



VOOLUHULGA MÕÕTMISE JUHEND

Täitjad: Tallinna Tehnikaülikooli Keskkonnatehnika instituudi dots. Alvina Reihan, prof. Enn Loigu

Töö finantseeriti SA Keskkonnainvesteeringute Keskuse „Veemajandus“ programmist

Tallinn 2012

Sisukord	
1. Vooluhulga mõõtmine	2
1.1. Vooluhulga mõõtmise meetodid	2
1.1.1. Vooluhulga mõõtmine mahumeetodil	3
1.1.2. Vooluhulga mõõtmine tiivikuga	3
1.1.3. Vooluhulga mõõtmine pinnaujukite abil	7
1.1.4. Vooluhulga määramine akustiliste mõõteriistade abil	9
1.2. Vooluhulga mõõtmine ökoloogilise miinimumvooluhulga kontrollimiseks	9
1.3. Igapäevaste vooluhulkade määramine.....	11
Kirjandus	12
Lisa 1. Mõõdetud vooluhulga arvutusvorm	13

1. VOOLUHULGA MÕÕTMINE

Vooluhulk Q on vee maht, mis läbib veesängi ristlõiget ajaühikus [1], jõgede puhul on mõõtühikuks m^3/s või l/s . Jõgedes/ojades määratakse vooluhulk voolu keskkiiruse v (m/s) ja ristlõikepinna A (m^2) kaudu (valem 1.1):

$$Q = v \cdot A \quad (1.1)$$

Q - vooluhulk, m^3/s

v - voolukiirus (m/s)

A - voolu ristlõike pindala (m^2).

Vooluhulga mõõtmise andmed aitavad koostada hüdroloogilisi prognoose ning saada ülevaadet riigi veevarudest, nende seisundist ja kasutusvõimalustest. Andmeid on vaja ka nt paisude jm vesiehitiste projekteerimiseks ja ehitamiseks, laevasõiduohutuse tagamiseks ning ka jõgede reostuskoormuse määramiseks [5].

Hüdroloogilisi vaatlusi alustati Eestis juba 1867. aastal Tartus Suur-Emajõel. Vooluhulga süstemaatiline määramine algas alles 1902. aastal Narva jõel tänaseni töötavas Vasknarva hüdrometriaajas. Automatiseeritud vaatlused ligi 50 jõel said aga alguse 1922. aastal Eesti Sisevete uurimise Büroo asutamisega. Seetõttu on vaatlusread pikad ning väikejõgede hüdroloogiline seire üks täielikumaid Euroopas [4; 5] .

Käesoleval ajal toimuvad vaatlused Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudi (edaspidi EMHI) korraldusel. Eesti hüdroloogiline vaatlusvõrk koosneb 54 hüdrometriaajasest (HJ) [5].

1.1. Vooluhulga mõõtmise meetodika

Vooluhulga mõõtmiseks on mitu võimalust, enamasti kasutatakse hüdromeetrilisi ja hüdraulilisi meetodeid. Hüdromeetriliste meetodite puhul leitakse kõik vajalikud suurused otsese mõõtmisega ning vooluhulk määratakse mõõdetud kiirusjaotuse ja voolu ristlõikepinna kaudu või mahu- või kaalumetodil. Hüdraulilised meetodid tuginevad hüdraulika seaduspärasustel: vooluhulk mõõdetakse mõõteülevoolude või -rennide abil. [2; 8]

1.1.1. Vooluhulga määramisel mahumeetodiga tõkestatakse vool ja juhitakse mõõteanumasse ning stopperiga mõõdetakse anuma täitumisaeg t . Vooluhulk arvutatakse järgmise valemiga (valem 1.2):

$$Q = \frac{W}{t}, \quad (1.2)$$

kus

W on anuma maht (m^3);

t on anuma täitumisaeg (s),

kusjuures mõõtmisvea vähendamiseks peab anumasse mahtuma vähemalt 10 sekundi vesi. Tehakse viis mõõtmist ja võetakse neist keskmine [2; 8]. Mahumeetod ei sobi ökoloogilise vooluhulga mõõtmiseks, sest mõõdetavad vooluhulgad on suhteliselt suured.

1.1.2. Vooluhulga tiivikuga (joonis 1.1.) mõõtmisel, nn pindala-kiirus meetodil, valitakse püsivate kallastega sirgel sängilõigul ristprofiil (lävend), mis oleks võimalikult korrapärase kujuga, taimestikuvaba ja ilma seisva vee tsoonideta (nn surnud vesi – ingl. dead water [1]) ning vastuvoolu aladeta. Vajadusel tuleb mõõtmislävendi ettevalmistada, so puhastada ja korrastada nii, et säng on piki voolu (pikkus vähemalt kaheksa maksimumsügavust) enam-vähem ühesugune. Vooluhulga mõõtmine algab lävendi sügavuste mõõtmisega¹ (mõõtevarda, käsi-, raskus- või kaja-loega; cm, m). Selleks tõmmatakse risti voolu üle jõe jaotistega tross. Sügavusi mõõdetakse, sõltuvalt jõe laiuusest, 5-30 vertikaalis. [2; 8].

¹ Vee sügavuseks loetakse veepinna ja põhja vahelist püstvahekaugust.



Joonis 1.1. Hüdromeetriiline labatiivik (firma Ott) ja akustiline Doppleri efekti põhinev kiiruse mõtja (Acoustic Doppler Velocimeter/ Flow Tracker, SONTEK firma)

Voolukiiruse mõõtmiseks kasutatakse mitut tüüpi hüdromeetriilisi tiivikuid (joonis 1.1.). Lävendis valitakse kiirusvertikaalid, milles mõõdetakse mitmel sügavusel voolukiirust (tavaliselt on nad ühesuuruste vahekaugustega). Kiirusvertikaalide arv sõltub nii jõe laiusest kui ka mõõtmismeetodist: detailmõõtmisel on see 10–15, põhimeetodi korral (kui lävend on tuntud) võib vertikaale kaks korda vähem olla, kuid mitte alla viie. Kiiruspunktide arv vertikaalil oleneb voolu sügavusest h ning sellest, kas säng on vaba, veetaimi täis või kaetud jääga. Vabasängis, kui voolu sügavus $h > 1$ m, mõõdetakse kiirust viies sügavuspunktis: „veepinnal“, kusjuures tiiviku laba peab olema 1–2 cm vee all; sügavustel $0,2h$, $0,6h$, $0,8h$ ning „põhjas“ – laba 2–3 cm põhjast kõrgemal. Näiteks sügavuse puhul 1 m kinnitatakse tiiviku telg järgmiselt: $0,2 h = 1,00 \times 0,20 = 0,20$ m veepinnast, või $1,00 - 0,20 = 0,80$ m põhjast. Kui jõe sügavus $h < 1$ m, võib voolukiirust mõõta kolmes ($0,2h$, $0,6h$, $0,8h$), kahes ($0,2h$, $0,8h$) või ühes ($0,6h$) sügavuspunktis. Kinnikasvanud sängis, kus veetaimestik tuleb enne vooluhulga mõõtmist kogu jõe laiuses ning lävendist üles- ja allavoolu 5–10 m (sõltuvalt veejuhtme suurusest) ulatuses välja niita või jääkattega sängis piisab kolmest kiiruse mõõtmisest sügavusel: $0,15h$, $0,5h$ ja $0,85h$ ning sügavusel $h < 0,4$ m - ühes punktis $0,5h$ [8]. Ebatasasel, kruusaklibustikulisel põhjal tuleb tiiva vigastuste vältimiseks tiiviku telg asetada natuke kõrgemale, et põhja mööda veerevad kivikised vastu tiiba ei puutuks. Kui tiivik on asetatud vajalikku sügavuspunkti, siis oodatakse 1-2 signaali, ja alles siis lastakse stopper

käima ja alustatakse signaalide lugemist. Stopperi seiskamine toimub signaali lõpul. Voolukiruse mõõtmine toimub 60 sek või 100 sek kestel. Väikeste voolukiiruste puhul, kui tuleb ainult 1 või 2 sigannli, tuleb mõõtmist jätkata kuni kolmanda signaalini. Kiiruste mõõtmiste tulemused saab kirja panna spetsiaalsesse tabelisse, võimalik vorm on lisatud EXEL tabelina (lisa 1).

Vooluhulga mõõtmine talvel. Jääl lubatakse töötada, kui jää paksus on vähemalt 10 cm. Jääaluse voolu sügavuseks loetakse jää või lobjaka aluspinna ja põhja vaheline kaugus Jääajal igal kiirusvertikaalil raiutakse jäässe pikliku kujuga jääauk, et tiivikut saaks alla lasta. Kui vesi voolab jääl, mõõdetakse vooluhulk eraldi jää all ja jää peal [2; 8].

Vooluhulga arvutamiseks mõõtmisandmete põhjal määratakse kõigepealt kiirusvertikaalide vaheliste elavlõikeosade pindalad (planimeetri abil või arvutades kolmnurkade või trapetsite pindalad, joonis 1.2). Siis arvutatakse kiirusvertikaalide keskkiirused (*valem 1.3;1.4; 1.5; 1.6*):

$$\text{vabasängis 5 mõõtmispunkti korral} \quad u_k = 0,1(u_{vp} + 3u_{0,2} + 3u_{0,6} + 2u_{0,8} + u_p), \quad (1.3)$$

$$\text{vabasängis 3 mõõtmispunkti korral} \quad u_k = 0,25(u_{0,2} + 2u_{0,6} + u_{0,8}), \quad (1.4)$$

$$\text{vabasängis 2 mõõtmispunkti korral} \quad u_k = 0,5(u_{0,2} + u_{0,8}), \quad (1.5)$$

$$\text{vabasängis ühe mõõtmispunkti korral} \quad u_k = u_{0,6}, \quad (1.6)$$

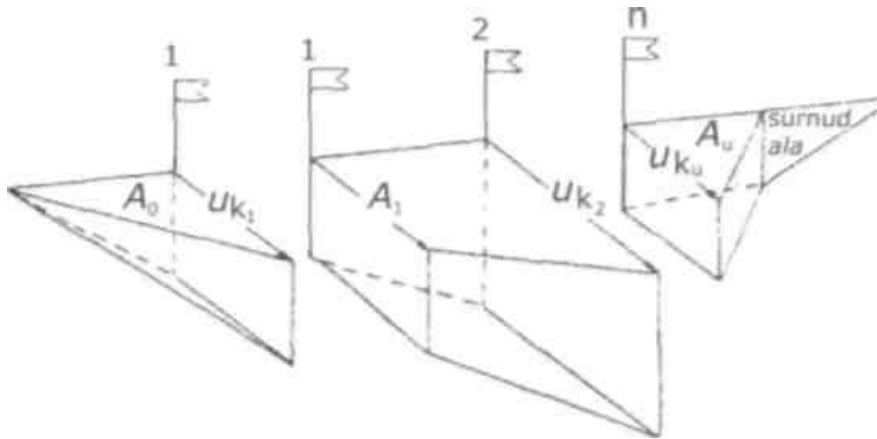
kus

u_k on keskkiirused vastaval sügavustel;

$u_{0,2}, u_{0,6}, u_{0,8}$ on keskkiirused vastavatel sügavustel;

u_{vp} on keskkiirus veepinnal;

u_p on keskkiirus põhjas [2; 8] .



Joonis 1.2. Vooluhulga arvutuskeem [2].

Täis kasvanud või jääga kaetud sängi korral arvutatakse kiirusvertikaalide keskiirused

$$\text{viie mõõtmispunkti korral: } u_k = 0,1(u_{vp} + 2u_{0,2} + 2u_{0,4} + 2u_{0,6} + 2u_{0,8} + u_p), \quad (1.7)$$

$$\text{kolme mõõtmispunkti korral: } u_k = 0,25(u_{0,15} + 2u_{0,5} + u_{0,85}); \quad (1.8)$$

$$\text{kahe mõõtmispunkti korral: } u_k = 0,5(u_{0,2} + u_{0,8}); \quad (1.9)$$

$$\text{ühe mõõtmispunkti korral: } u_k = 0,9u_{0,5}, \quad (1.10)$$

kus

u_k on keskkiirused vastaval sügavustel;

u_{vp} on keskkiirus veepinnal;

u_p on keskkiirus põhjas. [2; 8]

Vooluhulk arvutatakse järgmise valemiga (valem 1.11):

$$Q = k u_{k1} A_0 + \frac{1}{2} (u_{k1} + u_{k2}) A_1 + \dots + \frac{1}{2} (u_{kn-1} + u_{kn}) A_{n-1} + k u_{kn} A_n, \quad (1.11)$$

kus

$u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kn}$ on kiirusvertikaalide keskkiirused;

A_0, A_1, \dots, A_n on vooluristlõike vertikaalivahelised osapinnad;

k on tegur, mille väärtus oleneb kalda iseloomust (vt Tabel 1.1.) [2; 8] .

Tabel 1.1. Teguri k väärtused

lauge kallas	$k = 0,7$
järsk kallas või ebatasane sein	$k = 0,8$
sile betoonsein	$k = 0,9$
kui kalda ääres on veeseisva tsoon	$k = 0,5$

Voolu ristlõikepindala arvutatakse valemiga (valem 1.12):

$$A = A_0 + A_1 + \dots + A_n = \frac{h_0 + h_1}{2} l_1 + \frac{h_1 + h_2}{2} l_2 + \dots + \frac{h_{n-1} + h_n}{2} l_n, \quad (1.12)$$

kus

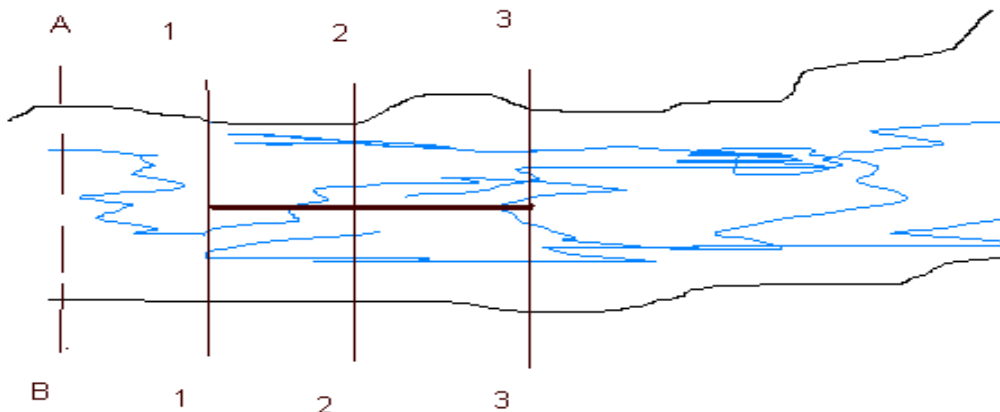
$h_1 \dots h_n$ on kiirusvertikaalide sügavused;

$l_1 \dots l_n$ on kiirusvertikaalide vahekaugused, mis on tavaliselt ühesuurused (v.a kaldaäärsed lõigud veemõõtepostide lävendites, kus kiirusi mõõdetakse alati kindlates vertikaalides – nende pikkus oleneb jõe veetasemest) [2; 8].

1.1.3. Kui vooluhulka tiivikuga mõõta ei saa, näiteks jäämineku ajal, võib voolukiirust määrata pinnaujukite abil. Mõõdetakse aega, mis ujukil kulub teatud kindla vahemaa läbimiseks. Katset korratakse 3-4 korda või kuni tulemused on suhteliselt sarnased. Pinnaujukiteks võib kasutada puitkettad paksusega 3-5 cm, läbimõõduga 10-5 cm.

Mõõtmiseks valitakse sirge jõelõik, mille pikkus oleks selline (L), et ujuk läbiks vahemaa mitte vähem kui 10 sekundiga. Otstarbekam määrata jõeosa pikkust ümmarguse arvuga, 10 m, 20 m, 30 m jne, ning pikkust saab määrata kas mõõdulindiga või ruletiga. Jõeosa otsad märgitakse kaldatähistega kolm ristsihti, millest keskmine (2) on mõõtmislävend (joonis

1.3.). Ujukid (5–10 tükki) lastakse vette 5–10 meetrit ülemisest sihist ülesvoolu nii (stardikoht AB) , et nad jaguneksid võimalikult ühtlaselt kogu mõõtmislävendi ulatuses.



Joonis 1.3. Voolukiiruse määramine pinnaujukite abil. AB – stardikoht.

Iga ujuki liikumisaeg t mõõdetakse stopperiga ning tehakse kindlaks koht, kus ta lävendit läbis (selleks tõmmatakse üle jõe jaotistega tross või kasutatakse geodeetilisi mõõteriistu) [3; 8] . Näiteks: äärmiste sihtide vahekaugus on 50 m, ujuki käigu kestus sellel vahemaal on 38 sek. Keskmise kiirus arvutatakse: $50 \text{ m} : 38 \text{ sek.} = 1,32 \text{ m/sek.}$

Viie (kümme) ujuki voolukiirusest arvutatakse keskmine. Kui üksiku ujuki kiirus erineb keskmisest kiirusest rohkem kui 10%, siis keskmise arvutamisel seda kiirust ei arvestata. Tegelik vooluhulk leitakse valemiga (valem 1.13):

$$Q = K Q_f, \quad (1.13)$$

kus parandustegur K määratakse samas lävendis korraldatud ujuk- ja tiivikmõõtmise võrdlusest või arvutatakse valemist (valem 1.14; 1.15):

$$K = \frac{C}{C+8} \quad (1.14)$$

$$\text{või} \quad K = 0,77 + 0,043 \sqrt{\frac{C}{g} - 3,8}, \quad (1.15)$$

kus

C on Chézy moodul [9];

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ on raskuskiirendus [2; 8].

Pinnaujukitega saadud kiirus on tegelikult keskmisest kiirusest suurem. Et leida jõe keskmine kiirus, tuleb saadud kiirus korrutada teatud teguriga, mis on väiksem kui 1, hinanguliselt see võib olla 0,8-0,9.

1.1.4. Vooluhulga määramine akustiliste mõõteriistade abil põhineb akustilisel kiirusmõõturil.

Kahlates või silda mööda üle jõe veetav vooluhulgamõõtur mõõdab voolukiirused ja voolu ristlõikepinna ning arvutab vooluhulga [2; 8]. Voolumõõturiga (*Flow Tracker*, *joonis 1.1*) mõõdetakse voolukiirusi analoogselt tiivikuga mõõtmistele, vahe on sellest, et iga mõõdetud parameeter (laius, sügavus, voolukiirused iga sekundi järel vertikaalidel jne) salvestatakse automaatselt. Voolumõõtur mõõdab ja arvutab mõõteperioodi keskmise kiiruse ja mitmesugused kvaliteedikontrolliks vajalikud andmed (nt standardhälve, voolu suund mõõteseadme suhtes). Mõõtmisviga ei ületa üht protsenti.

Vooluhulga määramisel mullkardina abil on ujukiteks mõõteprofiili põhja pandud mulgustatud torust tõusvad suruõhumullid. Õhumullide veepinnale moodustunud kaare ja mõõteprofiili vaheline pindala A on võrdeline vooluhulgaga Q (*valem 1.16*):

$$Q = w * A, \quad (1.16)$$

kus A on õhumullidest veepinnale moodustunud kaare ja mõõteprofiili vaheline pindala, mida võib määrata fotolt, ja $w = 0,25 \text{ m/s}$ on õhumulli eelnevalt mõõdetud tõusukiirus seisvas vees. Vooluhulga mõõtmisviga võib olla kuni 7%. [2]

1.2. Vooluhulga mõõtmine ökoloogilise miinimumvooluhulga kontrollimiseks

Keskkonnaministri määrusega nr 39 (27.07.2009) „Nõuded veekogu paisutamise, veetaseme alandamise ja veekogu tõkestamise ning paisu kohta“ [3] nõutakse paisu omanikult sanitaarvooluhulga tagamist vahetult paisust allpool. Antud nõude täitmist peavad kontrollima keskkonnaametnikud, selleks omapoolsed soovitused.

Kaasajal mõõdetakse voolukiirust kas tiivikutega, elektromagnetiliste või akustiliste seadmetega, viimased põhinevad Doppleri meetodil. Nii tiivikuid, elektromagnetilisi, kui ka

akustilisi voolumõõtureid on võimalik kasutada mittestatsionaarselt, mis teeb need sobivateks mobiilseteks töövahenditeks vooluhulga mõõtmisel. Tänapäevased seadmed mõõdavad vajaminevad parameetrid ning arvutavad automaatselt vooluhulga, mõned neist võimaldavad tulemused otse arvutisse või internetti saata. Voolumõõturite valik sõltub voolukiiruste ja vooluhulkade vahemikest. Nii suurte kui ka väga väikeste vooluhulkade võimalikult täpseks määramiseks ning voolukiiruse mõõtmiseks madalas vees, kus tiivikut kasutada ei saa, tuleb kasutada akustilist mõõturit (taolisi kasutab ka TTÜ Keskkonnatehnika instituut). Nende abil saab mõõta nii väga aeglast (alates 0,001 m/s, veesügavus alates kahest sentimeetrist), kui ka väga suuri voolukiirusi ning määrata vooluhulki. Neid mõõtureid ei ole tarvis korduvalt kaliibrida, nad on veekindlad ja peaaegu hooldevabad. [6; 7]

Ülemaailmne Meteoroloogia Organisatsioon (World Meteorological Organization, WMO) on andnud soovitatavad täpsusvahemikud voolu mõõtmiseks (vt *Tabel 1.2.*) [8].

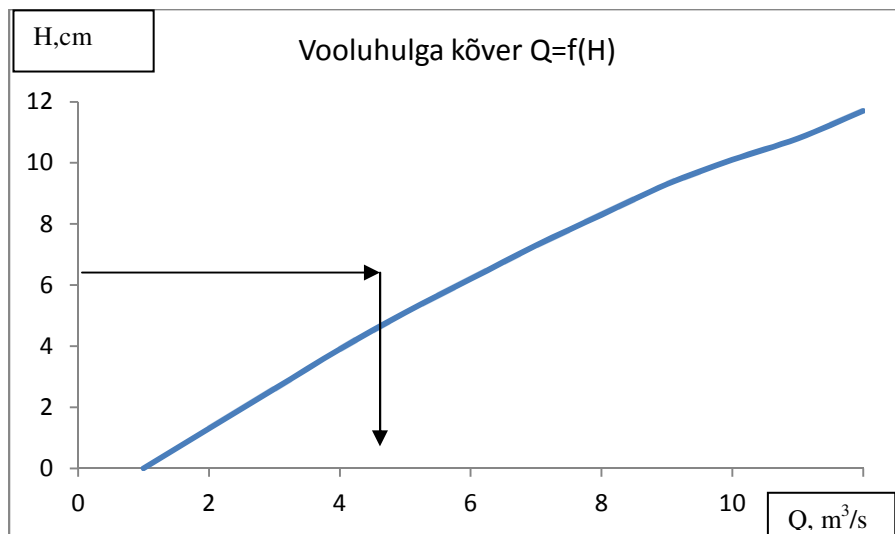
Tabel 1.2. Soovituslik mõõtetäpsus, väljendatud 95% usaldusvahemikus

Jõe laius	0,5%
Veesügavus	0,1 m; 2 %
Voolukiirus	2 – 5 %
Vooluhulk	5 %

Mõõtmistäpsus sõltub vooluvee omadustest, mõõtjast ja mõõteriistadest, rahalistest vahenditest ning mõõtmise eesmärgist. WMO sõnul ei saa seetõttu olla mõõtmistäpsusel kindlat väärtust. Paljudes riikides on välja töötatud neile sobivad täpsusstandardid [8].

1.3. Igapäevaste vooluhulkade määramine

Üksikutel päevadel mõõdetud vooluhulkade abil on võimalik vooluhulk arvutada ka nendel päevadel, kus mõõtmisi ei olnud, kuid ainult tingimusel, et veetaseme ja vooluhulga vahel on olemas pidev seos ja veetaseme mõõtmisi teostatakse iga päev. Vooluhulkade ja veetaseme vahelise seose määramiseks kantakse graafikule vertikaateljele veetase (cm) ja horisontaateljele vooluhulga suurus (m^3/s), joonis 1.4. Mõõdetud veetaseme ja vooluhulkade punktidest tõmmatakse lauge joon nn. vooluhulga kõverat.



Joonis 1.4. Vooluhulga kõver, $Q=f(H)$.

Tavaliselt esineb selline seos jääbavaba perioodil, jäämineku ja jääkatte ajal mõõdetud vooluhulgad kalduvad graafikul kõverast vasakule, mis tähistab uue kõvera suunda. Jõesäangi intensiivsel veetaimestiku tekkimisel samuti kalduvad mõõdetud vooluhulga punktid vasakule poole.

Kirjandus

1. International Glossary of Hydrology. 1992.(WMO No. 385)
2. Maastik, A. Hüdroloogia ja hüdroomeetria. Tartu: Halo, 2006. 9, 38, 48, 66-73 lk.
3. Riigi Teataja Lisa, 63, 917. Nõuded veekogu paisutamise, veetaseme alandamise ja veekogu tõkestamise ning paisu kohta. 2009, [www]
<https://www.riigiteataja.ee/akt/13209959>, 05.03.2012
4. Velner, H.A. Jõgede äravoolu reguleerimine ja kasutamine. MTÜ Eesti Veskiaramu, 2007, [www] <http://web.zone.ee/veskiaramu/artiklid.php>, 02.04.2012
5. Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut (EMHI). Veebileht, [www]
<http://www.emhi.ee/>, 31.12.2012
6. Reihan, A., Iital, A. Eesti jõgede vooluhulga mõõtmine on lihtsamaks muutunud. Keskkonnatehnika, nr 1/08, 2008, [www]
http://www.keskkonnatehnika.ee/client/common-docs/2008_pdf/KT200801.pdf, 07.05.2012
7. OTT Hydrometry. Veebileht, [www]
http://www.ott.com/web/ott_uk.nsf/id/pa_discharge_spot_e.html, 07.05.2012
8. World Meteorological Organization (WMO). Guide to Hydrological Practices: Volume I, Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. 2008, [www]
http://www.whycos.org/chy/guide/168_Vol_I_en.pdf, 05.01.2013
9. Hüdraulika ja pumbad. 1995.Tartu. Lisa 2, 398-400 lk.

**Mõõtmised
kiirusvertikalidel**

Kiirus- vert. num- ber	Kaugu- s al. alguse st	Töösügav- us, m	Sukeldu- s- sügavus			Vool- u kiiru- s, m/s	Keskmin- e Kiirus vertikaal- de vahel, m/s	vertikaali de vaheline sügavus	Signaali de	Pööre te	Mõõtmise	Pöörete
				näit	arv			summ- a	kestvus, s	arv sekund is		

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21

--