VYUŽITIE INDIKÁTOROVEJ METÓDY PRE STANOVENIE PRIETOKU V OTVORENÝCH KORYTÁCH

Zuzana Danáčová[1], Michaela Danáčová[2], Katarína Kaňuková[2]

Abstrakt

Meranie prietoku je jednou z najdôležitejších činností hydrológie. Existuje viacero metód na stanovenie prietoku v otvorených korytách tokov, ale každá so sebou nesie riziko nepresnosti. Jednou z možných metód stanovenia prietoku v tokoch je indikátorová metóda s využitím injektovania roztoku. Tento spôsob merania je možné použiť bez ohľadu na tvar alebo veľkosť profilu koryta, keďže koncentráciu injektovaného roztoku môžeme merať z brehu. Využíva sa hlavne v podmienkach, kde nie je možné vykonať meranie ani hydrometrovaním ani pomocou ultrazvuku. Medzi krajiny, ktoré využívajú indikátorovú metódu, a dodnes ju aplikujú na tokoch, patrí hlavne Švajčiarsko, Nemecko a Kanada.

Na slovenských tokoch sme vykonali niekoľko experimentálnych meraní pomocou indikátorovej metódy. Bol zvolený jednorazový spôsob injektáže, pri ktorom nie sú potrebné špeciálne zariadenia a veľkosť prietoku nie je natoľko obmedzujúca, ako pri kontinuálnej injektáži. Skúsenosti získane z meraní nám vo viacerých prípadoch potvrdili poznatky viacerých autorov zo zahraničia, kde sa plnohodnotne využíva indikátorová metóda.

Kľúčové slová: prietok, vodivosť, jednorazová injektáž

1. Úvod

Spôsobov merania prietoku v otvorených korytách tokov je viacero pričom platí, že v praxi neexistujú prístroje ani metódy merania, ktoré by boli absolútne presné. Každá metóda je vhodná pre iné podmienky prúdenia a morfológie toku, a teda hydrológ sa musí rozhodnúť na základe vedomostí, skúseností a aj možností pre použitie jednej z nich.

Najpoužívanejšou metódou merania prietoku je hydrometrovanie (pomocou hydrometrickej vrtule), ktoré v dnešnej dobe čoraz viac nahrádza ultrazvukové meranie (pomocou prístroja ADCP). Jednou z metód stanovenia prietoku v tokoch je meranie indikátorovou metódou. Výhodou merania je, že injektovaný roztok môže byť meraný bez prebrodenia cez tok, a to hlavne v podmienkach, kde nie je možné vykonať meranie hydrometrovaním ani pomocou ultrazvuku.

V tomto príspevku sme chceli poukázať na možné využitie indikátorovej metódy na slovenských tokoch. Na základe výsledkov a skúseností z experimentálnych meraní sme upriamili pozornosť na možné chyby, ktorým by sme sa mali vyhnúť resp. opatrenia ako im predísť.

2. Indikátorová metóda

Využitie indikátorovej metódy má širší záber, je použiteľná nielen na stanovenie prietoku v otvorených korytách, ale aj postupovej doby. Ďalšie využitie tejto metódy merania je pri šírení znečistenia resp. rýchlosti nielen v povrchových vodách, ale predovšetkým pre podzemné vody. Takéto informácie nám napomáhajú pri riešení úloh súvisiacich s meraním kvality vody, pri riešení havarijných znečistení tokov, ako aj úloh súvisiacich s právnymi a technickými aspektmi ochrany vôd pred znečistením.

Čo sa týka otvorených korýt, vhodné sú hlavne v oblastiach, kde pri bystrinnom prúdení dochádza vplyvom vysokej turbulencie k rýchlemu zmiešaniu indikátora [7]. Taktiež v povodiach s rozlohou do 100 km^2, kde sú nízke hodnoty prietokov (nízke vodné stavy) a v obdobiach malej vodnosti (kde meranie je problematické) .

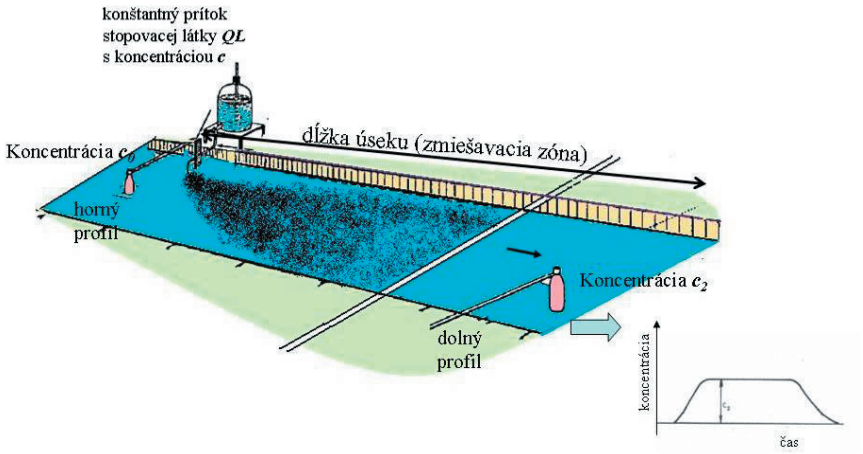
Spencer (citované v [6]) uvádza, že prvé meranie prietoku indikátorovou metódou v otvorených korytách tokov bolo úspešne vykonané v roku 1893 pod vedením Schlösinga. Na území Slovenska resp. Československa boli vykonané merania tohto druhu pracovníkmi ostravskej pobočky ČHMÚ (Sochorec a kol.) v rokoch 1968 – 1976, kedy prebiehal prvotný výskum v tejto oblasti.

Meranie prietoku indikátorom je možné uskutočňovať dvoma spôsobmi injektáže:

kontinuálne (Obr. 1), jednorazovo (Obr. 2).

Pri kontinuálnej injektáži sa pridáva do profilu 1 (horný profil) konštantný prítok stopovacej látky (indikátor) Q_L s koncentráciou c. Po dokonalom premiešaní a ustálení koncentrácie sa určí hodnota c_2 v meranom profile 2 (dolný profil). Ak obsahuje prúdiaca voda daný roztok v koncentrácii c_0 už nad profilom 1 (horný profil), bude platiť rovnica kontinuity prietoku stopovacej látky v profiloch 1 a 2:

$$Q.c_0 + Q_L.c = (Q + Q_L).c_2 \qquad \Rightarrow \qquad Q = Q_L \frac{c - c_2}{c_2 - c_0} \tag{1}$$

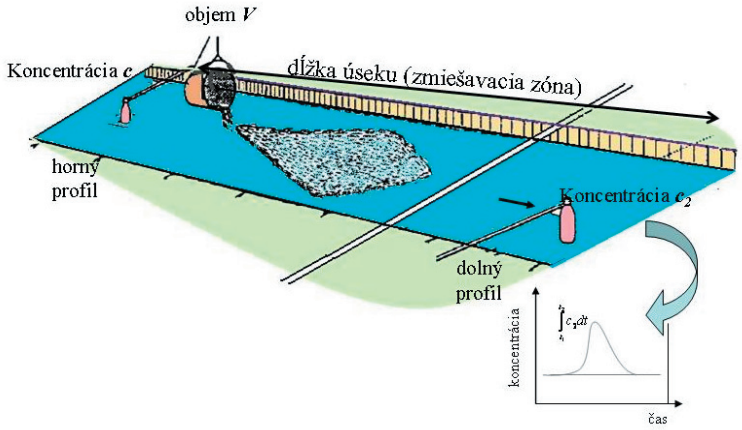


Obr. 1: Konštantná injektáž roztoku [5]

Pri jednorazovej injektáži roztoku s objemom V a koncentráciou c v profile 1 (horný profil) vzniká v úseku tzv. mrak, ktorého prechod v profile 2 (dolný profil) sa zisťuje meraním časovej zmeny koncentrácie $c_2=f(t)$. Vychádzajúc z množstva roztoku, ktorý bol injektovaný v profile 1 (horný profil) a toho, ktorý vytiekol z profilu 2 (dolného profilu) platí:

$$V.c = Q\int_{t_1}^{t_2} c_2 dt \qquad \Rightarrow \qquad Q = \frac{V.c}{\int_{t_1}^{t_2} c_2 dt} \tag{2}$$

Plocha rozdelenia koncentrácií v dolnom profile je hodnota integrálu v menovateli (Obr. 2)



Obr. 2: Jednorazová injektáž roztoku [5]

V oboch prípadoch je indikátor aplikovaný na začiatku stanoveného úseku v smere prúdenia. Na konci sledovaného úseku sa zisťuje jeho koncentrácia v prúdiacej vode (miera zriedenia), ktorá je podstatným údajom pre výpočet prietoku *Q*.

3. Experimentálne merania na slovenských tokoch

Na vybraných tokoch (Belá, Štiavnica, Ľanovianka, Vydrica) sme vykonali niekoľko experimentálnych meraní pomocou indikátorovej metódy. Bol zvolený jednorazový spôsob injektáže, pri ktorom nie sú potrebné špeciálne zariadenia a veľkosť prietoku nie je natoľko obmedzujúca ako pri kontinuálnej injektáži.

Pri týchto meraniach je potrebná spolupráca viacerých ľudí a zvyčajne sa postupuje v nasledujúcich bodoch:

A. výber indikátora, príprava použitých prístrojov a ich nastavenia

B. stanovenie dĺžky zmiešavacieho úseku

C. zostrojenie kalibračnej krivky

D. príprava injektážneho roztoku

E. meranie priechodu mraku

F. stanovenie prietoku

Podrobný popis jednotlivých bodov merania indikátorovej metódy boli uvedené v [1].

3.1 Výsledky stanovenia prietoku indikátorovou metódou

Indikátorová metóda je založená na učení, poznatku procesu zmiešania roztoku v prúde toku. Ako indikátor sme vo všetkých prípadoch aplikovali roztok chloridu sodného (NaCl), ktorý sme jednorázovo injektovali do toku. K jeho aplikácii sme pristúpili z viacerých dôvodov. Je hygienicky nezávadný, ľahko identifikovateľný aj v malých koncentráciách pomocou elektronického konduktomera, nereaguje s vodou ako aj v nej existujúcimi látkami a je cenovo prijateľný.

Treba poznamenať, že pri prvých meraniach sme sa nevyhli chybám, ktoré sme robili z neskúsenosti ako i momentálnych podmienok (Belá – vysoké prietoky spôsobené topením

snehu, Iľanovianka – skrytý bočný prítok). Išlo skôr o experiment vzhľadom na určenie koncentrácie injektážneho roztoku a dĺžky zmiešavacieho úseku.

Tab. 1: Ukážka výsledkov stanovenia prietoku indikátorovou metódou [1].

Názov toku	Prietok [l/s]						
	Hydrometrovanie - hydrometrickou vrtuľou	Indikátorová metóda (indikátor – NaCl)					
		1. meranie		2. meranie		3. meranie	
		sonda č.1	sonda č.2	sonda č.1	sonda č.2	sonda č.1	sonda č.2
Iľanovianka (16.4.2009)	236	328,4 (-39,1%)	372,1 (-57,6%)	282,1 (-19,5%)	306,9 (-30,1%)	305 (-29,2%)	330,4 (-40%)
Štiavnica (16.4.2009)	3300	2761,2 (-16,3%)	2557 (-22,5%)	Nezameraný -	3188,5 (-3,4%)	2767,4 (-16,1%)	2340,33 (-29,1%)
Vydrica (16.9.2009)	32	33,42 (-4,4%)	35,11 (-9,7%)	43,38 (-35,6%)	43,71 (-35,6%)	34,79 (-8,7%)	35,98 (-12,4%)
Vydrica (30.9.2009)	20	18,99 (-5,5%)	18,95 (-5,2%)	18,71 (-6,50%)	17,84 (-10,8%)	18,95 (-5,3%)	18,44 (-7,8%)

Pozn. V zátvorke je uvedený percentuálny rozdiel medzi hodnotami prietoku stanovenými indikátorovou metódou vzhľadom k prietoku stanovenom hydrometrovaním

Za zmienku stojí, že po správnosť stanovaní všetkých krokov merania sa naša chyba pri posledných meraniach (napr. tok Vydrica, z dňa 30.9.2009) pohybovala vzhľadom k hodnote prietoku stanovenom hydrometrovaním maximálne do 11 % (Tab. 1).

V nasledujúcej časti uvedieme niekoľko dôležitých poznatkov a skúsenosti, ktoré sme získali pri meraní pomocou indikátorov.

3.2 Poznatky a skúsenosti získané z meraní

Pri prvých experimentálnych meraniach sme sa snažili získať najmä skúsenosti s odhadom koncentrácie injektážneho roztoku, ktorá musí byť dostatočne vysoká. Ide o zabezpečenie zvýšenia elektrickej vodivosti v meranom profile, ktoré však nesmie prekročiť stanovené hygienické normy. Moore uvádza, že ideálna koncentráciu roztoku dosiahneme pri pomere 1 $m^3.s^{-1}$ k 1 kg soli, ďalšie štúdie vychádzajú zo zabezpečenia 20 % roztoku [7].

Veľmi dôležité pri príprave roztoku je dokonalé premiešanie, aby došlo k úplnému rozpusteniu soli. Práve tu dochádza k potenciálnej chybe v prípade ak nám zostane v nádobe nerozpustená soľ. Preto je potrebné kontrolné meranie vodivosti pripravovaného roztoku. Vplyv na rozpustnosť soli má teplota vody, s čím sme sa stretli na jar na horských tokoch (Belá, Štiavnica, Iľanovianka), kde ich teplota sa pohybovala okolo 3 °C a nedochádzalo tam k dokonalému rozpusteniu soli, čo spôsobilo ovplyvnenie hodnoty stanovenia prietoku.

Pri jednorazovej injektáži je dôležité vyliať pripravený roztok do toku v počiatočnom profile (ideálne v zúženom mieste, ak to podmienky dovoľujú) naraz celý objem do prúdnice, nesmie dôjsť ku prerušenie prípadne zbytočnému oplachovaniu nádoby. V opačnom prípade dostaneme viacvrcholovú „soľnú vlnu“.

Meranie prechodu soľného mraku je nutné vykonávať nepretržite (ideálne v 1 sekundovom intervale), kým sa vodivosť neustály resp. nevráti do pôvodných (pozaďových hodnôt). Typická zaznamenaná „soľná vlna“ má asymetrický tvar s prudkým nárastom, miernym poklesom a s pozvoľným prechodom do počiatočných hodnôt. Na tvar tejto vlny má vplyv dĺžka zmiešavacieho úseku, ale taktiež aj umiestnenie vodivostných sond, koncentrácia injektážneho roztoku. Ideálne je dosiahnutie kulminácie soľnej vlny v hodnote o 50 % až 100 % vyššie od pozaďovej hodnoty elektrickej vodivosti [7].

Pri voľbe zmiešavacieho úseku musíme taktiež overiť či nedochádza k zmene vodivosti a to hlavne v intraviláne, kde je častá existencia skrytých prítokov. Taktiež je nevhodné aplikovať túto metódu na tokoch s vysokým výskytom vegetácie v koryte.

Dĺžka zmiešavacieho úseku musí byť taká, aby došlo k dokonalému premiešaniu roztoku s vodným prúdom v celom meranom profile. Prihliadať musíme na druh prúdenia v korytách tokov, na javy, s ktorými je prúdenie spojené, ako sú napríklad víry, ale aj na geometriu koryta. Z našich skúseností práve pri určovaní zmiešavacieho úseku dochádza k najčastejšej chybe merania a z tohto dôvodu je treba mu venovať dostatočnú pozornosť.

3.3 Stanovenie dĺžky zmiešavacieho úseku

Pri určovaní dĺžky zmiešavacieho úseku (L) musíme mať na zreteli, že musí prísť k premiešaniu roztoku s vodným tokom v celom meranom profile. Pri stanovení tejto vzdialenosti je možné vychádzať z niekoľkých empirických vzťahov od rôznych autorov, kde by sa mala uplatniť zmiešavacia rovnica. Vychádza sa priamo z charakteristík koryta.

Vzťahy na stanovenie dĺžky zmiešavacieho úseku by mali zohľadňovať vlastnosti koryta, jeho geometriu a premenlivosť prúdenia v uvažovanom úseku. Dĺžka tohto úseku by mala byť minimálne 25násobok šírky toku ([7], [2]) alebo:

$$L \geq 0{,}13.\frac{B^2}{\overline{H}}C.\frac{0{,}7C+6}{g} \tag{3}$$

Hull na základe svojho výskumu stanovil vzťah [3]:

$$L = 3B\sqrt{\frac{B}{\overline{H}}} \tag{4}$$

Kde: L – vzdialenosť profilov [m]

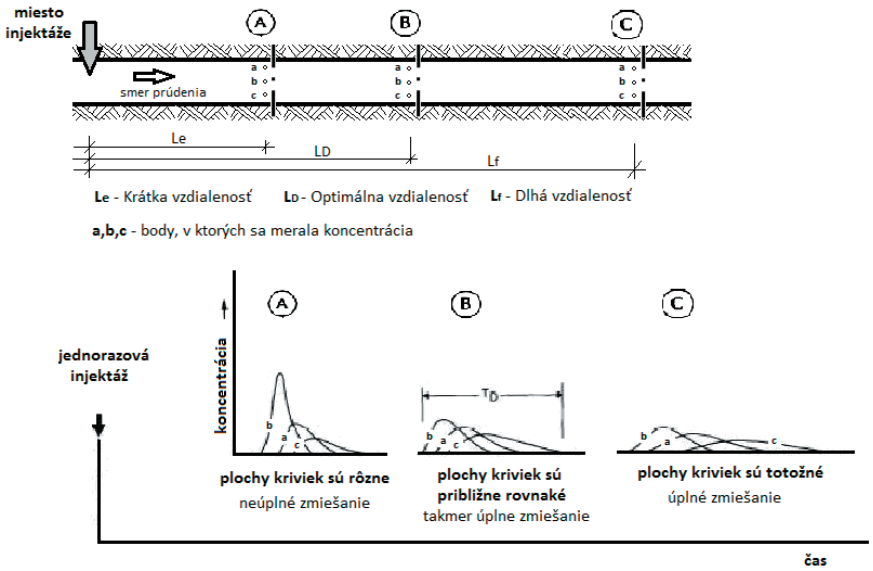
B - priemerná šírka hladiny v uvažovanom úseku [m]

$\overline{H}$ - priemerná hĺbka vody v úseku [m]

C – Chézyho rýchlostný súčiniteľ [m.s^{-1}]

g – gravitačné zrýchlenie [m.s^{-2}]

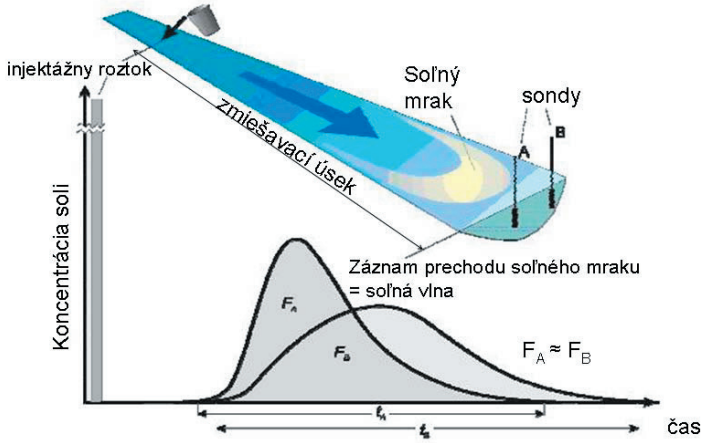
Na krátkom zmiešavacom úseku nedochádza k úplnému zmiešaniu v celom priečnom profile. V dôsledku toho je koncentrácia indikátora najvyššia v strede koryta (v prúdnici) oproti koncentrácii pri obidvoch brehoch. K tejto chybe určenia dĺžky dochádza pomerne často, je nutné mať vždy na zreteli model rýchlostného poľa. Pri optimálnej vzdialenosti dochádza k najrovnomernejšiemu zmiešaniu a aj k približnej rovnosti plôch pod krivkami koncentrácii v čase (Obr. 3). Na optimálnej dĺžke (L_D) zmiešavacieho úseku je možné dosiahnuť uspokojivé hodnoty meraného prietoku, kde dochádza približne k 95 % zmiešaniu indikátora s prúdom toku. Optimálna dĺžka (L_D) je najuspokojivejšia, pretože nie je ani príliš krátka (L_e) ani príliš dlhá (L_f). Napriek tomu, že plochy jednotlivých kriviek nie sú úplne totožné, indikátory sú dobre zmiešané a poskytujú dobré celkové hodnoty prietokov [8].



Obr. 3: Meranie koncentrácie v troch rôznych bodoch priečneho profilu pri odlišných dĺžkach úsekov [8].

Ak je dĺžka úseku pri jednorazovej injektáži dostatočná dochádza k optimálnemu premiešaniu. Nasvedčujú tomu aj skoro identické plochy kriviek koncentrácií. Takto je možné dosiahnuť presnejšie stanovenia prietokov. Zväčšením optimálnej dĺžky L_D na dĺžku L_f sa predlžuje čas merania a tvar mraku je pretiahnutejší [8].

Dĺžku zmiešavacieho úseku sme v našom prípade určovali na všetkých tokoch ako 25násobok šírky koryta toku [2], [7]. Správnosť určenia zmiešania roztoku v toku sme overovali, a to porovnaním plôch meraných koncentrácii „soľných vĺn“ (Obr. 4). Preto je nevyhnutné, aby sme pri meraní v koncovom priečnom profile umiestnili minimálne dve sondy. Ide o jeden so spôsobov ako predísť k možnej chybe pri následnom stanovení prietoku a interpretácii výsledkov.



Obr. 4: Schéma zachytenia prechodu soľného mraku pomocou sond [5].

Iný spôsob ako si overiť správnosť určenia dĺžky zmiešavacieho úseku je priamo v teréne využitie farbiva (napríklad potravinárskeho, ktoré neovplyvní vlastnosti roztoku), a ktoré vmiešame do injektážneho roztoku. Vizuálne potom kontrolujeme, či prišlo k premiešaniu po celej šírke koryta v stanovenom mernom profile.

Na základe experimentálnych meraní indikátorovej metódy pre stanovenie hodnoty prietoku možno konštatovať, že je použiteľná na slovenských tokoch. Treba však venovať pozornosť

dôležitým bodom v meraní a vyhnúť sa jednotlivým chybám v meraniach, najčastejšie dochádza k nesprávnemu určeniu zmiešavacieho úseku.

4. Záver

Na voľbu najvhodnejšieho spôsobu stanovenia prietoku má vplyv niekoľko faktorov. Prihliadať musíme na druh prúdenia v korytách tokov (víry, turbulentné prúdenie a podobne), taktiež na fyzikálne vlastnosti vody (množstvo splavenín a plavenín, plávajúce predmety) a v neposlednom rade na požiadavky na presnosť a opakovateľnosť merania, merací rozsah a miesto merania.

V príspevku sme sa zamerali na poukázanie využitia indikátorovej metódy na slovenských tokoch a chybám ktorých sa pri tomto meraní možno dopustiť. Pri experimentálnych meraniach bola použitá jednorazová injektáž za použitia soľného roztoku. Základom tejto metódy je znalosť koncentrácie soľného roztoku (NaCl), ktorý sa pridáva do prúdiacej vody. Ten sa následne zmieša s vodou v toku, takže stupeň zriedenia je aj mierou množstva rozpúšťadla čiže prietoku. Skúsenosti získané z meraní nám vo viacerých prípadoch potvrdili poznatky viacerých autorov zo zahraničia, kde sa plnohodnotne využíva táto metóda. Musí byť vhodne zvolená tak koncentrácia injektážneho roztoku ako i dĺžka zmiešavacieho úseku.

Na záver môžeme zhodnotiť, že použitie indikátorovej metódy je možné i na našich tokoch, ktoré spĺňajú požiadavky stanovené pre túto metódu. Treba však venovať pozornosť dôležitým bodom v meraní a vyhnúť sa jednotlivým chybám v meraniach. Táto metóda vyžaduje však ešte stálu pozornosť a potrebu viacerých meraní, ktoré by mali napomôcť k rozhodovaniu o adekvátnosti jej využitia na našich tokoch.

Literatúra

[1] DANÁČOVÁ, Z. – KAŇUKOVÁ, K. – DANÁČOVÁ, M., 2009. Experimentálne merania pre stanovenie prietoku v otvorených korytách tokov pomocou indikátorovej metódy, 20. konferencia mladých hydrológov, Bratislava SHMÚ, 2009, s.12.

[2] DAY, T. J., 1977. Field procedures and evaluation of a slug dilution gauging method in mountain streams. Journal of Hydrology (New Zealand), 16, pp 113–133.

[3] HULL, D. E., 1962. Dispersion and persistence of tracer in river flow measurements. Richmond, Calif., California Research Corporation, 1962. 22 pp.

[4] KILPATRICK, F. A. – COBB, E. D, 1985. Measurement of discharge using tracers. Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey.

[5] LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG, 2002. Arbeitsanleitung Pegelund Datendienst Baden-Württemberg, Durchflussermittlung mit Salzverdünnungsmethod.

[6] KÄSS, W. 1992. Lehrbuch der Hydrogeologie 9, Geohydrologische Markierungstechnik. Gebrüder Bornträger Berlin, Stuttgart. 519 s.

[7] MOORE, R. D., 2004. Introduction to Salt Dilution Gauging for Streamflow Measurement: Part 1. In: *Streamline Watershed Management Bulletin Vol.7 / No*. 4 Winter 2003/04.

[8] YOTSUKURA, N., – KILPATRICK, F. A , 1973. Tracer simulation of soluble waste concentration. American Society of Civil Engineers, Journal of Environmental Engineering Division, v. 99, No. EE4.

Kontakty na autora

1 Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava, e-mail: zuzana.danacova@shmu.sk

2 Stavebná fakulta, Katedra vodného hospodárstva krajiny, Bratislava, e-mail: michaela.danacova@stuba.sk, katarina.kanukova@gmail.com