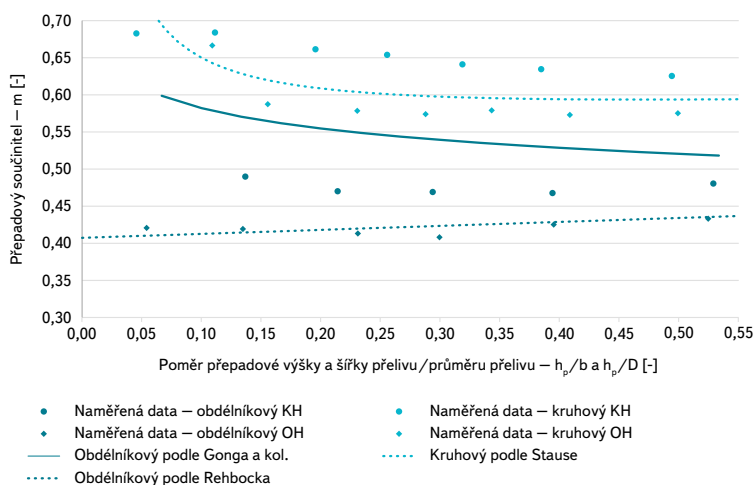
Fig. 12. Comparison of the sharp and semi-circle crest weir discharge curves (circle and rectangular weir)



$R_{rel,kh}$  – obdélníkový     $R_{rel}$  – podle Gonga a kol.     $R_{rel,kh}$  – kruhový

Obr. 13. Porovnání relativních rozdílů průtoků ostrohranných a kruhových hran měrných přelivů

Fig. 13. Comparison of the discharge's relative differences of sharp and semi-circle crests weirs



Obr. 14. Porovnání přepadových součinitelů pro kruhový a obdélníkový přeliv s ostrohrannou nebo kruhovou přelivnou hranou

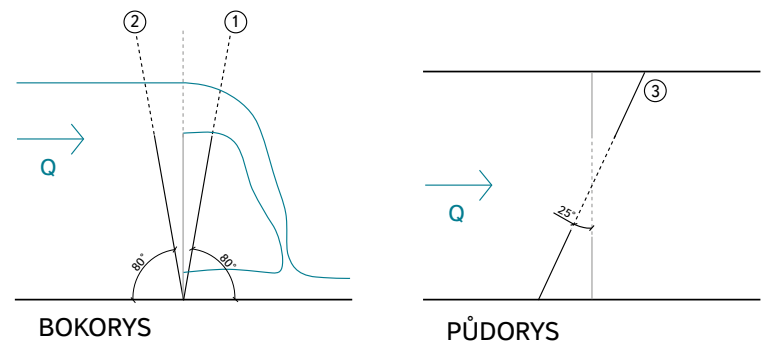
Fig. 14. Comparison of the semi-circle and rectangular overfall weir coefficients with sharp and semi-circle crest

$$R_{rel,u} = \frac{Q_{upravený} - Q_{kolmý}}{Q_{kolmý}} \cdot 100 \% \quad [ \% ] \quad (15)$$

Z výsledků je patrné, že vertikální náklon po proudu způsobí chybu cca + 1,5 % vůči kolmé variantě při stejné přepadové výšce a obdobně je průtok o 2,5 % menší, pokud je přeliv o 10° nakloněn proti směru proudění. Půdorysné natočení přelivu vůči ose toku o 25° nezpůsobilo měřitelnou odchylku. Lze konstatovat, že chybné umístění přelivu, definované výše, nezpůsobí příliš velkou chybu měření. Toto tvrzení je ovšem ověřeno pouze pro malé měrné přelivy a nízké průtoky, v případě větších přítokových rychlostí lze očekávat zvětšení chyb měření průtoků.

## VÝROBA MĚRNÝCH PŘELIVŮ

Měrné přelivy pro testování v laboratorním žlabu a v terénu byly zhotoveny metodou 3D tisku. Tato metoda umožňovala relativně snadné provedení variabilních tvarů měrného přelivu a přelivné hrany. Trojrozměrný model každého přelivu byl vytvořen na počítači a poté vytištěn tiskárnou. V rámci pokusů v laboratoři byl použit materiál PLA (kyselina polymlečná), tento materiál je plně biologicky odbouratelný, vyrábí se z kukuřičného škrobu. Jeho výhodou je snadný a rychlý tisk, nevýhodou je malá pružnost a křehkost materiálu, která ho vylučuje pro použití v terénu.



Obr. 15. Zobrazení změných umístění přelivu vůči standardnímu umístění (šedá – standardní umístění, černá – změnéné umístění)

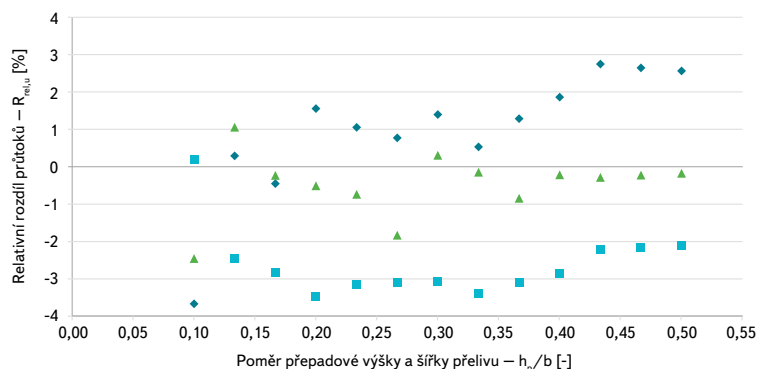
Fig. 15. Different positions diagrams of the weir against the channel centre line (grey – standard position, black – different position)

Pro využití v terénu se osvědčil materiál PET (polyethylentereftalát), který je známý díky plastovým lahvím. Materiál je dostatečně pevný a zároveň pružný a odolný proti vodnímu prostředí. V rámci terénního měření jsou již přelivy z PET instalovány dva roky, během tohoto období nebyly zjištěny žádné materiálové nedostatky, které by nepříznivě ovlivňovaly kvalitu měření průtoků. Velká výhoda materiálu v zimních měsících, při poklesu teploty několik stupňů pod nulu je, že nedochází k namrzání vody na vlastním přelivu v porovnání například s ocelovým přelivem.

## ZÁVĚR

V rámci laboratorního měření byly testovány přelivy s ostrou přelivnou hranou – trojúhelníkový, obdélníkový a kruhový. Pro jednotlivé přelivy byly porovnány hodnoty naměřených přepadových součinitelů s hodnotami podle různých autorů při minimálních přepadových výškách. Pro trojúhelníkový přeliv s vrcholovým úhlem 90° se jeví jako optimální používat rovnici podle Jičínského

a Šeflové (4) nebo podle Thomsona (2). Pro obdélníkový přeliv vychází nejlépe rovnice podle Rehbocka (9). Pro kruhový přeliv byl odvozen vztah podle VÚV TGM (12). Pro každý přeliv byla určena hodnota přepadové výšky, pod kterou dochází k přilnutí přepadového paprsku ke konstrukci přelivu a k hysterezi konsumční křivky (obdélníkový – 10 mm, trojúhelníkový – 15 mm, kruhový – 20 mm).



Vertikální – po proudu  $10^\circ$

Vertikální – proti proudu  $10^\circ$

Horizontální  $25^\circ$

Obr. 16. Porovnání relativních chyb způsobených chybným geometrickým umístěním měrného přelivu v toku

Fig. 16. Relative errors comparison of different positions of the weir against the channel centre line

V rámci pokusů s polokruhovou přelivnou hranou byly naměřeny přepadové součinitele pro kruhový a obdélníkový přeliv. Pro kruhový a obdélníkový přeliv s polokruhovou přepadovou hranou byly určeny hodnoty přepadové výšky, pod kterou již dochází k ulpívání přepadového paprsku na přelivu – obdélníkový přeliv 20 mm a kruhový přeliv 30 mm. Polokruhová přepadová hrana nezaručuje při nízkých přepadových výškách dokonalé odtržení výtoku paprsku.

Soubor pokusů také obsahoval měření se záměrně chybně umístěnými přelivy vůči proudu. Výsledky měření ukázaly, že pokud je přeliv nakloněn o  $25^\circ$  v horizontální rovině, výsledky měření se neliší od kolmého umístění přelivu. Pokud je přeliv vertikálně nakloněn o  $10^\circ$  proti směru proudění, naměřené průtoky jsou o 2,5 % menší než v případě svislého umístění. Pokud je přeliv vertikálně nakloněn o  $10^\circ$  po směru proudění, měřené průtoky jsou o 1,5 % větší než v případě svislého umístění. Tyto závěry lze ale aplikovat pouze, pokud je rychlost proudění před měrným přelivem malá.

## Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory projektu Zéta I – TJ01000343 – Vývoj hydraulicky vhodného přelivu pro měření malých průtoků.

## Literatura

- [1] ČSN ISO 1438: Hydrometrie – Měření průtoku vody v otevřených korytech pomocí tenkostěnných přelivů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [2] PATOČKA, C. *Hydraulika: 1. část*. 3. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1965, 174 s.
- [3] MĚSIAR, E. a KAMENSKÝ, J. *Hydraulika pre stavebných inžinierov I: Objekty a potrubia*. 1. Bratislava: ALFA, 1986, 344 s. ISBN 8005000855.
- [4] HAVLÍK, V. a MAREŠOVÁ, I. *Hydraulika 20: Příklady*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [5] *Přepady (přednáška)* [online]. Praha: Katedra hydrauliky ČVUT [vid. 2. 10. 2018]. Dostupné z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke\\_stazeni/prednasky/HY2V\\_06\\_Prepady.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_06_Prepady.pdf)
- [6] AGROSKIN, I.I., DMITRIJEV, G.T. a PIKALOV, F.I. *Hydraulika II*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, n. p., 1956, 448 s.
- [7] PANDEY, R., MITTAL, S.K., and CHOUDHARY, M.K. Flow Characteristics of Sharp Crested Rectangular Weir: A Review. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2016, vol. 3, No. 3, p. 171–178. ISSN 2348-7968.
- [8] KOLÁŘ, V. *Hydraulika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, n. p., 1966, 716 s.
- [9] GONG, J., DENG, J., and WEI, W. Discharge Coefficient of a Round-Crested Weir. *Water*, 2019, vol. 11, No. 6. Dostupné z: doi: 10.3390/w11061206.

## Autoři

Ing. Jan Hlom

✉ [jan.hlom@vuv.cz](mailto:jan.hlom@vuv.cz)

Ing. Pavel Balvín

✉ [pavel.balvin@vuv.cz](mailto:pavel.balvin@vuv.cz)

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i.

Příspěvek prošel lektorským řízením.

## MEASUREMENT OF LOW FLOW RATES USING MEASURING WEIR

HLOM, J.; BALVIN, P.

TGM Water Research Institute, p.r.i.

**Keywords:** sharp-crested weir – discharge coefficient – low flow measuring – measuring error

The paper deals with the results of measurements of the weirs suitable for measuring small or minimal discharge. The research is focus on determination of the discharge coefficients for low weir heads. The results of measurements for triangular, rectangular and circular weir are present. Measured discharge coefficients are compare with the equations according to different authors. For every equations was compared their suitability of their use for low weir heads. Experiments with semi-circular crest are also present. Several weir positions against the channel centre line in the stream is compare.