



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Ing. Daniel Mattas, CSc.

Praktické cvičení z hydrometrie

návod

ČVUT v Praze, Stavební fakulta
katedra hydrauliky a hydrologie

Praha 2001

Protože bylo rozhodnuto nahradit historické vrtule Metra vrtulemi novými od firmy SEBA, doznal tento návod v roce 2006 několika změn

D.M.

Úvod

Hydrometrická měření slouží k určení průtoku a patří mezi základní terénní práce ve vodním hospodářství. Na základě hydrometrických měření se konstruuje měrné křivky limnigrafických a vodočetných profilů, často se hydrometrická měření používají i k ověření charakteristik jiných měrných zařízení (měrných žlabů, přelivů větších rozměrů, které nelze kalibrovat objemově nebo váhově a pod.). Samostatnou kapitolu představují hydrometrická měření v rámci garančních měření vodních strojů (turbin a čerpadel).

Obvykle se pro měření průtoků používají hydrometrické vrtule či jiné přístroje pro měření bodové rychlosti, v některých případech lze použít i méně přesnou metodu využívající měření povrchových rychlostí pomocí plováků. Ve speciálních případech se používají chemické metody.

V rámci hydrometrických měření se často určuje i sklon hladiny, zejména v případech, kdy je zapotřebí určit parametry hystereze měrné křivky, nebo kdy potřebujeme zjistit Manningův součinitel drsnosti.

Určení průtoku měřením hydrometrickou vrtulí ("hydrometrování")

Hydrometrické stanovení průtoku je základní metodou pro určení průtoků v říční síti. Na základě výsledků hydrometrických měření se konstruuje měrné křivky, které vyjadřují vztah mezi vodním stavem a průtokem v daném profilu.

Měřicí zařízení

Pro hydrometrická měření se nejčastěji používají hydrometrické vrtule (též křídla – z něm. Flügel) různých konstrukcí. V Evropě jsou nejběžnější typy odvozené od původní Woltmannovy vrtule (prvně použité roku 1790), tedy s horizontální osou a (v dnešní době výhradně, původně se užívala lopatková kola) šroubovicovým propelerem. Renomovaní výrobci (např. fa Ott Kempten i jiní) dodávají několik typů vrtulí různé velikosti s výměnnými propelery o různých stoupáních šroubovice a různých průměrech (často i v celých soupravách – viz obrázek s kompletní soupravou



Vrtule Ott C-2

vrtule C-2 firmy Ott), takže podle očekávaných podmínek při měření a očekávaných rychlostí lze použít optimálního typu propeleru. Některé moderní typy propelerů jsou tzv. komponentní, což znamená, že při šikmém nátoku na osu vrtule propeler bere jen kosinovou složku vektoru rychlosti (rovnoběžnou s osou vrtule). Existují propelery s úhlem komponentnosti až 45°. V některých státech, zejména v USA, se používají vrtule se



Kompletní souprava vrtule Ott C-2

svislou osou, principiálně obdobné anemometru pro měření rychlosti větru.

Otáčející se osa vrtule spíná přímo (mechanicky, magneticky, opticky, příp. i jinak) nebo přes šnekový převod (mechanicky) kontakt, který ovládá počítadlo otáček (nebo u starších typů akustické signalizační zařízení – bzučák). Počítadlo se k vrtuli připojuje kabelem. Moderní vrtule zpravidla dávají jeden impuls na každou otáčku, starší typy dávaly impuls po deseti, dvaceti, dvaceti pěti nebo padesáti otáčkách. Některé typy vrtulí, zejména speciální vrtule pro laboratorní použití (tzv. mikro vrtule s průměry propelerů pod 25-30 mm), dávají i více než jeden (laboratorní vrtule Delft např. 60) impulsů na otáčku, takže lze do jisté míry sledovat i parametry turbulence. Ze známého času a počtu otáček se pak z kalibrační rovnice určuje rychlost proudění. Existuje však i vrtule, u které propeler otáčí dynamem, takže výstupem nejsou impulsy, ale napětový signál úměrný rychlosti.

Při měření se určuje počet otáček vrtule N za zvolený časový interval T (zejména u moderních vrtulí, které dávají signál po každé otáčce), nebo se měří čas T nutný k uskutečnění daného počtu otáček N (zejména u starých typů vrtulí, dávajících signál po více otáčkách). Některé typy počítadel dovolují volbu libovolného způsobu z obou.

Rychlost proudění v [ms^{-1}] v bodě se pak vypočte z kalibrační rovnice vrtule. Kalibrační rovnice je podle ČSN ISO 3455 po částech lineární tvaru

$$v_i = \alpha_i + \beta_i n$$

kde $n = N/T$ [s^{-1}] a α_i, β_i jsou kalibrační konstanty platné v uvedeném rozsahu specifických otáček $n \in \langle n_{i_1}; n_{i_2} \rangle$. Počet dílčích lineárních úseků kalibrační rovnice je nejvýše roven třem.

Konstanta β je blízká stoupání propeleru vrtule a konstanta α indikuje v případě prvního lineárního úseku kalibrační rovnice zhruba minimální rychlost, při které se vrtule začíná otáčet.

Kalibrační rovnici není vhodné extrapolovat mimo rozsah kalibrace, zejména pak ne směrem dolů, kde mechanické odpory vrtule mohou způsobovat její nerovnoměrný chod. Je-li to možné, místo extrapolace kalibrační rovnice směrem vzhůru je správnější použít propeleru s větším stoupáním.

V poslední době se kromě hydrometrických vrtulí stále více používají i měřidla založená na jiných principech, dosti rozšířená již jsou např. měřidla indukční (např. Ottův Nautilus 2000, FloMate a další), nejnověji se objevují i měřidla ultrazvuková. Vyhodnocovací jednotky těchto měřidel udávají přímo měřenou rychlost, bez nutnosti přepočtu. Oproti vrtulím s nimi lze většinou měřit i značně malé rychlosti (až řádu jednotek mms^{-1} , i když obvykle s poněkud sníženou přesností), vyhodnocovací zařízení je však upraveno tak, že při překročení maximální rychlosti (většinou ca $1,5\text{-}2,5 \text{ ms}^{-1}$) přístroj přestává měřit, což u vrtule nehrozí.



NAUTILUS 2000

Příprava měřidla a péče o něj

Má-li být měření správné, musí být měřidlo řádně udržováno a kalibrováno. Kalibrace vrtulí i některých dalších typů měřidel v ČR provádí Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí při VÚV T.G.M. v Praze. U hydrometrických vrtulí se doporučuje kalibrace po 100 - 200 hodinách provozu resp. dvou letech, a vždy je nutné překalibrování po výměně jakékoliv součásti (ložisko, osa). U indukčních měřidel podobné doporučení sice není uváděno, ale je též vhodné je periodicky ověřovat již z toho důvodu, že řada elektronických komponentů stárnutím mění své charakteristiky (odpor, kapacitu a pod.), dochází k oxidaci kontaktů a tím i změně odporu a pod.

Hydrometrické vrtule nových typů

Hydrometrické vrtule se před měřením plní olejem. U vrtulí SEBA a Ott C-31 se olej lije do dutiny propeleru, u vrtulí Ott C-2 do dutiny těla. Je žádoucí používat olej doporučený výrobcem. V každém případě je nezbytné používat stejný olej, jaký byl použit při kalibraci.

Před zahájením měření je vhodné vrtuli sestavit, kabelem spojit s počítadlem a ověřit funkčnost celého systému. Pokud systém nepracuje, je nutné v první řadě ověřit stav baterie v počítadle a funkčnost kabelu, u kterého může relativně snadno dojít k jeho přerušení. Poškození kontaktu je u vrtulí současných typů málo pravděpodobné, i když nelze vyloučit. Elektronická počítadla bývají značně spolehlivá, problémy u starších typů může způsobit vniknutí vody. Některé nové typy (např. tuzemský Hydročítač) již mají zlepšené krytí a bez újmy přežijí i ponoření do vody.

V průběhu měření je třeba kontrolovat, zda se na propeler nezachytilo plovoucí splávi; zejména v podzimním období je třeba dávat pozor na plovoucí listy. Je nutné též neustále kontrolovat, zda se na osu vrtule nenamotaly vláknité nečistoty (tráva, vláknité řasy a pod.) a pokud ano, neprodleně je odstranit.

Po každém měření je třeba provést kontrolu propeleru (mohl být poškozen nárazem o dno), a vrtuli a propeler osušit. Po ukončení měření se vrtule rozebere, olej vylije a vrtule se umyje v technickém benzínu. Důraz se klade na důkladné pročištění kuličkových ložisek – osvědčilo se jejich prostříknutí injekční stříkačkou. Nutné je též zkontrolovat oblast průchodu osy do těla vrtule, kde se často zachytávají vláknité nečistoty. Vrtule se nechá vyschnout a uloží. V žádném případě nelze vrtuli delší dobu skladovat naplněnou olejem – může dojít k jeho vysychání a tvorbě lepkavého filmu na povrchu součástí, který způsobuje zvýšené odpory a těžko se odstraňuje. Z počítadla se vyjmou baterie, aby v případě jejich vytečení nedošlo k jeho poškození.

Hydrometrické vrtule Metra

Vrtule Metra se před použitím plní petrolejem. Do ložiska se vloží kuličky v počtu 10 kusů. Kuličky se uchovávají uložené v oleji nebo vazelině; před použitím je nutné je pečlivě otřít. Tím je vrtule připravena k použití.

Před zahájením měření je vhodné vrtuli sestavit, kabelem spojit se signalizačním zařízením a ověřit funkčnost celého systému. Signalizační zařízení lze ověřit samostatně zvonkovým tlačítkem. Jeho nejčastější závadou bývá vypadnutí kontaktů baterie z držáku. Pokud systém nepracuje, je nutné dále ověřit funkčnost kabelu, u kterého může relativně snadno dojít k jeho přerušení. Další možnou závadou je špatný kontakt vrtule. Zde je nutné zjistit, zda nedošlo k jeho ohnutí, případně zoxidování.

Po ukončení měření je třeba vrtuli rozebrat, vylít petrolej, vyjmout kuličky z ložiska, osušit je a uložit zpět do oleje nebo vazelíny. Zkontroluje se převodové ústrojí, kontakt a čepové ložisko osy vrtule. Vrtule se sestaví a uloží. Ze signalizačního zařízení se vyjme baterie.

Indukční měřidla rychlosti

Vzhledem k tomu, že indukční měřidla nemají pohyblivých částí, je jejich údržba minimální. Při jejich použití je zejména třeba dbát na čistotu elektrod. Elektrod je nutné se nedotýkat rukama, v případě, že k dotyku náhodou dojde, nebo v případě, že se měří ve vodě, na níž jsou patrně skvrny ropných látek, je nutné elektrody očistit lihem.

Před uložením měřidla se z vyhodnocovací jednotky vyjmou baterie.

Upevnění měřidla

Měřidlo (ať již vrtule nebo jiné) se upevňuje na tyč nebo lanový závěs. Tyče bývají skládací, celkové délky 3-5 m. Jsou opatřeny dělením po 1, příp. 10 cm pro stanovení hloubky vody a nastavení vrtule do požadované výškové úrovně, a jsou vybavené přesuvným rukávem, který umožňuje nastavení vrtule do požadované hloubky bez nutnosti vytahovat soutyčí z vody. Aretační šroub přesuvného rukávu obvykle současně indikuje směr osy vrtule.

Ve druhém případě se měřidlo upevňuje k proudnicovému závaží různé hmotnosti (5, 10, 25, 50 nebo 100 kg) se směrovým kormidlem (tzv. torpédo), které je uchyceno na laně. Lano slouží nejen jako závěs, ale jsou jím i vedeny potřebné signální kabely. Torpéda mají obvykle dosedací kontakt, který signalizuje dosednutí na dno (využívá se pro stanovení hloubky). Součástí zařízení je speciální výložník a naviják lana. Naviják bývá opatřen ukazatelem délky odvinutého lana, která slouží pro určení hloubky a polohy vrtule ve svislici. Váha torpéda musí odpovídat očekávané maximální rychlosti, jinak je torpédo vynášeno k hladině; fa Ott např. udává maximální doporučené rychlosti podle tab. 1.

Tabulka 1 Doporučené závaží podle rychlosti

závaží [kg]	5	10	25	50	100
max. rychlost [ms^{-1}]	1	1	3	3,5	10

Měření s vrtulí na tyči lze provádět broděním (při malých hloubkách, ca do 1 m a malých rychlostech, ca do 1 ms^{-1}) nebo z lávky, mostu, případně z plavidla. S torpédem (vrtulí na lanovém závěsu) se měří z mostů, lávek nebo z plavidel. Ve významných profilech pozorovací sítě se osazují speciální stabilní lanovky, které dovolují proměření celého profilu pomocí torpéda s obsluhou ze břehu.

Pokud se měření provádí broděním, je třeba mít na paměti, že přítomnost měřiče v proudu ovlivňuje rozdělení rychlostí. Vždy je nutné držet vrtuli před sebou v co možná největší vzdálenosti, aby se tyto vlivy minimalizovaly. Též se doporučuje postoj bokem ke směru proudění.

Ve zvláštních případech (garanční měření vodních strojů a pod.) se používá většího počtu vrtulí upevněných na pevné či pohyblivé konstrukci. Pevné konstrukce mívají při umístění v potrubí tvar čtyř nebo šestiramenného kříže, při umístění ve vtocích přivaděčů tvar mříže. Pohyblivou konstrukci zpravidla tvoří rám zavěšený na laně, který pojíždí ve drážkách provizorního hrazení vtoku s jednou řadou vrtulí. Pro měření v potrubí se pohyblivé konstrukce obvykle nepoužívají, i když v literatuře je traverzovací zařízení popsáno. Pro sběr dat se v těchto případech (vrtulí bývá u přivaděčů většího profilu často i několik desítek) obvykle používá počítače.

Hydrometrický profil

Profil pro hydrometrování by měl být dostatečně hluboký, uprostřed přímé volné trati, co možná pravidelný a souměrný, bez překážek (kameny, vodní vegetace atd.). Délka přímé trati

by měla být alespoň 3 - 7 šířek koryta v hladině, ideálně 5 šířek nad a 2 šířky pod měrným profilem. Měrný profil má být kolmý na směr proudění a voda má proudit celým profilem s co možná pravidelným rychlostním profilem. Nevhodná jsou místa, kde dochází k tvoření vírů a úplavů, s přirozenými či umělými překážkami (balvanité úseky, zarostlé úseky, profily s nánosy, mostními pilíři a pod). Pokud nelze výše uvedená kritéria dodržet, je nutné při vlastním měření dbát na eliminaci nepříznivých vlivů vhodným umístěním, případně zahuštěním měrných a sondovacích svislic a pod.

U menších toků, kde se měření provádí broděním, je často možné (a vhodné) profil poněkud upravit - odstranit kameny větších rozměrů, které mohou nepříznivě ovlivňovat proudění, odstranit vodní vegetaci a pod. Upravit bývá nutné nejen samotný profil, ale často i krátký úsek nad ním, aby do měrného profilu pokud možno nezasahovaly úplavy za většími kameny výše proti proudu.

Vodní stav

Optimální je hydrometrovat za setrvalého vodního stavu. Pro kontrolu je vždy nutné (pokud neprovádíme hydrometrování ve standardním profilu, opatřeném stabilním vodočtem) instalovat v měrném profilu přenosný limnigraf nebo alespoň vodočet (postačuje i improvizovaný, např. kolík, od jehož vrcholu se odměřuje výška hladiny). Polohu hladiny zaznamenáváme nejlépe při začátku měření v každé svislici, povětšinou však stačí v delších časových intervalech. Pokud vodní stav kolísá, nebo se mění jen nevýznamně, přiřazujeme průtok aritmetickému průměru zjištěných vodních stavů. Při větších změnách vodního stavu je nutné jeho změnu uvažovat (způsob opravy viz níže).

Pro měření při výrazně neustáleném proudění (průchod povodňové vlny) se používá zvláštních technik (viz literatura), případně i měření v omezeném počtu svislic a bodů (často i jen povrchových rychlostí).

Počet a rozmístění měrných a sondovacích svislic

Počet N měrných svislic má být podle ČHMÚ pro toky užší 20 m nejméně

$$N=B,$$

nejméně však

$$N=10+h$$

kde B [m] je šířka toku v hladině a h [m] je střední hloubka vody.

Počet měrných svislic podle normy ISO udává tab. 2. Pro větší toky lze použít tabulku 3.

Tabulka 2 Počet měrných svislic podle ISO

šířka toku B [m]	počet měrných svislic
$B < 0,5$	3
$0,5 < B < 1,0$	4 - 5
$1,0 < B < 3,0$	5 - 8
$3,0 < B < 6,0$	8 - 12
$B > 6,0$	12 a více

Svislice bývají u toků s pravidelným korytem rozděleny rovnoměrně, vždy je však rozmístění svislic třeba podřídit nutnosti co nejlepšího vystižení průtočného profilu a rychlostního pole. U břehů svislice nemá být blíže než 0,1 m od břehu. Žádnou svislicí nemá protékat více než

Tabulka 3

Počet měrných svislic podle ČHMÚ

střední hloubka [m]	Minimální počet měrných svislic*								
	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	při šířce toku v hladině B [m]								
0,5	7	10	20	30					
1,0		8	15	30	45				
1,5			12	25	40	70			
2,0				20	35	70	105		
3,0					30	60	100	140	
5,0						40	80	120	180

* Při použití této tabulky by měl být počet sondovacích svislic nejméně dvojnásobný

10 % celkového průtoku. Na druhou stranu však vzdálenost mezi svislicemi nesmí být menší, než je průměr propelleru vrtule.

Často se z důvodu přesnějšího určení průtočné plochy vkládají další, tzv. sondovací svislice, v nich se měří pouze hloubka (zejména u větších toků; uvedená tabulka 3 předpokládá, že sondovacích svislic je nejméně dvojnásobné množství než svislic měrných).

V každé svislici se měří její vzdálenost b od zvoleného břehu, resp. průsečíku vodní hladiny s břehem, hloubka vody a v měrných svislicích rychlost proudění v několika bodech.

Měření vzdáleností

Měření vzdáleností (určení staničení svislic v profilu) provádíme zpravidla u menších toků pásmem, u větších toků předem nataženým měřičským lankem. Pásmo či lanko musí být vždy dobře napjato. Při měření pásmem určujeme staničení na centimetry, při použití lanka, které mívá označené jen celé metry, staničení odhadujeme na 10 cm.

Kromě výše uvedených pomůcek lze zejména na širokých tocích využít i geodetických metod, GPS (v diferenčním schématu) nebo měření různými typy optických či laserových dálkoměrů (nevýhodou je, že tyto přístroje měří až od jisté minimální vzdálenosti). Při jejich použití je též nutné věnovat zvýšenou pozornost tomu, aby se měřič držel v profilu.

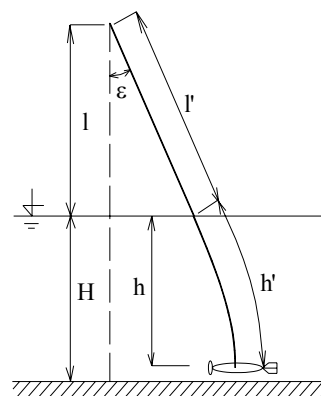
Měření hloubek

Měření hloubek se provádí většinou sondováním pomocí sutyčí vrtule nebo jejího závěsu, sondovací tyčí, případně i jinými metodami (zvláště při větších hloubkách např. ozvěnovým hloubkoměrem – echolotem či echografem, ve speciálních případech nivelací). Při sondování sutyčím se hloubka vody odečítá při poloze vrtule s její osou v úrovni hladiny. Pokud měříme v korytě s tvrdým dnem s tyčí, která má pod opěrnou destičkou na svém dolní konci stabilizační hrot, je nutné výšku hrotu přičíst k měřené hloubce. Při sondování sondovací tyčí s obvyklým dělením po 10 cm jednotky centimetrů odhadujeme. Zejména v tocích s většími rychlostmi proudění je při odečítání třeba dávat pozor na vliv hydrodynamického vzduť hladiny na přední straně sondovací tyče i snížení hladiny v úplavu za ní.

Při sondování pomocí torpéda či jakéhokoliv jiného závaží na závěsu je nutné uvažovat opravy na snášení vlivem odporů lana i zavěšeného tělesa. Přibližně lze, za předpokladu, že tvar závěsného lana pod hladinou je blízký přímce, určit hloubku torpéda pod hladinou z jednoduchého vztahu

$$h = L \cos \varepsilon - l$$

kde L je odvinutá délka závěsu ($L = l' + h'$) a ostatní veličiny jsou patrné z obrázku. Úhel ε se obvykle odečítá na upraveném úhloměru. Pokud se tvar závěsu více odchyluje od přímky, lze v literatuře nalézt přesnější způsob určení hloubky. Při praktickém měření je třeba při nastavování torpéda do měrného bodu postupovat iterační metodou, protože úhel odchylky závěsu od kolmice, který se navíc vlivem odporů závěsného lana mění s hloubkou, dopředu neznáme.



Snášení vrtule na závěsu

Měření rychlostí

Při měření bodových rychlostí se měrné body ve svislicích umísťují zpravidla pravidelně podle určeného schématu (viz obrázek), které zjednodušuje výpočet středních svislicových rychlostí, lze však použít i rozmístění nepravidelného, podle subjektivní volby. V případě měření s volbou polohy měrných bodů podle standardního schématu se používá tzv. měření úplného, pěti- nebo tříbodového. Počet měrných bodů, resp. jejich vzdálenosti, se má volit tak, aby vzdálenost měrných bodů ve svislici nebyla větší než 1 m a současně nesmí být menší než je průměr propelleru vrtule. Při subjektivní volbě rozmístění měrných bodů se vzhledem ke tvaru rozdělení rychlosti ve svislici doporučuje umístit většinu bodů do dolní poloviny svislice.

Při úplném měření se vrtule umísťuje do bodu u dna (osa vrtule nemá být výše než 1,5 násobek průměru propelleru, avšak vrtule nesmí narážet na dno a proudění nesmí být ovlivňováno většími výstupky dna), do bodů vzdálených $0,2H$, $0,4H$, $0,6H$ a $0,8H$ ode dna a u hladiny (propeler vrtule musí být neustále celý ponořen). Při pětibodovém měření se vypouští bod $0,6H$, při tříbodovém měření se ještě vypouštějí body u dna a u hladiny.

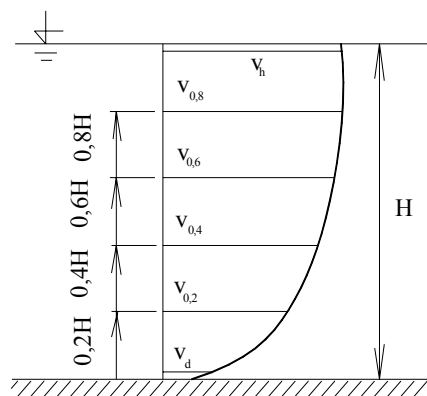


Schéma rozmístění měrných bodů

Norma ISO doporučuje užití tříbodové metody jako standardní za předpokladu, že rozdělení rychlostí ve svislici je parabolické. I vlastní zkušenosti ukazují, že v dobrých podmínkách není prakticky rozdíl v přesnosti tří a pětibodové metody.

Pro rychlá orientační měření lze použít metodu dvoubodovou nebo jednobodovou. Dvoubodová metoda (kterou ale např. US Geological Survey používá jako standardní) spočívá ve změření rychlosti v bodech vzdálených $0,2H$ a $0,8H$ ode dna, při jednobodové metodě se měří ve vzdálenosti $0,4H$ ode dna. Jak jednobodová, tak i dvoubodová jsou teoreticky zdůvodnitelné.

Z výše uvedeného vyplývá, že úplné a pětibodové měření lze teoreticky provést pouze, pokud platí $H \geq 7,5D$ (kde D je průměr propelleru vrtule), pro $5D \leq H < 7,5D$ lze použít maximálně tříbodové metody a pro $1,25D \leq H < 5D$ lze užít pouze jednobodové metody. Boiten uvádí počet bodů ve svislici v závislosti na hloubce podle tabulky 4. Tabulka zřejmě předpokládá použití vrtule s

Tabulka 4 Počet bodů ve svislici

Hloubka y [m]	počet bodů
$y < 0,25$	1
$0,25 < y < 0,50$	2
$y > 0,5$	3 a více

propelerem průměru 100 mm.

Při malých hloubkách, kdy vrtuli nelze umístit do předepsaných bodů, se měří rychlost proudění při dně a u hladiny, případně i jen v jediném bodě ca uprostřed hloubky.

V některých případech se používá tzv. integračního měření, kdy se vrtule spouští rovnoměrnou rychlostí od hladiny ke dnu. Výsledkem je počet otáček, který odpovídá přímo střední svislivová rychlost. Rychlost svislého pohybu vrtule nesmí překročit 5 % průměrné svislivé rychlosti, resp. $0,04 \text{ ms}^{-1}$. Integrační měření vyžaduje jednak komponentní propelery vrtulí, jednak speciální zařízení, které zajišťuje spouštění vrtule rovnoměrnou rychlostí. Dále je třeba zajistit, aby zařízení ukončilo načítání otáček přesně v okamžiku dosednutí vrtule na dno. Integrační měření se často používá při garančních měřeních turbin při měření ve vtcích, protože je zapotřebí podstatně méně vrtulí než při instalaci pevné mříže a měření je časově daleko méně náročné, než kdyby se s pomocí pohyblivé konstrukce provádělo měření bodové.

Potřebnou dobu měření ovlivňují zejména makroturbulentní pulsace rychlosti; doba měření by měla být taková, aby v jednom bodě několikrát po sobě provedené měření bodové rychlosti dalo zhruba stejné počty otáček nebo čas (s odchylkou řekněme menší než 5 %).

Doba měření v každém bodu při použití moderních vrtulí s elektronickými počítadly je 40-100 s podle požadované přesnosti měření, pro orientační měření často i méně (zpravidla však ne méně než 30 s). Při použití starších typů vrtulí se zvukovou signalizací se měří čas mezi začátky nebo konci signálů (stopkami, s přesností na 0,1 s); vždy je třeba zachytit nejméně dva intervaly mezi signály a přitom dodržet minimální dobu měření. Pokud je mezi oběma časovými intervaly výraznější rozdíl, je třeba v měření pokračovat.

Vyhodnocení průtoku

Pro vyhodnocení průtoku se používá řada metod. Všechny jsou založeny na známých vztazích

$$dQ = u \cdot \cos \varphi \cdot dS$$

kde dQ je elementární průtok, procházející elementární ploškou dS při rychlosti proudění u , jejíž vektor je odkloněn od normály k elementární plošce o úhel φ . Integrací výše uvedeného výrazu po ploše dostaneme

$$Q = \int_S u \cdot \cos \varphi \, dS = \int_{x=0}^{x=B} \int_{y=0}^{y=H} u \cdot \cos \varphi \, dx \, dy$$

Je-li proudění paralelní, lze vytknout $\cos \varphi$ před integrál, pokud je směr proudění kolmý na průtočný profil, bude ještě $\cos \varphi = 1$ a výsledný vztah se zjednoduší na

$$Q = \int_S u \, dS$$

Protože však neznáme analytický tvar funkce $u = f(x,y)$, musíme výše uvedený vztah vyčíslit nějakou jinou vhodnou metodou, založenou obvykle na vztahu $Q = \sum v_i S_i$, který odpovídá výše uvedenému integrálu. Lze použít vyčíslení numerického, semigrafického nebo grafického.

Průtok vždy vztahujeme k vodnímu stavu.

Protože pro vyhodnocení průtoku se dnes obvykle používají specializované počítačové programy, dále uvádíme jen základní numerický a graficko-početní postup (tzv. Harlacherovu metodu). V některých speciálních případech se též vykreslují izotachy (čáry stejných rychlostí).

Numerický výpočet

Nejprve se z kalibrační rovnice vypočtou rychlosti proudění ve všech bodech svislice. Dále se určuje střední svislicová rychlost v_s jako vážený průměr z rychlostí ve všech bodech:

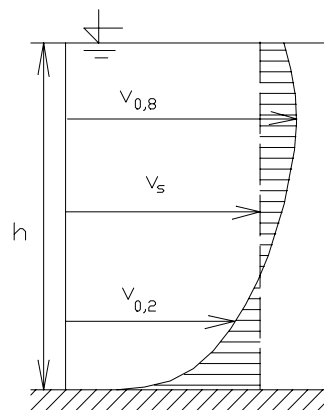
$$v_s = 0,1 (v_d + 2 v_{0,2H} + 2 v_{0,4H} + 2 v_{0,6H} + 2 v_{0,8H} + v_p)$$

$$v_s = 0,1 (v_d + 2 v_{0,2H} + 3 v_{0,4H} + 3 v_{0,8H} + v_p)$$

$$v_s = 0,25 (v_{0,2H} + 2 v_{0,4H} + v_{0,8H})$$

$$v_s = 0,5 (v_{0,2H} + v_{0,8H})$$

$$v_s \doteq v_{0,4h}$$



Určení střední svislicové rychlosti

kde v_d je rychlost u dna, v_p je rychlost povrchová (u hladiny) a ostatní indexy značí výšku bodu nade dnem. Průtok pak vypočteme na základě vztahu

$$Q = kv_1 H_1 b_1 + \sum_1^{n-1} \frac{v_i H_i + v_{i+1} H_{i+1}}{2} (b_{i+1} - b_i) + kv_n H_n (b_n - b_{n-1})$$

kde n je počet měrných svislic, v_i je střední svislicová rychlost a H_i hloubka v i -té svislici, a b_i je vzdálenost i -té svislice od zvoleného břehu. Součinitel k slouží k opravě dílčího průtoku u břehu, $k=0,33$.

Kromě průtoku se obvykle stanovují další parametry, a to zejména:

- střední průřezová rychlost $v = Q/S$
- šířka profilu v hladině B
- průtočná plocha $S = 0,5 H_1 b_1 + \sum_1^{n-1} \frac{H_i + H_{i+1}}{2} (b_{i+1} - b_i) + 0,5 H_n (b_n - b_{n-1})$
- omočený obvod $O = \sqrt{b_1^2 + H_1^2} + \sum_1^{n-1} \sqrt{(b_{i+1} - b_i)^2 + (H_{i+1} - H_i)^2} + \sqrt{(b_n - b_{n-1})^2 + H_n^2}$
- hydraulický poloměr $R = S/O$
- střední hloubka $h = S/B$
- maximální hloubka v profilu h_{max}

i další parametry, jako např. maximální povrchová rychlost, poměr střední povrchové nebo maximální povrchové rychlosti a střední průřezové rychlosti, Manningův součinitel drsnosti, Coriolisovo číslo a pod.

V současné době se pro výpočet průtoku používá několika počítačových programů, které obvykle vyhodnocují všechny výše zmíněné parametry.

Graficko-početní způsob

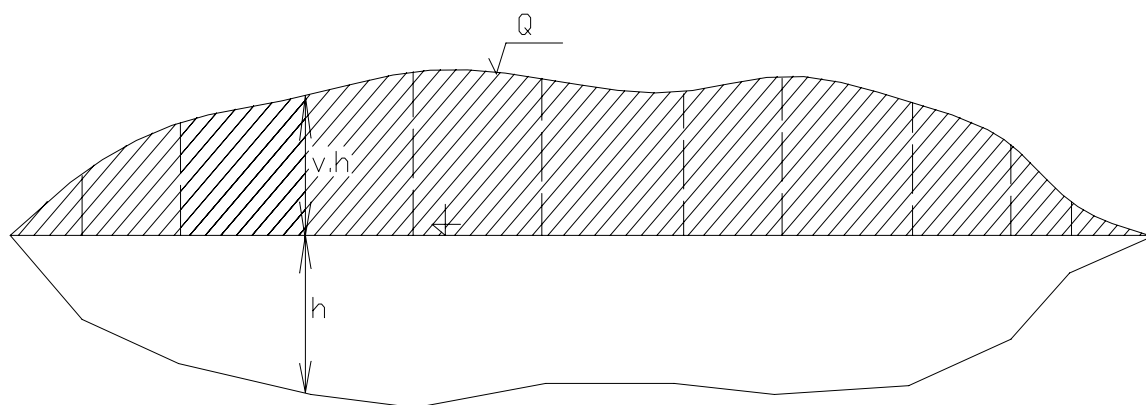
Tato metoda, zvaná podle svého autora též metodou Harlacherovou, bývala standardní metodou pro vyhodnocení průtoků. Je velmi přesná, zejména při volbě dostatečně velkého měřítka. Vychází z výrazu

$$Q = \int_{x=0}^{x=B} q \, dx = \int_{x=0}^{x=B} v h \, dx$$

kde $q = v h$ [$m^2 s^{-1}$] je elementární průtok ve svislici, v [ms^{-1}] je střední svislicová rychlost a h [m] je hloubka ve svislici.

Střední svislicová rychlost se při úplném a pětibodovém měření nejpřesněji zjistí vynesemím bodových rychlostí, spojením bodů (obvykle "od ruky" pomocí křivítka), zplanimetrováním vzniklé plochy a jejím převedením na půdici rovnou hloubce vody ve svislici. V případě užití méně podrobných metod určujeme střední svislicovou rychlost výpočtem podle výše uvedených vzorců.

Střední svislicové rychlosti vyneseme ve vhodném měřítku nad grafické zobrazení příčného profilu a opět spojíme „od ruky“ plynulou čarou. V dalším kroku vynášíme součiny vh v jednotlivých svislicích ve vhodném měřítku nad srovnávací rovinu (hladinu). Přitom v místech sondovacích svislic, kde byla měřena pouze hloubka, příslušné rychlosti odečítáme z čáry $v = f(B)$, čímž můžeme výsledek dále zpřesnit. Spojením koncových bodů těchto pořadnic (opět od ruky pomocí křivítka) obdržíme čáru, uzavírající s hladinou určitou plochu, jejíž velikost zobrazuje v daném měřítku přímo průtok.



Princip Harlacherovy metody

Metoda dovoluje použít obecného rozmístění měrných svislic. Průtočná plocha se stanovuje zvlášť, obvykle planimetrováním vykresleného příčného profilu.

Vyrovnání vodního stavu

Vodní stav při hydrometrování by měl být co možná setrvalý. Při jeho malých změnách bereme jako výsledný vodní stav aritmetický průměr. Pokud se během hydrometrování vodní stav výrazněji mění, určuje se průměrný vodní stav jako

$$\bar{H} = \frac{1}{Q} \sum H_i Q_i$$

kde Q je celkový průtok měrným profilem, $Q = \sum Q_i$, a H_i je vodní stav příslušný dílčímu průtoku Q_i .

Pokud měříme za výrazně neustáleného proudění (při průchodu povodňové vlny), používá se zvláštních technik (viz literatura).

Přesnost měření

Přesnost měření závisí na řadě okolností. Zásadní význam má volba profilu, rozmístění svislic a použité schéma měření ve svislici, a doba měření v každém bodě. Jistý (i když menší) vliv má i způsob vyhodnocení.

Od počtu měrných a sondovacích svislic se odvíjí přesnost stanovení průtočné plochy. To může přesnost měření značně ovlivnit a podle výzkumů ISO je z hlediska přesnosti rozhodující. Boiten uvádí graf, z něhož vyplývá, že chyba měření závislá na počtu svislic

dosahuje při $N = 6$ téměř 8 % rychle klesá, při $N = 10$ je ca 4,5 %, při $N = 20$ je ca 2,3 % a při $N = 30$ již jen ca 1,5 %.

Použité schéma měření ve svislici ovlivňuje přesnost určení střední svislicové rychlosti, avšak podle týchž výzkumů má zvětšování počtu bodů nad tři již prakticky zanedbatelný vliv – při tříbodové metodě dává Boitenem uvedený graf chybu ca 4,1 %, při šesti bodech ještě téměř 3 %. To potvrzují i naše zkušenosti – za dobrých podmínek (přímá trať, pravidelný profil, pravidelné rychlostní pole) nebývá velkého rozdílu mezi měřením úplným (či pětibodovým) a tříbodovým.

Doba měření v bodě má vliv na stanovení bodové rychlosti. Dostatečně dlouhá doba měření omezuje chybu vznikající pulsacemi rychlosti. Měla by být taková, aby opakovaná měření v jediném bodě dávala shodné výsledky. Přitom je nutno mít na paměti, že

- pulsace rychlostí vzrůstá s hloubkou, u dna je největší
- při břehu jsou pulsace rychlosti větší než uprostřed toku
- pulsace rychlosti bývají úměrné rychlosti (se zvětšováním rychlosti se zvětšují)
- pulsace se zvětšují se zvyšováním drsnosti dna.

Boiten udává, že pro rozumně spolehlivé určení průměrné rychlosti postačují doby měření 30 - 50 s při velkých, 60 - 100 s při malých rychlostech.

Celkově lze odhadnout přesnost určení průtoku v dobrých podmínkách při standardním úplném měření v dostatečném počtu svislic chybou ca do 5 % (v umělých kanálech jednoznačně definovatelného tvaru s pravidelným rychlostním polem i pod 1%). Přesnost však rychle klesá a při rychlém orientačním měření v menším počtu svislic jednobodovou metodou v obtížných podmínkách lze očekávat chybu 15-20 % i více.

Určení průtoku pomocí hladinových plováků

V některých případech lze pro stanovení průtoku využít měření povrchové rychlosti pomocí plováků. Metoda není zdaleka tak přesná jako měření vrtulí, má však dvě hlavní výhody:

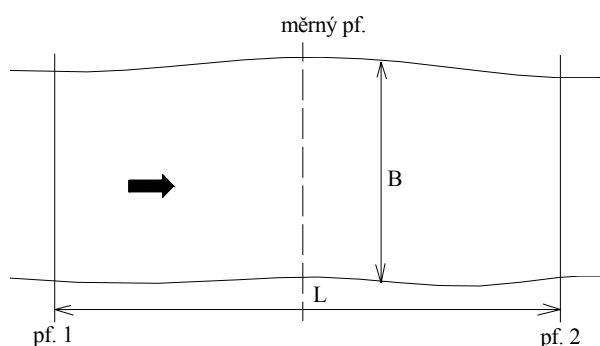
- není zapotřebí nákladného zařízení (vrtule či jiného přístroje) a měření lze improvizovaně provést s využitím materiálu nalezeného na místě
- často ji lze použít v podmínkách, kdy měření vrtulí by bylo obtížné až nemožné, např. za povodňových situací.

Existují dvě hlavní modifikace metody – proměření pole povrchových rychlostí nebo zjištění maximální povrchové rychlosti.

Určení průtoku z pole povrchových rychlostí

Měření rychlostí

K měření se volí pokud možno přímá trať s co možná rovnoměrným prouděním a co možná rovnoměrným rozdělením rychlostí. Délka měrné trati L má být u širokých toků zhruba $L = 2B$ kde B je šířka toku v hladině, resp. taková, aby doba průchodu plováku měrným úsekem nebyla kratší než ca 20 s. U malých toků se volí přiměřeně delší, $L=(2-5)B$. Na břehu se zaměří měrný úsek a kolmo k toku vytyčí měrné profily na začátku, konci a ve středu měrného úseku. Střední profil se prosouduje pro stanovení průtočné plochy; přesnější je prosouduvat všechny tři profily a průtočnou plochu brát jako průměr.



Měrný úsek

Plováky mají být pokud možno jednotného typu (dřevěné hranoly, částečně vodou naplněné láhve, téměř ideálním plovákem je díky své hustotě a barvě pomeranč) a je třeba jich připravit dostatečné množství. Plováky se vypouštějí (vhazují do vody) v dostatečné vzdálenosti nad horním profilem (alespoň 10-15 m), aby plovák do průchodu horním profilem nabyt stejné rychlosti jako voda a bylo možné spolehlivě určit okamžik průchodu plováku prvním profilem. U toku s šířkou v hladině do 20 m se vypouští 3-5 plováků, u širších toků se měří rychlost v každém pátém nebo desátém metru šířky toku, což však předpokládá most nebo lávku nad zvolenou měrnou tratí, případně vypouštění plováků z plavidla.

Při vlastním měření měřič v prvním profilu sleduje připlouvající plovák a v okamžiku jeho průchodu profilem dá signál (akustický – píšťalkou nebo zvoláním, nebo optický) pozorovateli v dolním profilu k zahájení měření času. Při průchodu plováku druhým profilem měřič odečte čas t nutný k proplutí plováku měrnou tratí a zaznamená jej do zápisníku spolu s polohou plováku v toku (vzhledem k šířce). Poté dá signál k vypuštění dalšího plováku. Při dostatečném počtu pracovníků lze (a je žádoucí) měřit čas ještě v pomocném mezilehlém profilu, aby bylo možné porovnat rozdělení rychlostí po délce měrné trati. V každé jednotlivé dráze se měření obvykle 2-3krát opakuje, při zjevném vybočení plováku z dráhy se toto měření vyloučí. Ze zbylých hodnot se pak určí výsledná rychlost jako aritmetický průměr.

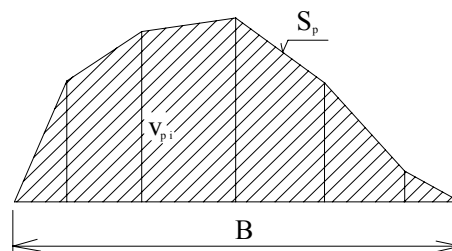
Vyhodnocení průtoku

Rychlosti jednotlivých plováků se vypočtou z rovnice

$$v_i = \frac{L}{t_i},$$

vynese se polygon průměrných rychlostí v jednotlivých drahách a určí se jeho plocha S_p . Průměrná povrchová rychlost proudění je pak

$$v_p = \frac{S_p}{B}.$$



Polygon rychlostí

Průtok vypočteme ze vzorce

$$Q = \kappa v_p S$$

kde S je průtočná plocha a κ je součinitel, vyjadřující poměr střední průřezové rychlosti a průměrné povrchové rychlosti. Součinitel κ se pro daný profil obvykle určuje na základě hydrometrických měření vrtulí. Protože se mění s vodním stavem H , uvádí se zpravidla v grafické formě nebo jako empirický vztah $\kappa=f(H)$.

Pokud neznáme vztah pro součinitel κ , lze použít údajů z literatury. Starší sovětské práce uvádějí součinitel κ nejčastější hodnotou $\kappa=0,80-0,85$, $\kappa=0,75-0,85$ pro řeky malých hloubek a nepříliš vysokých rychlostí, pro hluboké řeky s pravidelným profilem a rychlostmi přes 2 ms^{-1} $\kappa=0,90-0,96$, jiné prameny pak uvádějí rozmezí $\kappa=0,80-0,95$, případně $\kappa=0,84-0,87$ pro velké řeky.

Pokud známe sklon hladiny, lze pro určení součinitele κ použít např. Železnjakovův vzorec

$$\kappa = 1 - \frac{5,8}{v_p} \sqrt{h i}$$

kde $h = S/B$ je střední hloubka toku a i je sklon hladiny, případně lze užít vzorce

$$\kappa = \frac{C}{C+6}$$

kde C je Chézyho součinitel. Použití tohoto vzorce je poněkud problematické, protože vyžaduje odhad Manningova součinitele drsnosti, což je pro nezkušeného pracovníka úloha poměrně obtížná.

Určení průtoku z maximální povrchové rychlosti

V některých případech je výhodnější neproměřovat plováky celé pole povrchových rychlostí, ale jen určit maximální povrchovou rychlost. Na některých tocích jsou navíc plováky snášeny do proudnice (zejména toky horského charakteru), takže proměření pole povrchových rychlostí je nemožné a nezbyvá než se omezit na určení maximální povrchové rychlosti v proudnici.

Měření rychlosti

Postup je obdobný jako při určení průtoku z pole povrchových rychlostí, avšak plováky se vypouštějí v proudnici. Měření se opakuje nejméně 3-5krát, měření, při kterých plovák vyplul z proudnice (delší čas měření ve srovnání s ostatními) se vylučují.

Ze známé délky měrného úseku a změřených časů se určí rychlosti jednotlivých plováků a z nich maximální povrchová rychlost v_{pmax} jako aritmetický průměr tří nejrychlejších plováků.

Vyhodnocení průtoku

Průtok určíme z vypočtené maximální povrchové rychlosti v_{pmax} na základě jednoduchého vztahu

$$Q = \lambda v_{pmax} S$$

kde S je průtočná plocha a λ je korekční součinitel. Podobně jako v předchozím případě je vhodné jej určit na základě hydrometrických měření v daném profilu. Pokud jej pro daný profil neznáme, lze jej odhadnout hodnotou $\lambda=0,55-0,67$ pro velké a střední toky s příznivými podmínkami proudění nebo $\lambda=0,43-0,54$ pro velké a střední toky s méně příznivými podmínkami (značně znečištěné, částečně zarostlé, meandrovité, kamenité dno, neklidné proudění). Součinitel λ je též možné určit ze vztahu

$$\lambda = 1 - \frac{17,54}{v_{pmax}} \sqrt{h i}$$

nebo

$$\lambda = \frac{C}{1,34C + 6}.$$

Sklon hladiny

Pro stanovení některých dalších parametrů, zejména hydraulické drsnosti koryta a hystereze měrné křivky, je zapotřebí zjistit sklon hladiny.

Sklon hladiny se zaměřuje v měrné trati délky $L \doteq 3B > 75 - 100$ m, pro malé toky $L \geq 60$ m. Jiné doporučení je délka tratě alespoň 7 - 10 šířek koryta. Pokud nelze tuto podmínku dodržet (což je bohužel dosti častý případ), lze použít několika dalších kritérií:

- délka úseku je alespoň 75 násobek střední hloubky průřezu
- spád v úseku je roven alespoň jedné rychlostní výšce
- spád je větší než 15 cm.

Dvě třetiny trati mají být nad, jedna třetina pod měrným profilem. V této trati se vyznačí (zpravidla pravidelně rozmístěné) body, které ji dělí na dílčí úseky, přičemž jeden z těchto bodů má být přímo v měrném profilu. V těchto bodech se pak niveluje poloha hladiny.

V přímém úseku zpravidla postačuje zaměření bodů u jednoho břehu, správnější je však zaměřit hladinu u obou břehů, a v řadě případů (zejména v přejezdech s většími kameny, které způsobují lokální vzduť, v obloucích s větší křivostí a pod.) je zaměření hladiny u obou břehů nezbytné. Obvykle se při břehu ve vodě zatloukají kolíky, od jejichž hlav se v co nejkratší možné době (vyloučení vlivu neustáleného vodního stavu) odměří hladina a hlavy kolíků se zanelují. Pro méně přesná měření postačuje, pokud je to možné, stavět nivelační lať na částečně ponořené kameny a jiné předměty tak, aby se její základna právě dotýkala hladiny vody.

Zanelované hladiny se vynesou do grafu (posouzení rovnoměrnosti sklonu, případných hrubých chyb atd.) a případně přímkově vyrovnají. Sklon je pak rozdíl výšky vyrovnaného prvního a posledního bodu zaměřeného úseku dělený délkou úseku.

Určení Manningova součinitele drsnosti

Určení Manningova součinitele drsnosti odhadem na základě tabulek či jiných pomůcek je obvykle (zejména v případě pracovníka bez zkušeností) obtížné a značně nejisté. Přitom v řadě případů (extrapolace měrných křivek, matematické modelování a pod.) potřebujeme znát součinitel drsnosti co možná nejpřesněji.

Součinitel drsnosti lze v těchto případech určit výpočtem z Chézyho rovnice s Manningovým (nebo i jiným – např. Pavovského) vyjádřením Chézyho součinitele

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

Průtok přitom určíme co nejpřesněji hydrometrováním; z hydrometrování známe i tvar příčného profilu, z něhož lze snadno odvodit potřebné geometrické parametry (průtočnou plochu a omočený obvod), sklon hladiny určíme nivelací.

Pro přesná určení Manningova součinitele drsnosti je žádoucí zaměřit nejen měrný profil, ale i profily na začátku a konci měrného úseku pro určení sklonu hladiny a plochu a omočený obvod brát jako průměry z těchto tří profilů.

Praktické provedení hydrometrického výcviku na pracovišti Srbsko

Terénní výcvik se provádí na Berounce v blízkosti fakultního objektu v Srbsku. Objekt je situován na konci obce na levém břehu řeky a slouží jako zázemí pro terénní výcvik.

V pevném profilu vybaveném úchyty lan a k němu přilehlému úseku se provádí všechna měření, tj. hydrometrování, určení průtoku pomocí plováků a nivelace pro určení vodního stavu a sklonu hladiny. V případě potřeby lze též hydrometrovat na potoce Kačák, ca 10 minut proti proudu.

Všechny záznamy v terénu je vhodné činit obyčejnou měkkou tužkou, která na papíře jako jediná přežije i nepřízeň počasí i případný pád záznamů do vody.

Bezpečnost práce

Vzhledem k tomu, že některé práce se vykonávají v hlubší vodě z plavidel, jsou posádky plavidel povinny nosit plovací vesty.

Při práci s ocelovými lany jsou osoby tyto práce vykonávající povinny nosit pracovní rukavice a práci vykonávat opatrně, aby nedošlo ke zranění jejich nebo dalších osob.

V případě uvolnění soulodí ze závěsu je přísně zakázáno pokoušet se soulodí udržet na místě uchopením nosného nebo měřičského lana – hrozí nebezpečí vážných úrazů. S uvolněným soulodím je třeba dopádlovat ke břehu a teprve tam jej s nejvyšší opatrností opět upevnit.

Na soulodí je zakázáno za jakýchkoliv okolností používat soutyčí vrtulí jako bidel – může dojít k jejich ohnutí a pádu do vody.

Posádky lodí zabývajících se měřením rychlosti plováky musí při případném podjíždění nosného lana dbát zvýšené opatrnosti.

Pokud za nižších vodních stavů lze v části měrného profilu provádět měření broděním, nesmí pracovníci toto měření provádějící vstupovat do vody bosí, ale pouze ve vhodné obuvi (rybářské holinky, holinky a pod.).

Vzhledem k napjatým lanům a obecné charakteristice terénu na pracovišti je nutno dbát zvýšené opatrnosti aby nedošlo ke zranění.

Každé (i drobné) zranění je třeba neprodleně hlásit některému z pracovníků katedry, který zajistí ošetření.

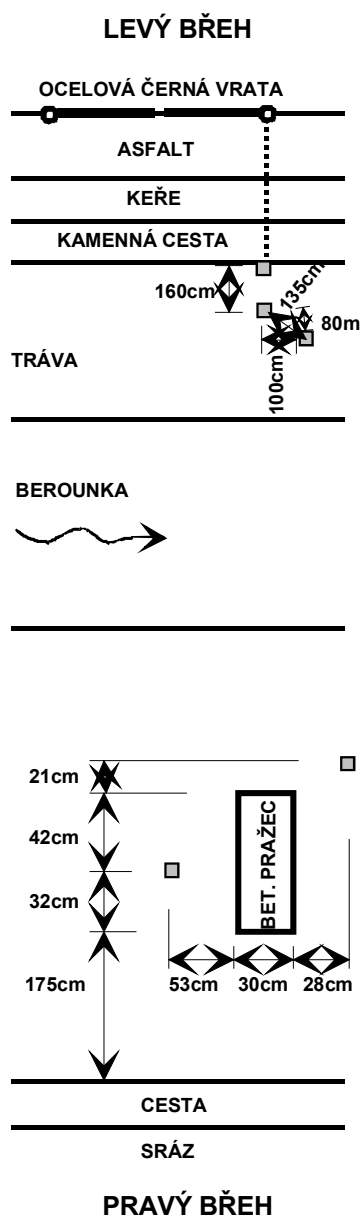
Osoby účastníci se výuky v terénu jsou povinny mít pracovní oděv, protože nelze vyloučit namočení, ušpinění, případně i poškození oděvu. Osádkám lodí se doporučuje nebrat s sebou na loď předměty, které by mohly při případném vykoupání dojít újmě (doklady, papírové peníze, mobilní telefony, kalkulačky a pod.).

S ohledem na možný vodácký provoz na řece jsou přítomní žádáni, aby posádky připlouvajících lodí včas upozornili na natažená lana.

Hydrometrické práce na Berounce

Hydrometrování

Vzhledem k tomu, že v pravé části profilu bývají zejména za vyšších vodních stavů značnější hloubky, měří se ze soulodí. K tomuto účelu je třeba před zahájením měření v profilu napnout jednak nosné lano, jednak měřičské lanko, a sestavit soulodí.



Volný konec nosného lana se jednou z lodí převezne na pravý břeh a zahákne do kovového oka (rozmístění upínacích prvků na pracovišti viz schéma vlevo), druhý konec lana opatřený dvěma háky se zahákne do oka napínacího zařízení („hupcuku“), uchyceného do oka na okraji potahové stezky, lano se vypne a pomocí druhého háku stáhne k zemi. Poté se obdobným způsobem napne měřičské lanko ve vzdálenosti ca 0,5 m po proudu za nosným lanem.



Soulodí se sestaví ze dvou kanoí a dřevěné podlážky – borty kanoí se zachytí do výřezů v trámci podlážky a podlážka se úvazky přiváže k lodím (úvazky je nutné kolem lodí ovinout). Připravené soulodí se spustí na vodu, do ok na podlážce se zachytí nosné lanko a hákem upevní ke kladce na nosném lanu. Tím je soulodí připraveno k měření.

Protože v profilu není pevný vodočet, je třeba pro kontrolu setrvalosti vodního stavu během měření nainstalovat pomocný vodočet. Vodočet se umísťuje do vody ke břehu, pokud možno do místa s nulovými nebo velmi malými rychlostmi proudění. Vodní stav se odečítá periodicky v průběhu hydrometrování (nejméně na začátku a na konci).

Hydrometrické vrtule se vydávají již připravené k měření; postačuje sešroubovat potřebný počet dílů soutyčí (obvykle stačí dva díly soutyčí Metra, u soutyčí SEBA a Ott všechny) – pozor na pořadí jednotlivých dílů, číslování musí navazovat, a na dolní konec přesuvného rukávu připevnit vrtuli. U vrtule Metra se vrtule připojuje přímo, u vrtule SEBA se vyčnívající konec rukávu zasune do vrtule a upevní šroubem. Vrtule Ott C-2 se upevní do adaptéru, který se šroubem uchytlí k přesuvnému rukávu.

V případě soutyčí Metra se na horní konec přesuvného rukávu upevní ukazatel směru rovnoběžně s osou vrtule, u ostatních typů má tuto funkci aretační šroub přesuvného rukávu. U soutyčí SEBA a Ott se soutyčí spojí zasunutím jednotlivých dílů do sebe a *vyšroubováním* pojistného šroubu. Přesuvné rukávy se u soutyčí SEBA spojí opět pomocí šroubů, u soutyčí Ott mají bajonetové uzávěry.

Signalizační zařízení vrtule Metra se připojuje banánkem na delším konci kabelu do zdířky na vrtuli, kratší konec kabelu je nejlépe zasunout pod šroub ukazatele směru. Signalizační zařízení se zapíná tlačítkovým vypínačem, zvonkové tlačítko slouží pro kontrolu funkčnosti bzučáku. U vrtulí SEBA a Ott, které dávají signál při každé otáčce, se používají elektronické čítače impulsů; připojují se kabelem, jehož jeden konec se upevní k vrtuli – u SEBY se banánek zasune do zdířky a volný konec kabelu se po stlačení pružinového uzávěru zasune do otvoru. U vrtule Ott C-2 se banánek zasune do otvoru v adaptéru a druhý konec se našroubuje na vrtuli. V obou případech se druhé konce kabelů s banánky zapojí do čítačů (u vrtulí SEBA musí souhlasit barvy banánků a zdířek, u vrtule Ott na pořadí nezáleží).

Při vlastním měření je vzhledem ke tvaru příčného profilu vhodné volit v pravé třetině koryta měrné svislice hustěji (cca po 2,5-3 metrech), v mělké části (cca 2/3 šířky koryta vlevo) postačuje vzdálenost měrných svislic ca 5 m. Mezi měrné svislice je žádoucí vkládat vždy jednu sondovací, a to zejména v mělké části, kde jsou měrné svislice od sebe více vzdáleny.

Pro rozmístění měrných bodů ve svislici je vhodné používat standardních schémat. Vzhledem k průměru propeleru vrtulí Metra, který je 80 mm, lze v rozmezí hloubek 10 - 40 cm použít pouze jednobodovou metodu. Při hloubkách nad 40 cm již lze užít libovolné další (dvou-, tří-, pětibodové) metody včetně měření úplného.

Pokud za nižších vodních stavů lze provádět měření v části profilu broděním, je nutné pamatovat na to, že pro vyhodnocení měření musí staničení měrných svislic na sebe navazovat. Je třeba se v pracovní skupině dohodnout, od kterého břehu se bude staničení počítat a pod.

Všechny údaje (staničení, hloubka vody ve svislici, poloha vrtule v jednotlivých měrných bodech, počet otáček i doba měření) se zapisují do standardních formulářů. Vždy je nutné poznamenat též sériové (výrobní) číslo vrtule a její kalibrační konstanty. Použití kalibračních konstant jiné vrtule je hrubou chybou.

Při vlastním měření se ve zvolené svislici pomocí soutyčí vrtule změří hloubka – soutyčí se opře o dno, vrtule se nastaví tak, aby její osa byla právě v hladině a na soutyčí se odečte hloubka udávaná hranou přesuvného rukávu. Pak se vrtule postupně nastavuje (posunem rukávu po tyči) do náležitých hloubek. Je třeba vést v patrnosti délku, resp. použitý počet kusů rukávu a podle toho odečítat hloubky. V blízkosti dna je zapotřebí s vrtulí manipulovat obzvlášť opatrně, aby nedošlo k nárazu vrtule o dno či vystupující kameny a poškození propeleru nebo ohnutí osy.

Při použití vrtule Metra se při zvuku signálního zařízení uvedou do činnosti stopky; měří se dva časové intervaly mezi třemi signály (tj. čas nutný pro vykonání 100 otáček vrtule). Přitom čas druhého signálu stačí určit přibližně na celé vteřiny (slouží jen pro kontrolu rovnoměrnosti chodu vrtule). Vždy je třeba čas měřit buď mezi počátky, nebo mezi konci signálů. Výsledný čas (pro 100 otáček) se určuje na 0,1 s. Dojde-li během měření k poruše

signalizačního zařízení, je třeba v první řadě zkontrolovat, zda jsou oba konce kabelu upevněny na náležitých místech (zdířka vrtule, soutyčí). Pokud je připojení kabelu v pořádku, je nutné zkontrolovat, zda nevypadly kontakty baterie.

U vrtule SEBA se čítač uvede v činnost stiskem stříbrného tlačítka. Po uplynutí předem nastavené doby (zde standardně **40 s**) se načítání automaticky zastaví a z počítadla se odečte počet otáček. Před dalším měřením je nutné počítadlo vynulovat stiskem černého tlačítka na počítadle. Ovládání Hydročítače používaného s vrtulí Ott C-2 viz kap. Hydrometrování Kačák.

Stanovení průtoku plovákovou metodou

Délka trati pro měření plováky má být cca dvojnásobek šířky koryta. Protože pro vyhodnocení průtoku je nutné znát plochu průtočného profilu, jako měrný profil se užívá profil, v němž se hydrometruje.

Směrem po i proti proudu se výtyčkami na obou březích vytyčí další dva profily ve vzdálenosti 50-60 m od středního (měrného) profilu a pásmem se změří jejich vzdálenost. Profily mají být kolmo na osu koryta. Pokud není k dispozici vytyčovací hranolek, lze použít přibližnou metodu: měřič se postaví na břeh s pažemi rozpaženými ve směru osy koryta, zavře oči a s nataženými pažemi tleskne (ruce nechá spojeny). Směr spojených rukou dává přibližně kolmici k jejich původnímu směru (v rozpažení).

Z loď se postupně vypouštějí jednotlivé plováky ve vzdálenosti 15-20 m nad prvním (horním) profilem. Tato vzdálenost dovoluje plováku, aby nabyl rychlost proudění. V okamžiku průchodu plováku horním profilem dá pozorovatel v tomto profilu signál pozorovateli v dolním profilu, který spustí stopky. Stopky vypíná v okamžiku průchodu plováku dolním profilem. Ze známé vzdálenosti obou pomocných profilů a změřeného času se určí povrchové rychlosti. Plováky pod dolním profilem sbírá posádka druhé loď. Je též vhodné, aby tato posádka sledovala chod plováků a pokoušela se odhadnout polohu plováku v měrném profilu (např. s pomocí fáborků připevněných na měřičském lanku), která je zapotřebí pro konstrukci polygonu rychlostí.

Plováky se vypouštějí z nejméně pěti, lépe sedmi až deseti bodů zhruba rovnoměrně rozmístěných napříč profilu. V každém místě je nutné vypustit nejméně tři plováky.

Vyhodnocení měření je popsáno výše. Provádí se jak vyhodnocení průtoku z celkového pole povrchových rychlostí, tak vyhodnocení průtoku z maximální povrchové rychlosti. V tomto případě se maximální povrchová rychlost bere jako průměrná rychlost ze tří nejrychlejších plováků.

Určení sklonu hladiny

Sklon hladiny se určuje nivelací. Délka měrného úseku má být cca dvojnásobek šířky koryta, tj. ca 100-120 m. Lze tedy v zásadě použít stejný úsek toku jako pro určení průtoku plovákovou metodou. Na břehu řeky se do dna zatlučou v pravidelných vzdálenostech kolíky; jeden z nich musí být v měrném profilu, kde se hydrometruje, a pásmem se změří jejich vzájemné vzdálenosti i celková délka úseku. Hlavy kolíků se zanivelují a poté se co nejrychleji (s ohledem na možnou změnu vodního stavu) odměří vzdálenost hlav kolíků od hladiny vody.

Vypočtené nadmořské výšky hladiny v jednotlivých bodech se vynesou a lineárně vyrovnají. Nadmořská výška hladiny v hydrometrickém profilu slouží jako vztažná hladina (vodní stav) pro průtok. Sklon hladiny se určí jako celkový (vyrovnaný) spád dělený celkovou délkou úseku.

Jako pevný bod slouží kříž na horním schodu vlevo přede dveřmi vstupu do objektu (kóta 365,586 m n. m.). Nivelační tah je nutné uzavřít. Protože není k dispozici podložka pod lať („žába“), je při přestavbách stroje nutné pečlivě vybírat místa postavení latě – doporučují se vrcholy kamenů na potahové stezce.



Nivelační stroj Meopta

Nivelační stroj Sokkia

Pro nivelaci jsou k dispozici dva stroje – Sokkia a Meopta. Zatímco Sokkia je poměrně nový stroj – automat, u něhož postačuje urovnání podle krabicové libely, starší Meoptu je nutné jednak urovnat podle krabicové libely, jednak *při každé záměře* dorovnávat podle libely nivelační.

S ohledem na poměrně velké zvětšení dalekohledu u stroje Sokkia a jeho značnou přesnost lze v zásadě všechny kolíky zanivelovat z jediného stanoviště. U stroje Meopta je nutné kolíky nivelovat nejméně ze dvou stanovišť.

Pokud pro nivelační lať není k dispozici krabicová vodováha, je třeba při měření používat klasického postupu – kývání latě a odečítání nejmenší hodnoty.

Hydrometrování – Kačák

Pro hydrometrování lze s výhodou využít lávky pro pěší. Měří se z její návodní strany, pro určení staničení lze po lávce natáhnout rozvinuté pásmo. Při měření je nutné dávat pozor, aby nedošlo k jeho posunu. Pro kontrolu vodního stavu je třeba do místa s pokud možno klidnou, pomalu proudící vodou (nebo lépe do úplavu) umístit pomocný vodočet.

Pro měření v tomto profilu se používá vrtule Ott typu C2. Tato vrtule má výměnné propelery; vzhledem k malým hloubkám je vhodné používat propeler průměru 30 mm.

Protože vrtule dává signál při každé otáčce, je nutné použít speciální čítač, který po nastavenou dobu načítá impulsy od vrtule. K dispozici je tzv. Hydročítač, jehož obsluha je následující:

zapnutí:

- tlačítko I se přidrží několik sekund, až se na displeji ukáže symbol „PP“ (výchozí stav)

nastavení časového intervalu:

- stisknutím tlačítka I se čítač přepne do módu nastavení času; na displeji se objeví standardní časový interval (00:30 - 0 minut, 30 vteřin)
- tlačítkem II nastavíme pozici, kterou chceme změnit (blikající číslice)
- opakovanými stisky tlačítka III nastavíme požadovanou číslici
- tlačítkem II nastavíme případnou další pozici atd.
- nastavování časového intervalu ukončíme tlačítkem I – na displeji se opět objeví „PP“.

měření:

- tlačítkem III spustíme načítání otáček. Po uplynutí nastaveného časového intervalu počítadlo přestává načítat a na displeji zobrazuje celkový počet otáček.
- tlačítkem I počítadlo vynulujeme a můžeme zahájit další měření.

V průběhu měření lze tlačítkem II aktivovat a zase vypnout zvukovou signalizaci. Vzhledem ke značné spotřebě bzučáku je nutné mít akustickou signalizaci zásadně vypnutou.

Nízké napětí baterie indikuje šipka v levém horním rohu displeje. Při měření je vhodné omezit prodlevy, protože počítadlo se po ca dvou minutách nečinnosti automaticky vypíná, což současně znamená, že po novém zapnutí je nastavený standardní časový interval 30 s a je tedy nutné znovu nastavovat čas.

Rozmístění měrných svislic je možné použít rovnoměrné, počet svislic by měl být nejméně 10. Stanovení svislice určíme jako průmět polohy soutyčí na pásmo. Hloubka vody ve svislici se určuje nastavením vrtule tak, aby její osa byla právě v hladině, hloubka se odečítá na stupnici soutyčí proti hraně přesuvného rukávu. Je nutné pamatovat na to, že stupnice soutyčí má nulu u dolního konce a jsou označeny celé decimetry. Pro jeden díl rukávu (délka 1 m) a čtení 115 tedy bude hloubka vody 15 cm.

Pro vlastní měření postačuje použití kratšího časového intervalu, optimálně přednastavených **30 s**. Při hloubkách mezi 4 cm a 7,5 cm lze použít pouze jednobodovou metodu, při hloubkách větších pak jakoukoliv jinou (tří nebo pětibodovou). Lze však využít i nestandardních rozmístění bodů za předpokladu, že body jsou od sebe vzdáleny nejméně o průměr propeleru a správně vyhodnotíme střední svislicovou rychlost. Při hloubkách mezi 3 a 4 cm měříme v jediném bodě zhruba uprostřed hloubky. Měříme jedenkrát v každém bodě.

Data se zapisují do standardního formuláře. Vždy je zapotřebí poznamenat číslo těla vrtule a číslo propeleru (jak výrobní, tak číslo jeho typu) a jim odpovídající kalibrační konstanty pro výpočet bodových rychlostí.

Vyhodnocení průtoku je popsáno výše.

Literatura:

Boiten, W.: Hydrometry. IHE Delft Lecture Note Series. A.A.Balkema, Rotterdam 2000

Hersch, R.W.: Streamflow Measurement. 2nd ed. E&FN SPON 1995

Kemel, M.: Hydrologie. Skripta FSv ČVUT. 3. vyd., Praha 1991

Kříž, V., Kupčo, M., Sochorec, R.: Měření průtoků. Účelová publikace HMÚ, HMÚ Praha 1979

Mattas, D.: Měření průtoků nestandardními metodami a v nestandardních podmínkách. Výzkum pro praxi 37, VÚV T.G.M. Praha 1998

Ott Messtechnik, Kempten - firemní literatura (prospekty, katalog)

Rantz, S.E. et al: Measurement and Computation of Streamflow. Vol. I, II. Geological Survey Water-Supply Paper 2175. US Gov. Printing Office, Washington 1982

Troskolanski, A.T.: Hydrometry - Theory and practice of hydraulic measurements. Pergamon Press 1960

Železnjakov, G.V.: Teorija gidrometrii. 2.vyd. Girometeoizdat, Leningrad 1976

Kalibrační rovnice vrtulí

SEBA F 1219

$$\begin{aligned}v &= 0,0147+0,1488n & n &\leq 0,58 \\v &= 0,0226+0,1351n & 0,58 &\leq n \leq 3,53 \\v &= 0,0339+0,1319n & n &\geq 3,53\end{aligned}$$

SEBA F 1220

$$\begin{aligned}v &= 0,0147+0,1488n & n &\leq 0,58 \\v &= 0,0226+0,1351n & 0,58 &\leq n \leq 3,53 \\v &= 0,0339+0,1319n & n &\geq 3,53\end{aligned}$$

u vrtulí SEBA je standardní časový interval měření, nastavený na čítači, roven $T = 40$ s

Ott C-2 č. těla 146994

propeler 1-161040

$$\begin{aligned}v &= 0,0113+0,0601n & 0,83 &\leq n \leq 5,92 \\v &= 0,0519+0,0532n & 5,92 &\leq n \leq 21,51\end{aligned}$$

propeler 2-161074

$$v = 0,0144+0,1027n \quad 0,45 \leq n \leq 21,91$$

propeler 5-161193

$$\begin{aligned}v &= 0,0230+0,0594n & 0,62 &\leq n \leq 7,27 \\v &= 0,0622+0,0540n & 7,27 &\leq n \leq 20,98\end{aligned}$$

propeler 6-19294

$$v = 0,0248+0,1042n \quad 0,45 \leq n \leq 21,51$$

u čítače používaného s vrtulí Ott je standardní časový interval nastaven na $T = 30$ s