

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Infotehnoloogia teaduskond

Karl-Feliks Tammeväli 164827IACB

# **MIKROLAINERADARI KATSETAMINE VEE VOOLUKIIRUSE MÕÕTMISEL**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Alar Kuusik  
PhD

Tallinn 2020

## **Autorideklaratsioon**

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Karl-Feliks Tammeväli

18.05.2020

## **Annotatsioon**

Antud lõputöö eesmärgiks on välja selgitada, kas on võimalik realiseerida madala maksumusega voolukiiruse andurit, mis suudab mõõta kasutatud tarbevee ja sadevee voolukiiruste kanalisatsioonisüsteemis, see tähendab vabavoolulistes ja osaliselt täitunud kanalites. Antud töös kirjeldatakse hetkel olemasolevaid tehnoloogiaid, millega on võimalik mõõta torustikes ja kanalites voolava vee voolukiirust. Antakse ülevaade nendel tehnoloogiatel põhinevate andurite tööpõhimõtetest ning tuuakse välja erinevate tehnoloogiate eelised ja puudused. Töös keskendutakse odaval mikrolaineradaril põhineva vee voolukiiruse sensori prototüübi testimisele.

Antud töö käigus on läbi viidud katsed, mille käigus on mõõdetud ojas vee voolukiirust professionaalse propellerseadmega ning odava mikrolaineradariga. Saavutatud tulemusi kõrvutatakse ning analüüsitakse.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 19 leheküljel, 5 peatükki, 16 joonist, 1 tabel.

## **Abstract**

# **The Use of a Microwave Radar to Determine Water Flow Velocity**

The aim of this Bachelor thesis is to discover the possibilities to create low cost water velocity sensor which can determine water velocity in wastewater and sewer systems. This means free-flowing and partially filled channels. This paper describes currently available technologies that can measure the flow rate of water flowing in pipes and channels. Bachelor thesis provides an overview of the operating principles of sensors and also advantages and disadvantages of different technologies. The work is focused on testing a prototype of a water flow sensor based on a low-cost microwave radar.

In the course of a work experiments have been conducted, during which the water flow rate is measured in the stream using professional equipment and a low-cost microwave radar. The results obtained are compared and analyzed.

The thesis is in Estonian and contains 19 pages of text, 5 chapters, 16 figures, 1 table.

## Lühendite ja mõistete sõnastik

Modbus	Jadaside protokoll
HART	<i>Highway Addressable Remote Transducer</i> , kommunikatsiooniprotokoll, mis võimaldab edastada samaaegselt digitaal- ja analoogsignaale
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> , traadita side kohtvõrk
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> , üldine raadio-pakettandmeside teenus
Ethernet	Juhtmega kohtvõrgu tehnoloogia
AD	Analoog-digitaalmuundamine

# Sisukord

1	Sissejuhatus .....	8
2	Olemasolevad lahendused .....	9
2.1	Voolukiiruse mõõtmise vajalikkus .....	9
2.2	Veevoolu mõõtemetodid survetorustikes ja vabavoolukanalites .....	10
2.2.1	Ultraheli andurid.....	10
2.2.2	Pöörlevad vooluhulga andurid.....	11
2.2.3	Elektromagnetilised vooluhulga andurid.....	11
2.2.4	Rõhu mõõtmisel põhinevad vooluhulga andurid.....	11
3	Doppleri efektiga töötavad mõõteseadmed .....	13
3.1	Doppleri efekt .....	13
3.2	Tööpõhimõte .....	14
3.3	Turul olevad seadmed .....	16
3.3.1	Nivus NivuFlow seeria radarid.....	16
3.3.2	HydroVision Q-Eye seeria.....	16
3.3.3	OTT Hydromet SVR 100 .....	17
3.4	Mikrolaineradar HB100 .....	18
3.4.1	Radari spetsifikatsioon .....	18
4	Katsed .....	21
4.1	Signaalivõimendi .....	21
4.1.1	Võimendi filtri murdesageduste arvutamine .....	21
4.2	Programm.....	23
4.3	Katsevahendid.....	23
4.4	Katsetused .....	24
4.5	Tulemuste analüüs .....	25
5	Kokkuvõte .....	26
	Kasutatud kirjandus .....	27
	Lisa 1 – Arduino programmi kood .....	29

## Jooniste loetelu

Joonis 1. Ultraheli vooluhulga anduri paigutus [4] .....	10
Joonis 2. Rõhu mõõtmisel põhinev vooluhulga andur [9].....	12
Joonis 3. Doppleri efekt. Objekt liigub suunaga vasakult paremale. [10].....	13
Joonis 4. Doppleri efektil töötav mõõteseade [11] .....	14
Joonis 5. Radari mõõtenurk vee suhtes .....	15
Joonis 6. Nivus NivuFlow 7550 radar [15] .....	16
Joonis 7. HydroVision Q-Eye MT radar [16].....	17
Joonis 8. OTT Hydromet SVR100 radar [17] .....	17
Joonis 9. Radari HB100 struktuurskeem [13] .....	18
Joonis 10. Radari HB100 mõõtmised pealtvaatest ja küljevaates [18] .....	19
Joonis 11. Radari HB100 suunadiagramm. Vasakul horisontaalne suunadiagramm, paremal vertikaalne suunadiagramm [18] .....	20
Joonis 12. Võimendi skeem.....	22
Joonis 13. Signaalivõimendi filtri sageduskarakteristik .....	22
Joonis 14. Mikrolaineradar HB100 koos kinnitusega, signaalivõimendi ja Arduino Uno mikrokontroller .....	23
Joonis 15. Radar, mis on asetatud oja kohale vee voolukiiruse mõõtmiseks .....	24
Joonis 16. Kahest mõõtepunktist saadud mõõtetulemused .....	24

# 1 Sissejuhatus

Rahvastiku arvu kasvamise ja linnastumise tõttu on järjest olulisem, et monitooritakse reaalajas sade- ja tarbevee torustikes ning kanalites toimuvat. Kuigi tehnoloogia areneb ning erinevad tehnoloogilised lahendused muutuvad ajas odavamaks, on siiski kanalisatsiooni torustike ja kanalite monitoorimiseks mõeldud seadmed laialdaseks kasutamiseks liiga kallid. Antud bakalaureusetöö uurib, kas on võimalik luua odavat andurit, mis suudab mõõta vee voolukiirust vabavoolulistes ja osaliselt täitunud kanalites.

Töö käsitleb, kuidas kasutada Doppleri efektil töötavat mikrolaineradarit tarbevee ja sadevee voolukiiruse määramiseks. Uurimiseks on valitud mikrolaineradar HB100, kuna seda on lihtne kasutada, selle hind on soodne.

Bakalaureusetöö käigus selgitatakse välja, millise täpsusega on võimalik määrata vee voolukiirust kasutades mikrolaineradarit HB100. Antud lõputöö raames tuleb teha vee voolukiiruse mõõtmise katseid vabavoolulistes veekogudes, kõrvutades mikrolaineradarit mõne tunnustatud mõõtevahendiga. Antud tulemusi tuleb võrrelda ning neid analüüsides välja selgitada, kas mikrolaineradarit HB100 on võimalik kasutada vee voolukiiruse mõõtmiseks ning kas see tagab piisava mõõtetäpsuse. Positiivsete tulemuste korral on võimalik sellist radarit kasutada tulevikus tarbevee ja sadevee voolukiiruse määramiseks, mis oleks odavam alternatiiv praegu turul olevatele sarnastele lahendustele.



## 2 Olemasolevad lahendused

Käesolevas peatükis on kirjeldatud vee voolukiiruse mõõtmise vajadust kanalisatsioonitorustikes ning sellest saadavat kasu. Välja on toodud erinevad vee voolukiiruse mõõtmise tehnoloogiad, mida saab kasutada nii vabavoolulistes kui ka survetorustikes. Lisaks on välja toodud käsitletud tehnoloogiate puudused.

### 2.1 Voolukiiruse mõõtmise vajalikkus

Vee voolukiiruse regulaarne monitoorimine kanalisatsioonitorustikes annab võimaluse jälgida kanalisatsioonitorustikes toimuvat ning kogutavatele andemetele tuginedes on võimalik teha paremaid otsuseid tulevikus kanalisatsioonitorustikke projekteerides.

Piisavalt tihedat monitoorimisvõrku omades saab tuvastada, kas torustike läbilaskevõime on piisav või võib tekkida olukordi, kus antud torustik ei suuda kogu sinna suunatavat vett vastu võtta [1]. Ajaga lisandub kanalisatsioonitorustikele kasutajaid juurde, seega tuleks sellist monitoorimist korraldada regulaarselt, mitte ainult pisteliselt. Sellist infot aga saab kasutada uute kanalisatsioonitorustike projekteerimisel ning see annab ülevaate, millal oleks vaja kanalisatsioonitorustik välja vahetada. Infot analüüsides on võimalik ka kindlaks teha, kuidas antud piirkonnas on ajas kanalisatsioonitorustiku koormus kasvanud [2].

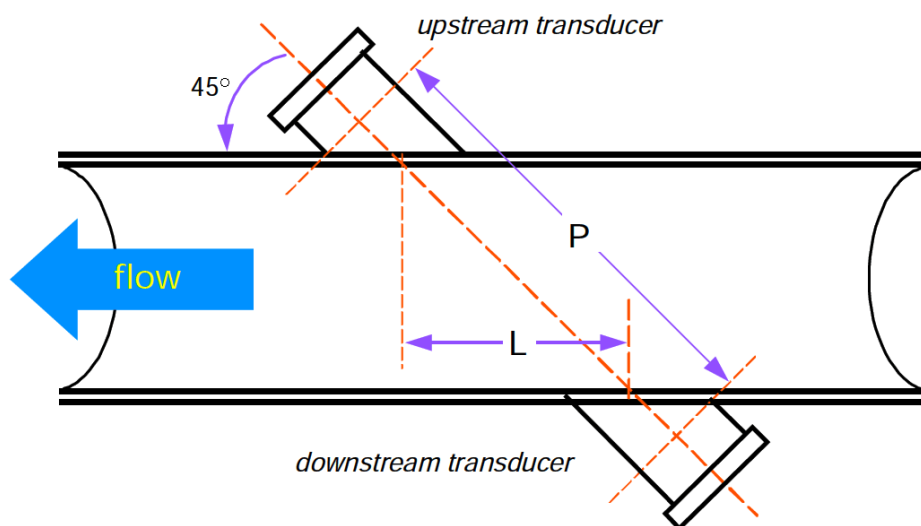
Üks oluline põhjus, miks tuleks kanalisatsioonitorustikes toimuvat regulaarselt monitoorida on õigeaegselt avastada kanalisatsioonitorustikes esinevaid lekkeid ning ummistusi [1]. Kanalisatsioonitorustikes võib esineda ka erinevaid kemikaale ja ohtlike aineid, sellest tulenevalt on oluline, et need ained jõuaksid reoveepuhastusjaama. Lekete korral aga võib reovesi jõuda hoopis loodusesse ning imbuda pinnavette, mis tekitab keskkonnareostust.

Ummistuste korral võib hakata kanalisatsioonitorustike teisest otsast uputama, mis toob kaasa analoogsed kahjud kanalisatsioonitorustikes esinevatele leketele. Lisaks võib ummistuste korral hakata kanalisatsioonitorustikes olev vesi tungima ka majapidamistesse, mis toob inimestele kaasa ka varalise kahju. Mida tihedamalt kanalisatsioonisüsteemis üles seada monitooringseadmeid, seda täpsem ja lihtsam on lekkeid ja ummistusi avastada.

## 2.2 Veevoolu mõõtemetodid survetorustikes ja vabavoolukanalites

### 2.2.1 Ultraheli andurid

Ultraheli andurid kasutavad ultraheli laineid, et määrata torustikus liikuva vedeliku kiirus. Ultraheli andurid koosnevad kahest osast: saatjast ja vastuvõtjast. Kaks andurit paigutatakse toru erinevatele külgedel nii, et nad ei oleks kohakuti. Sel viisil saadetakse ultraheli laine läbi toru kord vastuvoolu ja kord pärioolu. Andurid saadavad signaale ning mõõdetakse signaali levimise aeg. Pärioolu liikudes liigub ultraheli laine kiiremini kui vastuvoolu liikudes. Mida kiirem on torus oleva vedeliku liikumiskiirus, seda enam hakkab erinema vastu- ja pärioolu saadetava signaali levimise aeg. Teades aja erinevust saab välja arvutada torus voolava vedeliku voolukiiruse. [3]



Joonis 1. Ultraheli vooluhulga anduri paigutus [4]

Ultraheli andureid on mitmesuguseid. Lihtsamad ja odavamad andurid paigaldatakse metallvitsadega kanalisatsioonitoru külge. Kallimad ja keerukama lahendusega ultraheli andurid monteeritakse otse torustiku külge [5]. Väliselt toru külge paigaldatavate andurite eeliseks on see, et nende paigaldamine on lihtne ja sobib kriitiliste süsteemide jaoks, mida ei saa seisma panna, kuid nende peamiseks miinuseks on ebatäpsus. Toru külge monteeritavate andurid on täpsed. Sellised andurid on kallid ning kuna nad puutuvad toru sees voolava vedelikuga kokku, siis ajapikku nende kontaktid lähevad mustaks ning nende täpsus kaob. Ultraheli andurite puuduseks on ka see, et neid ei ole võimalik kasutada vabavoolulistes kanalites vaid ainult kinniste torustike puhul.

### **2.2.2 Pöörlevad vooluhulga andurid**

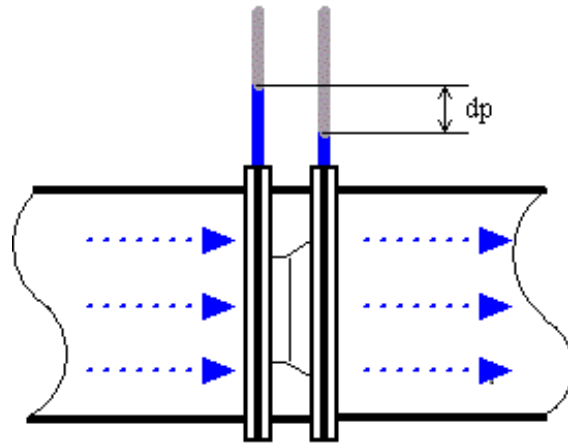
Pöörlevate vooluhulga andurite puhul pannakse, torustike sisse või kanalitesse propeller või turbiin, mis vee voolu tõttu hakkab pöörlema. Mida kiirem on vee voolukiirus, seda kiiremini propeller või turbiin ka liigub. Propelleri või turbiini liikumise kiirust on võimalik magnetiliselt määrata. Anduri lähedale paigutatakse püsिमagnet ja selle ümber mähis. Magnetvoo muutuse tulemusena indutseeritakse mähises elektromotoorjõud, mida mõõtes saab kindlaks teha propelleri või turbiini liikumiskiiruse. Selle meetodi peamiseks eeliseks on odavus ja lihtsus. Kanalisatsioonitorustikes aga seda meetodit kasutada ei saa, kuna saastunud vee tõttu pole see mõõtemetod piisavalt töökindel. Juhul kui mustus sattub liikuvate osade vahele, siis need kiiluvad kinni ja andur ei tööta enam. [6]

### **2.2.3 Elektromagnetilised vooluhulga andurid**

Elektromagnetilised vooluhulga andurid koosnevad kahest induktsoonipoolist ja kahest elektroodist. Induktsoonipoolid on asetatud toru mõlemale vastaspoolele, nende vahele on tekitatud magnetväli. Toru külgedele kummalegi poole on kinnitatud elektroodid, mis mõõdavad elektromotoorjõudu. Juhul kui elektrit juhtiv aine voolab läbi torus tekitatud magnetvälja, indutseeritakse vool, mida mõõdavad toru külgedel olevad elektroodid. Mõõtes seda pinget saab arvutada toru läbiva aine voolukiirust. Elektromagnetiliste vooluhulga anduritega saab mõõta ainult elektrit juhtivate vedelike voolukiirust. Andurite kasutamisel kanalisatsioonitorustikes on peamiseks negatiivseks küljeks, et reoveega kokkupuutuvad kontaktid saastuvad ajapikku ning andur lakkab töötamas. Samuti saab seda mõõtmismeetodi kasutada ainult suletud torustikes, tulenevalt selle anduri ehitusest. Avatud kanalites pole selle mõõtmismeetodiga võimalik vee voolukiirust mõõta. [7]

### **2.2.4 Rõhu mõõtmisel põhinevad vooluhulga andurid**

Rõhu mõõtmisel põhinevad vooluhulga andurid töötavad rõhulangu mõõtmisel põhimõttel. Antud mõõtmismeetod toimib põhimõttel, et torusse asetatakse takistus, mis on risti vee voolusuunaga või muudetakse toru ristlabilõiget, et lasta vähem vett korruga läbi. Torusse asetatakse kaks andurit. Üks andur on asetatud enne, kui vee läbivooluhulka on takistatud ning teine rõhu andur on asetatud peale takistust. Mõlemad andurid mõõdavad rõhku, mida voolav vedelik neile avaldab. Teades rõhulangu, mis tekib vee paisutamise tulemusena on võimalik välja arvutada vedeliku voolukiirus. Sellel mõõtemetodid on väga palju erinevaid variatsioone, mis peamiselt erinevad vee paisutamise meetodite poolest. [8]



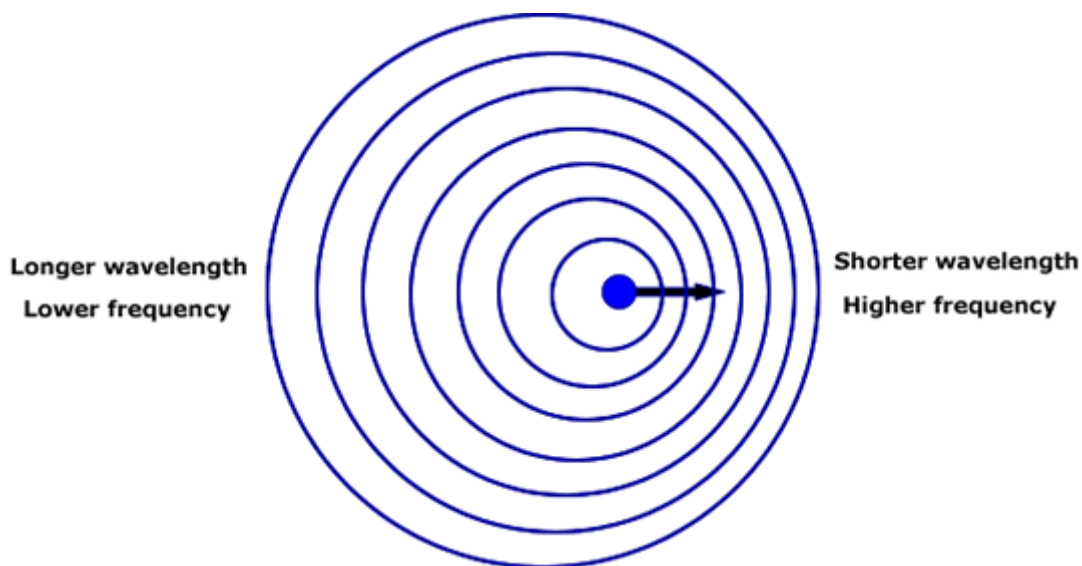
Joonis 2. Rõhu mõõtmisel põhinev vooluhulga andur [9]

### 3 Doppleri efektiga töötavad mõõteseadmed

Antud peatükis on kirjeldatud Doppleri efekti ning kuidas on seda võimalik kasutada vee voolukiiruse määramiseks. Veel on välja toodud Doppleri efektile töötavate radarsensorite eelised vee voolukiiruse mõõtmisel ning antud ülevaade erinevatest seadmetest.

#### 3.1 Doppleri efekt

Doppleri efektiks nimetatakse füüsilist nähtust, kus liikuva objekti poolt tekitatud laine sagedus sõltub vaatleja ja allika liikumise suunast ja kiirusest. Kui vaatleja ja allikas liiguvad üksteise poole, siis laine sagedus suureneb, sest iga laine, mis tekitatakse on vaatlejale järjest lähemal kui eelmine laine. Juhul kui vaatleja ja allikas kaugenevad üksteisest, siis laine sagedus väheneb. Keskmiseks vee voolukiiruseks kanalisatsioonitorustikus võib pidada 1 m/s. Murdesageduste arvutamisel võtan ülemiseks murdesageduseks sageduse, mis vastab kümme korda suuremale kiirusele. Alumiseks murdesageduseks võtan sageduse, mis vastab kümme korda aeglasemale kiirusele. [10]

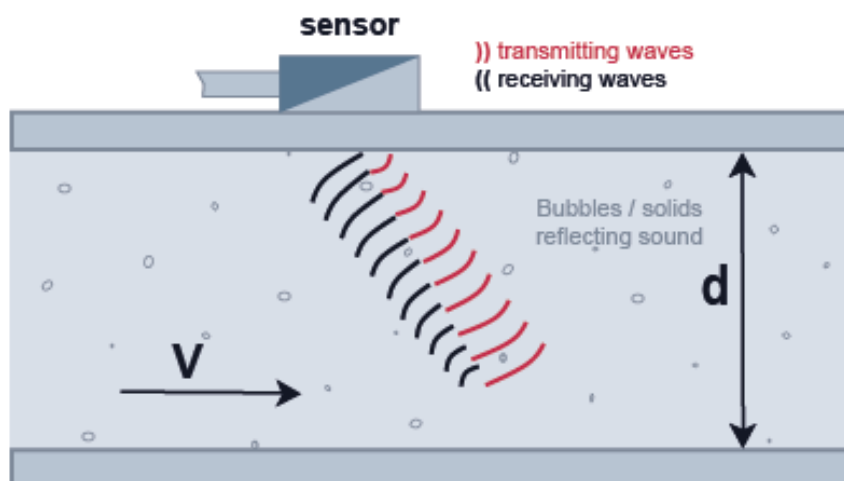


Joonis 3. Doppleri efekt. Objekt liigub suunaga vasakult paremale. [10]

### 3.2 Tööpõhimõte

Doppleri efektil töötavaid voolukiiruse andureid on erinevaid, kuid peamiselt võib need jaotada kaheks. On olemas Doppleri efektil töötavad ultraheli kasutavad vooluhulga andurid ja Doppleri efektil töötavad radarid, millega saab vee voolukiirust mõõta.

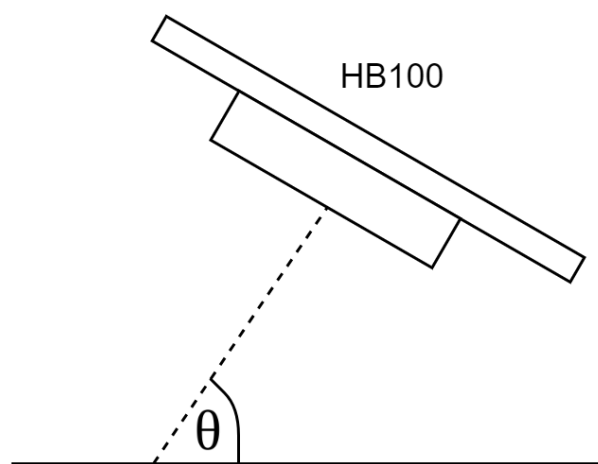
Doppleri efektil töötavad ultraheli andurid paigaldatakse kas toru peale või toru põhja. Andur koosneb saatjast ja vastuvõtjast. Selleks, et selline andur töötaks on vaja, et vedelikus, mille voolukiirust mõõdetakse oleks tahkeid osakesi või õhumulle. Vooluhulga mõõtmiseks saadab andur pidevalt välja ultrahelilaineid. Need ultraheli laineid peegelduvadki tagasi vedelikus olevatest õhumullidelt või tahketelt osadelt. Anduri küljes olev vastuvõtja võtab peegeldunud ultraheli lained vastu. Kuna aga vedelik liigub, siis tekitab see väljasaadetava signaali sageduses nihke. Seda nähtust kutsutaksegi Doppleri nihkeks ning selle põhjal on võimalik välja arvutada vee voolukiirus. Sellise mõõtmismeetodi peamiseks eeliseks on see, et andurit on lihtne paigaldada. Toru peale paigaldatavate andurite puhul ei pea toru lahti lõikama ning seda saab paigaldada ka kriitiliste süsteemide puhul, kus süsteemi ei saa seisma panna. Toru peale paigaldatav andur ei puutu kokku vedelikuga ja seega ka ei saastu. [11]



Joonis 4. Doppleri efektil töötav mõõteseade [11]

Doppleri efektil töötavad radarid on oma tööpõhimõttelt väga sarnased eelmainitud ultraheli anduritele. Nende kahe erinevus seisneb välja kiiratavates ainetes. Doppleri efektil toimivad ultraheli andurid kasutavad oma tööks helilaineid, aga radarid kasutavad elektromagnetlaineid. Elektromagnetlained levivad õhus palju kiiremini kui helilained.

Tulenevat elektromagnetlainete ja helilainete omadustest käituvad need Doppleri efektil põhinevad mõõteseadmed erinevalt. Ultraheli lainete puhul on segavaks faktoriks õhus levivad mikroosakesed, kuna nende pealt peegeldub signaal tagasi. Seega võivad ultraheli andurid üle õhu kasutades hakata andma valesid mõõtetulemusi. Väikse dielektrilise läbitavusega materjalide puhul elektromagnetlained ei peegeldu materjalilt vaid tungivad sellest läbi. Seega ei mõjuta õhus olevad mikroosakesed radarite sooritust. Rakenduste puhul, kus mõõtmine toimib üle õhu peaks kindlasti kasutama ultraheli andurite asemel radareid. Juhul, kui kasutada radarit objekti kiiruse mõõtmiseks on vaja arvutada Doppleri nihkest objekti kiirus. [12]



Joonis 5. Radari mõõtenurk vee suhtes

Järgnevalt on välja toodud valem, millega saab arvutada objekti kiiruse. [13]

$$F_d = 2V \left( \frac{F_t}{c} \right) \cos \theta \quad (3.1)$$

Kus:

$F_d$  – Doppleri sagedus

$V$  – Objekti liikumise kiirus

$F_t$  – Radari töösagedus

$c$  – Valguse kiirus

$\theta$  – Nurk liikuva objekti suuna ja radari telje vahel

### 3.3 Turul olevad seadmed

Turul on mitmeid erinevaid firmasid, mis tegelevad veevoolu mõõteseadmetega. Annan ülevaate erinevatest radaristest, millised on nende spetsiifilised omadused, tehnoloogiline lahendus ja hinnavahehemik.

#### 3.3.1 Nivus NivuFlow seeria radarid

Nivus on Saksa firma, mis toodab ja arendab juba aastast 1967 erinevaid mõõteseadmeid. Nivus on ka välja arendanud ning patenteerinud voolukiiruse mõõtmis tehnoloogia, mida kutsutakse ristkorrelatsiooni meetodiks. Kanalisatsioonitorustike puhul sisaldab heitvesi erinevaid osakesi, mis on sinna sattunud ning sellest tingituna on vee voolukiirus erinevates kihtides natukene erinev. Kasutades ristkorrelatsiooni meetodit luuakse täpne vooluprofiil, mis võtab arvesse erinevate kihtide erinevat voolukiirust ning saadakse väga täpne mõõtetulemus [14].

Nivus NivuFlow seeria radarid töötavad 24 GHz sagedusel, on võimelised mõõtma kiirust 0.15 m/s kuni 20 m/s, töötavad temperatuurivahemikus -20 °C kuni 70 °C ja suudavad mõõta voolukiirust kaugusel 0.3 m kuni 20 m. Radari täpsus on  $\pm 5\%$ . NivuFlow radarid kasutavad andmete edastamiseks Modbus või HART sideprotokolli. [15]



Joonis 6. Nivus NivuFlow 7550 radar [15]

#### 3.3.2 HydroVision Q-Eye seeria

HydroVision Q-Eye radarid on disainitud mittekontaktset mõõtma vee voolukiirust. Radarid töötavad sagedusel 24 GHz ning töötavad temperatuurivahemikus -30 °C kuni



90 °C . Radarid on võimelised kasutama andmete edastamiseks RS485, Modbus, WLAN, GPRS ja Ethernet sideprotokolle. Radarite täpsused on  $\pm 1 \%$  kuni  $\pm 3 \%$  . [16]



Joonis 7. HydroVision Q-Eye MT radar [16]

### 3.3.3 OTT Hydromet SVR 100

OTT on Ameerikast pärit mõõtevahendite tootja. SVR100 radar töötab 24GHz sagedusel. Antud radar suudab mõõta voolukiirust vahemikus 0,08 m/s kuni 15 m/s kaugusel kuni 25 m ning töötab temperatuurivahemikus -40 °C kuni 85 °C. Radar kasutab SDI-12 ja Modbus sideprotokolle. Radari täpsus on  $\pm 2 \%$  [17].

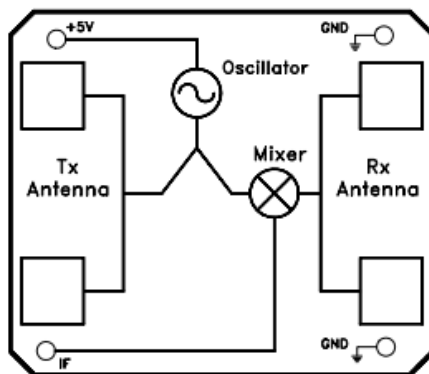


Joonis 8. OTT Hydromet SVR100 radar [17]

Väljatoodud radarite täpsed hinnad pole teda, kuid eelduslikult jäävad hinnad vahemikku 1500 kuni 3000 eurot, mis välistab nende laialdast kasutamist kanalisatsioonisüsteemides. Kuna tegu on keerukate süsteemidega, siis oleneb täpsem hind juurde ostetavast lisavarustusest ja konkreetsest seeria mudelist.

### 3.4 Mikrolaineradar HB100

Radar HB100 on monostaatiline X-sagedusriba (10GHz) Doppleri radar. Antud seade valiti, sest see on soodsa hinnaga. Radar koosneb ostsillaatorist, mikrolaine segustist ning kaetud antennist. Antud andur sobib nii liikumisandurina kasutamiseks näiteks uste avamiseks või valgustuse lülitamiseks. Samuti on antud radariga võimalik mõõta ka liikumiskiirust.



Joonis 9. Radari HB100 struktuurskeem [13]

Radari kõigis neljas servas on näha jootekontakte (terminal). Kahte nurka tuleb radari maahendus (GND), kolmandasse toitepinge ning „IF“ väljundist tuleb väljundpinge, mis on Doppleri nihkest saadud vahesagedus. Doppleri signaali suurus on võrdeline kiiratud energia hulgaga ja jääb mikrovoltide vahemikku. Seega kuna IF terminalist väljastatav pinge on väga väike on enamike kasutusvalade puhul vajalik kasutada signaalivõimendit. Doppleri nihe on proportsionaalne liikumise kiirusega, tavaline inimese kõndimise kiirus tekitab Doppleri nihke alla 100 Hz.

#### 3.4.1 Radari spetsifikatsioon

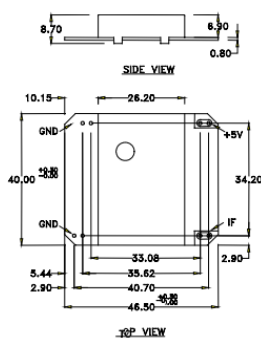
Antud mikrolaineradar töötab sagedusel 10.525 GHz. Antud sageduse juures levivad radari kiiratud lained läbi erinevate materjalide. Seetõttu töötab radar ka siis kui on kinni

kaetud või asetatud karbi sisse. Tabelis 1 on välja toodud mikrolaineradari HB100 täpsemad andmed.

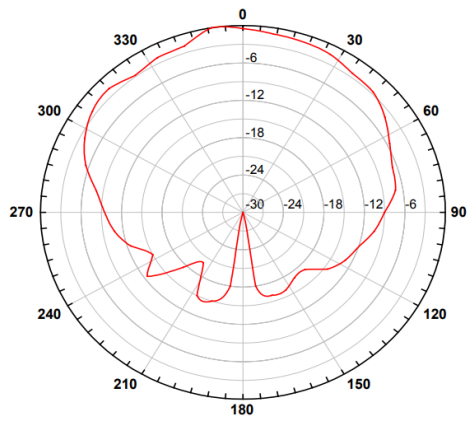
Parameeter	Miinumum	Keskmine	Maksimum	Ühik
Töösagedus	10.520	10.525	10.530	GHz
Kiirusvõimsus	12	15	20	dBm
Kõrvalkiirus			-7.3	dBm
Seadumisaeg		3	6	µs
Vastuvõtja signaali tugevus		200		µVp-p
Müra			5	µVrms
Toitepinge	4.75	5.00	5.25	VDC
Voolutarve		30	40	mA
Impulsi kordussagedus		2		kHz
Impulsi kestvus	10			µs
Töötemperatuur	-15		55	°C
Kaal		8		g

Tabel 1. Mikrolaineradari HB1000 spetsifikatsioon [18]

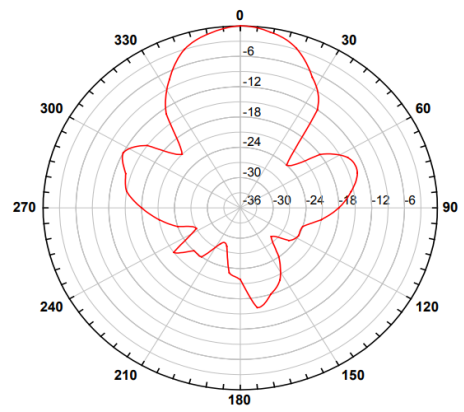
Joonisel 10 on välja toodud radari füüsilised mõõtmed ning joonisel 11 on välja toodud anduri suunadiagramm. Radariga mõõtmisel tuleb kindlasti arvestada ka radari suunadiagrammiga. Nagu jooniselt on näha, siis radar ei registreeri liikumist ainult antenni suunalt, vaid on võimeline ka liikumist registreerima sellelt poolelt, kus antenni ei ole.



Joonis 10. Radari HB100 mõõtmed pealtvaatest ja küljebaates [18]



**Azimuth**



**Elevation**

Joonis 11. Radari HB100 suunadiagramm. Vasakul horisontaalne suunadiagramm, paremal vertikaalne suunadiagramm [18]

## 4 Katsed

Antud lõputöö raames on eesmärgiks testida, kas odavat mikrolaineradarit on võimalik kasutada vee voolukiiruse mõõtmisel. Sellisel juhul oleks potentsiaalne radari kasutusvaldkond ka reo- ja sadevee voolukiiruse mõõtmine vabavoolulistes kanalites.

Antud lõputöö jaoks on valitud mikrolaineradar HB100. Esiteks on antud radar soodsahinnaline. Selle mikrolaineradari on võimalik hankida endale juba paari euro eest. Teiseks on selle radari kasutamine lihtne. Antud radari negatiivse küljena võib välja tuua, et radarist tulev Doppleri nihke väljundsignaal on mikrovoltides ja mikrokontroller ei suuda nii väikest signaali tuvastada. Seetõttu tuleb mikrolaineradarist tulevat signaali enne AD muundamist võimendada ja filtreerida.

### 4.1 Signaalivõimendi

Selleks, et radarist tulevat signaali saaks kasutada mikrokontrolleris, tuleb ehitada võimendi, mis võimendaks radarist tulevat signaali enne analoog-digitaalmuundurit mikrokontrolleris. Signaalivõimendi ehitamisel võtsin aluseks tootja poolt soovitatud võimendi skeemi ning arvutasin üle komponentide väärtused, et leida antud ülesandeks sobivad ribapääsfiltrite murdesagedused. Joonisel 12 on välja toodud signaalivõimendi skeem. Antud skeem koosneb kahest operatsioonivõimendist, mis võimendavad signaali kaksteist tuhat korda. Lisaks töötab võimendi ribapääsfiltrina.

#### 4.1.1 Võimendi filtri murdesageduste arvutamine

Murdesageduste arvutamiseks kasutan eeltoodud valemit 3.1. Murdesageduste arvutamisel lähtun keskmisest voolukiirusest kanalisatsioonitorustikes ja kanalites, milleks on 1 m/s. Valin alumiseks murdesageduseks vastavalt kümme korda väiksema kiiruse kui keskmine kiirus ning ülemiseks murdesageduseks kümme korda suurema kiiruse.

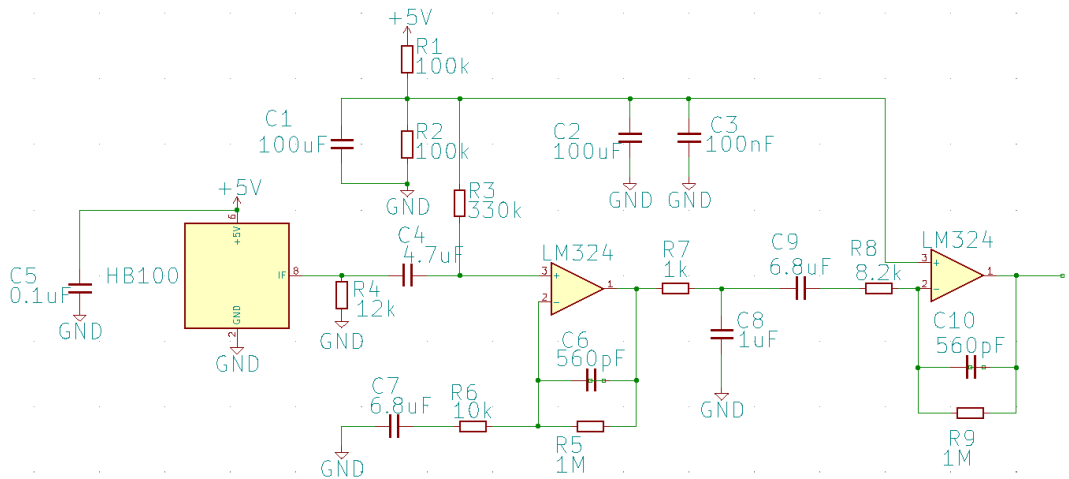
Ülemiseks murdesageduseks võtan sageduse, mis vastab vee voolukiirusele 10 m/s kui radari mõõtenurk on  $80^\circ$ .

$$F_d = 2V \left( \frac{F_t}{c} \right) \cos \theta \quad F_d = 2 * 36 \left( \frac{5,25 * 10^9}{1,07925 * 10^9} \right) \cos 80^\circ \approx 122 \text{ Hz} \quad (4.1)$$

Alumiseks murdesageduseks võtan sageduse, mis vastab vee voolukiirusele 0,1 m/s kui radari mõõtenurk on 80°.

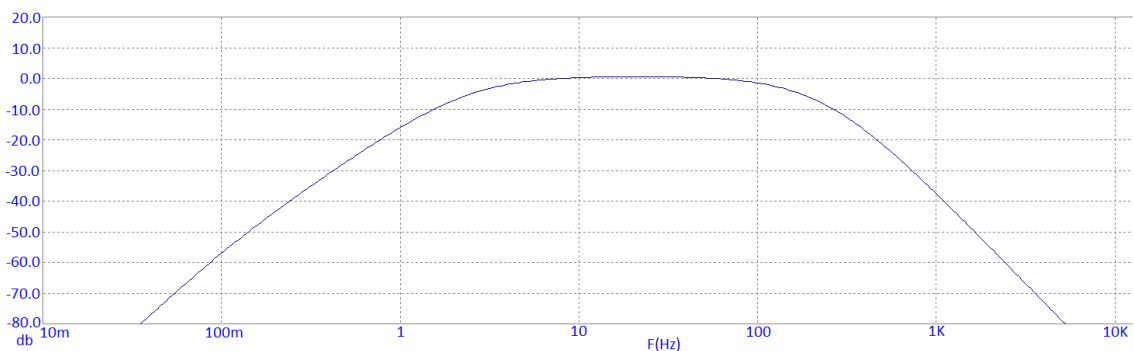
$$F_d = 2V \left( \frac{F_t}{c} \right) \cos \theta \quad F_d = 2 \cdot 0,36 \left( \frac{5,25 \cdot 10^9}{1,07925 \cdot 10^9} \right) \cos 80^\circ \approx 1,22 \text{ Hz} \quad (4.2)$$

Filtri komponentide väärtused, mille korral filter vastab soovitud murdesagedustele on leitud simuleerimise teel. Simuleerimiseks kasutasin simuleerimistarkvara Micro-Cap 12. Ribapääsfiltri takistid on valitud, nii et esimese astme võimendustegur oleks sajakordne ning teise astme võimendustegur oleks saja kahekümne kordne. Joonisel 12 on välja toodud signaalivõimendi skeem.



Joonis 12. Võimendi skeem

Antud skeemi põhjal on filtri alumine murdesagedus umbes 3 Hz ja ülemine murdesagedus on 120 Hz. Joonisel 14 on välja toodud signaalivõimendi filtri sageduskarakteristik.



Joonis 13. Signaalivõimendi filtri sageduskarakteristik

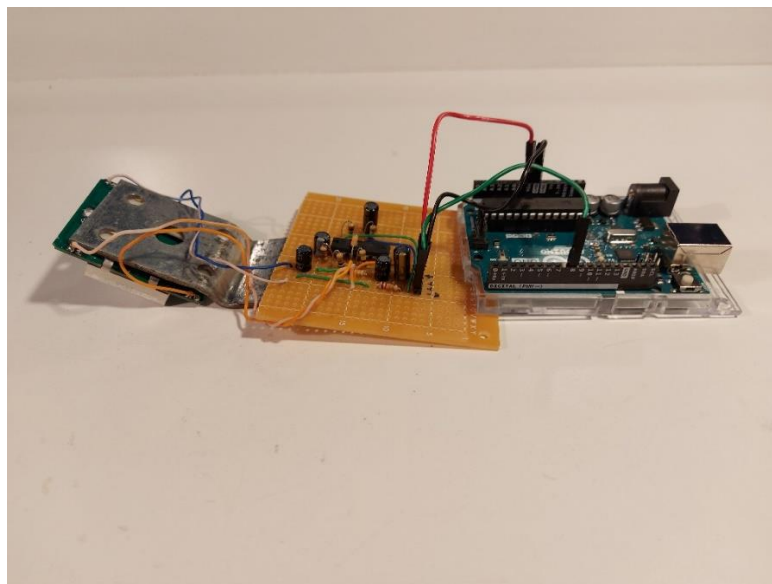
## 4.2 Programm

Katse läbiviimiseks on kasutatud Arduino Uno mikrokontrollerit lihtsuse mõttes. Signaalivõimendist tulev signaal on ühendatud mikrokontrolleri analoog sisendisse. Programmis mõõdetakse signaali perioodi kümme korda ning võetakse sellest keskmine. Signaali perioodi järgi arvutatakse sagedust. Kasutades signaali sagedust saab valemi 3.1 abil arvutada vee voolukiiruse. Vee voolukiiruse arvutamisel võetakse ka arvesse radari mõõtmise nurka voolava vee suhtes. Programmi lähtekood on esitatud Lisas 1.

## 4.3 Katsevahendid

Selgitamaks välja, kas antud mikrolaineradariga on võimalik määrata vee voolukiirust ning milline on vee voolukiiruse määramise täpsus, on tarvis viia läbi mõõtmised. Mõõtmiste käigus tuleks esmalt mõõta vee voolukiirust vabavoolulises veekogus referentsiks sobiva mõõteseadmega ning seejärel mõõta vee voolukiirust antud radariga. Võrreldes neid tulemusi saab teada, kui täpne vahend on antud mikrolaineradar vee voolukiiruse määramiseks.

Katse läbiviimiseks kasutatud süsteem koosneb mikrolaineradarist HB100, isehitatud signaalivõimendist, mikrokontrollerist Arduino Uno, sülearvutist ja referentsmõõtjast Geopacks MFP126-S, mis on propelleriga voolukiiruse andur. [19]



Joonis 14. Mikrolaineradar HB100 koos kinnitusega, signaalivõimendi ja Arduino Uno mikrokontroller

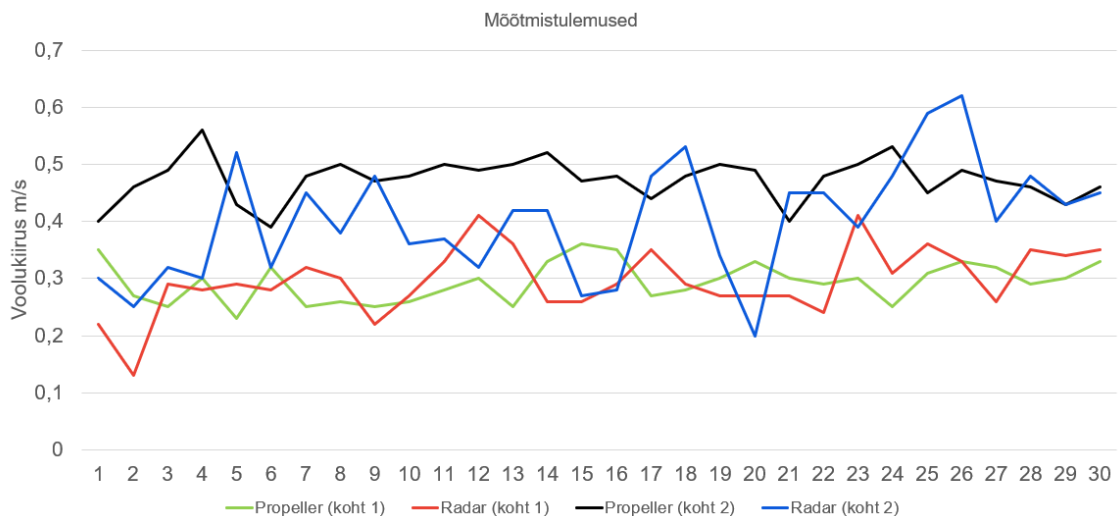
## 4.4 Katsetused

Katsete läbiviimise kohaks oli oja. Esmalt mõõtsin referentsmõõtjaga Geopacks MFP126-S ära oja voolukiirus kahe minuti vältel oja keskel. Seejärel fikseerisin radari plastkarpi 80 kraadise nurga all. Karpi pannakse koos radariga samuti võimendi ja mikrokontroller. Mikrokontroller ühendatakse USB juhtme abil arvutiga. Arvuti USB port on mikrokontrollerile, võimendile ja radarile toiteallikaks ning arvuti kaudu on võimalik mikrokontrollerist reaajas lugeda mõõtetulemusi. Seejärel mõõtsin radariga vee voolukiirust samuti oja keskelt kahe minuti vältel. Mõõtmistulemused kuvati reaajas arvuti ekraanile ning salvestasin need ära.



Joonis 15. Radar, mis on asetatud oja kohale vee voolukiiruse mõõtmiseks

Mõõtmiskohaks valisin kaks erineva voolukiirusega mõõtekohta ojas. Joonisel 16 on välja toodud propeller mõõteseadme ja mikrolaineradari mõõtmistulemused mõlemas mõõtepunktis. Mõõtmisel on eeldatud, et vee voolukiirus oli mõõteperioodil püsiv.



Joonis 16. Kahest mõõtepunktist saadud mõõtetulemused



## 4.5 Tulemuste analüüs

Saadud katsetulemused näitavad, et mikrolaineradariga saab vee voolukiirust mõõta. Propelleriga mõõtes oli vee keskmine voolukiirus asukohas 1 0,29 m/s ja selle standardhälve 0,034 m/s. Radari puhul oli keskmine voolukiirus asukohas 1 0,33 m/s ja standardhälve 0,132 m/s. Asukohas 2 oli propelleriga mõõtes voolukiirus 0,47 m/s ja standardhälve 0,037. Radariga mõõtes oli vee voolukiirus 0,49 m/s ja standardhälve 0,213 m/s. Radari mõõtmistulemuste keskmine viga propelleriga mõõteriista suhtes pika mõõtmisperioodi vältel on 13% asukohas 1 ja 3% asukohas 2. Mikrolaineradari mõõteviga on üle kahe korra suurem, kui professionaalsel mõõteriistal, kuid seda on võimalik parandada.

Mikrolaineradari mõõtetäpsust mõjutab kindlasti radari mõõtenurk. Mida lähemale täisnurgale läheneb mõõtenurk, seda rohkem mõjutab mõõtmistäpsust mõõtenurga õige valik. Mõõtenurga viga tekib radari kinnitamisel plastkarbi külge, plastkarbi asetamisel oja kohale ning oja enda langust. Kindlasti mõjutab ka mõõtetäpsust mõõtmise läbiviimine ojas, kuna ojas on vee voolukiirus muutuv. Samuti pole oja põhi igas punktis ühesugune ning mõõtmiskoha erinevus võib muuta vee voolukiirust. Seega tuleks mõõtetulemuste täpsemaks määramiseks viia läbi mikrolaineradariga mõõtmise kontrollitavamas keskkonnas, kus mõõtmistingimused erinevad ajas võimalikult vähe.

Mõõtetulemustest on näha, et propelleri mõõtetulemused on palju ühtlasemalt jaotunud, kui mikrolaineradari mõõtetulemused. Sama järelduse saab ka teha, kui vaadata mõõtetulemuste standardhälvet. Mikrolaineradari mõõtetulemuste ühtlasemat jaotumist aitaks saavutada mõõtmise pikemaajalisem keskmistamine. Antud katsete käigus on mõõdetud kolmkümmend mõõtepunkti kahe minuti vältel. Võttes aga mõõtetulemustest keskmise iga minuti vältel, oleksid propelleri ja mikrolaineradari mõõtetulemused sarnasemad.

Kuigi mikrolaineradari mõõtetulemuste täpsus on väiksem kui professionaalse propeller mõõteseadme täpsus, saab soodsa mikrolaineradariga määrata vee voolukiirust. Seega on võimalik soodsahinnalist mikrolaineradarit kasutada sadevee ja tarbevee voolukiiruse mõõtmiseks vabavoolulistes ja osaliselt täitunud kanalites.

## 5 Kokkuvõte

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli analüüsida olemasolevaid veevooluandurite tööprintsippe, eeskätt Doppleri efektil töötavaid mikrolaineradareid ja luua neile sarnane odav prototüüplahendus. Prototüüp realiseeriti ja seda katsetati välitingimustes. Võrreldes referentsmõõtjaga Geopacks MFP126-S oli loodud lahenduse viga keskmiselt 8.2%. Professionaalsete Doppleri efektil töötavate radarite mõõteviga on umbes 5%.

Töö tulemusi analüüsid selgus, et soodsa mikrolaineradariga on võimalik vee voolukiirust mõõta, kuid selle mõõtetäpsus on väiksem kui professionaalsetel mõõtevahenditel. Töö autor leiab, et töö käigus kasutatud mikrolaineradari mõõtetäpsust saaks suurendada, kui viia katsed läbi keskkonnas, kus vee voolukiirus püsib stabiilsena. Samuti tuleks mõõtetäpsuste parandamiseks radari mõõtenurk vee suhtes määrata täpsemalt ja pikendada mõõteperioodi.

Töö tulemusena valmis vee voolukiiruse andur, mis koosneb mikrolaineradarist, signaalivõimendist ja mikrokontrollerist. Antud mõõteseadet saab edaspidi kasutada vabavoolulistest ja osaliselt täitunud kanalitest tarbevee ja sadevee mõõtmiseks.

## Kasutatud kirjandus

- [1] „SEWER MONITORING,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.unidata.com.au/application-notes/sewer-monitoring/>. [Kasutatud 29 Märts 2020].
- [2] W. E. Federation, „Sanitary Sewer Flow Monitoring and Data Analytics,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.wef.org/globalassets/assets-wef/direct-download-library/public/03---resources/wsec-2019-fs-011---csc---flow-monitoring-and-data-analytics---final.pdf>. [Kasutatud 2020 Märts 29].
- [3] „Ultrasonic Flowmeter Technology,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.flowmeters.com/product-list.php?page=ultrasonic-technology/pg1-cid100.html=/asc\\_action=SetCurrCat/category\\_id=100](https://www.flowmeters.com/product-list.php?page=ultrasonic-technology/pg1-cid100.html=/asc_action=SetCurrCat/category_id=100). [Kasutatud 9 Aprill 2020].
- [4] „Basic of Ultrasonic Flow meters Factors Affecting its Performance,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://instrumentationtools.com/basics-ultrasonic-flowmeters-factors-affecting-performance/>. [Kasutatud 12 Aprill 2020].
- [5] „What Is an Ultrasonic Flow Meter and How to Use One,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.omega.com/en-us/resources/ultrasonic-flow-meters>. [Kasutatud 12 Aprill 2020].
- [6] „Water Flow Meters - How They Work,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=15058>. [Kasutatud 11 Aprill 2020].
- [7] „Electromagnetic Flow Meters Working Principle,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.eeplindia.com/Electromagnetic-Flow-Meters-Working-Principle.html>. [Kasutatud 11 Aprill 2020].
- [8] „Differential Pressure Flow meters,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.omega.co.uk/literature/transactions/volume4/t9904-07-diff.html>. [Kasutatud 11 Aprill 2020].
- [9] „What is Differential Pressure Flow meter?,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://instrumentationtools.com/what-is-a-differential-pressure-flow-meter/>. [Kasutatud 19 Aprill 2020].
- [10] R.Kurtis, „Doppler Effect for Waveforms,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.school-for-champions.com/science/waves\\_doppler\\_effect.htm#.XpNIIMgzZaQ](https://www.school-for-champions.com/science/waves_doppler_effect.htm#.XpNIIMgzZaQ). [Kasutatud 1 Mai 2020].
- [11] „Doppler flow meters for liquids,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ufmflowmeters.com/doppler-flow-meters-liquids/>. [Kasutatud 17 Aprill 2020].
- [12] E. Wilde, „The Difference Between Ultrasonic and Radar Level Sensors,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.apgsensors.com/about-us/blog/radar-and-ultrasonic-sensors>. [Kasutatud 18 Aprill 2020].
- [13] „X-Band Microwave Motion Sensor Module Application Note,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.limpkin.fr/public/HB100/HB100\\_Microwave\\_Sensor\\_Application\\_Note.pdf](https://www.limpkin.fr/public/HB100/HB100_Microwave_Sensor_Application_Note.pdf). [Kasutatud 20 Aprill 2020].
- [14] „Flow Measurement using Ultrasonic Cross Correlation,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.nivus.com/en/service-download/know-how/crosscorrelation/>. [Kasutatud 19 April 2020].
- [15] „Nivus - Model OFR -Radar Sensor for Contactless Flow Measurement,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.environmental-expert.com/products/nivus-model-ofr-radar-sensor-for-contactless-flow-measurement-329186>. [Kasutatud 18 Aprill 2020].
- [16] „HydroVision Q-Eye Radar MT,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.hydrovision.de/products-produkte/non-contact-radar-flow-meter-q-eye-radar-mt-beruhrungslos/>. [Kasutatud 9 Mai 2020].
- [17] „OTT SVR 100 Surface Velocity Radar for Measuring Open Channel Flow,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ott.com/products/water-flow-3/ott-svr-100-2406/>. [Kasutatud 9 Mai 2020].
- [18] „10.525 GHz Microwave Motion Sensor Module,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.limpkin.fr/public/HB100/HB100\\_Microwave\\_Sensor\\_Module\\_Datasheet.pdf](https://www.limpkin.fr/public/HB100/HB100_Microwave_Sensor_Module_Datasheet.pdf). [Kasutatud 19 Aprill 2020].

- [19] „Geopacks MFP126-S Advanced Stream Flowmeter OPERATION MANUAL,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://cdn.shopify.com/s/files/1/1602/0217/files/Complete\\_Geopacks\\_Advanced\\_FlowMeter\\_Manual\\_2012.pdf?14564095143780672759](https://cdn.shopify.com/s/files/1/1602/0217/files/Complete_Geopacks_Advanced_FlowMeter_Manual_2012.pdf?14564095143780672759). [Kasutatud 6 Mai 2020].

## Lisa 1 – Arduino programmi kood

```
#define INPUT_PIN A5 // Input pin configuration
#define AVERAGE 2 // Number of data samples to average
#define ANGLE 80 // Radar measuring angle

float doppler_div = 19.49; // Constant from velocity calculation
formula
float samples[AVERAGE]; // Array to hold measuring values
unsigned int i;

void setup() {
  Serial.begin(115200); // Data rate
  pinMode(INPUT_PIN, INPUT); // Initialise input pin
}

void loop() {
  noInterrupts();
  pulseIn(INPUT_PIN, HIGH);
  unsigned int pulseLength = 0;
  for (i = 0; i < AVERAGE; i++){
    pulseLength = pulseIn(INPUT_PIN, HIGH);
    pulseLength += pulseIn(INPUT_PIN, LOW);
    samples[i] = pulseLength;
  }
  interrupts();

  unsigned int pulseTimeTotal = samples[0];
  for (i = 1; i < AVERAGE; i++){
    pulseTimeTotal += samples[i];
  }

  unsigned int Ttime = pulseTimeTotal / AVERAGE;
  unsigned int frequency = 1000000 / Ttime;

  float velocity = (frequency/doppler_div*cos(ANGLE))*1000/3600;
  //Velocity in m/s considering measuring angle

  Serial.print("\r\n");
  Serial.print(frequency);
  Serial.print("Hz : ");
  Serial.print(velocity,3);
  Serial.print("m/s\r\n");

  delay(200);
}
```