



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

---

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# **MITME AGREGAADIGA HÜDROELEKTRIJAAMADE OPTIMEERIMINE**

OPTIMIZATION OF MULTI-UNIT HYDROELECTRIC POWER PLANTS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Jan Niilo

Üliõpilaskood: 001254AAVM

Juhendaja: Matti Keel

Tallinn, 2017. a.

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” ..... 201.....

Autor: .....  
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....  
/ allkiri /

Kaitmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsemiskomisjoni esimees .....  
/ nimi ja allkiri /

# Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Jan Niilo	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> MITME AGREGAADIGA HÜDROELEKTRIIJAAMADE OPTIMEERIMINE	
<i>Kuupäev:</i> 25.05.2017	78 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool <i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond <i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja:</i> Matti Keel <i>Töö konsultant (konsultandid):</i>	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Energiasüsteemide optimeerimise probleem muutus aktuaalseks kohe peale mitme generaatoriga energiasüsteemide loomist [1]. Nii on ka käesolevas töös tõstatatud probleem formuleerunud ajendatuna sellest, et paljudes hüdroelektrijaamades on kasutusel mitu tootmiseadet. Lõputöö ülesandeks oli mitme tootmiseadmega hüdroelektrijaama optimeerimine, kuivõrd kahtlemata on käesolevas töös vaadeldavate hüdroelektrijaamade (Saesaare ja Leevaku hüdroelektrijaamad) näol tegemist süsteemidega. Hüdroelektrijaamal on olemas terve hulk elemente ehk komponente, millest see koosneb. Nende komponentide vahel on seosed ja vastastikused mõjud ning neid saab vaadelda kui piiritletud või defineeritud tervikuid.</p> <p>Seega on aktuaalne rääkida nende süsteemide optimeerimisest ja optimaaljuhtimisest.</p> <p>Saesaare ja Leevaku hüdroelektrijaamades vaadeldi neis töötavate agregaatide koosseisu ja nendevahelise koormusjaotuse optimeerimise ülesannet. Mõlemad elektrijaamad sisaldavad kahte tootmiseadet. Seejuures piiritleti, tulenevalt mõneti laiemast tähendusest agregaatide kooslus mõistega tootmiseseade, mis sisaldab endas vastastikuseid mõjusid alates veehaaretest lõpetades imitoruga ning sisaldades seejuures ülekandeid ja generaatorseadmeid.</p> <p>Töö esimene peatükk on pühendatud teoreetilise alusinformatsiooni tutvustamisele. Ühtlasi kirjeldades, missuguseid hüdroelektrijaamu asutakse lähemalt käsitlema, mis turbiini</p>	

tüübid on seal kasutusel ja millised kasuteguri kõverad nendele turbiinidele vastavad.

Teises peatükis käsitletakse täpsemalt optimeerimisega seotud küsimusi. Tuuakse välja välimõõtmiste tulemused veekulu karakteristikute koostamiseks. Toetudes nendele, arvutatakse välja elektrijaamade tootmiseseadmete veekulu suhteliste juurdekasvude karakteristikud, kasuteguri- ning vee erikulu karakteristikud. Kasutades  $\mu$ -iteratsiooni meetodit, leitakse peatüki lõpuks optimaalsed koormusjaotused eelnimetatud hüdroelektrijaamade tootmiseseadmetele.

Kolmandas peatükis on välja töötatud loogikalahendus, mis on sobilik hüdroelektrijaamade automaatikaprogrammide täiendamiseks.

Viimases peatükis on analüüsitud antud magistritöös käsitletud optimeerimise rakendamise majanduslikku mõistlikkust ning jõutud järeldusele, et tervikuna on optimeerimislahenduse rakendamine majanduslikult hea projekt, mis tuleks ellu viia.

*Märksõnad:* hüdroelektrijaam, hüdroenergia, optimeerimine, agregaat, tootmiseseade, optimaalne juhtimine.

# Summary of the Diploma Work

<i>Author:</i> Jan Niilo	<i>Kind of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> OPTIMIZATION OF MULTI-UNIT HYDROELECTRIC POWER PLANTS	
<i>Date:</i> 25.05.2017	78 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>School of Engineering</i>	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Matti Keel <i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i> <p>Issue regarding optimization of energy systems became essential immediately after the multi-generator energy systems were developed [1]. Similarly, the problem arose in current work, formulated by the fact, that many hydropower plants have more than one generative unit. The observable hydropower plants (Saesaare and Leevaku), are both multi-generator energy systems. The task of the thesis is to optimize the multi-unit hydropower plants. There are a number of elements, of which hydropower plant consists, and there are connections, as well interactions between them, so they can be regarded as limited or defined wholes.</p> <p>Therefore, it is vital to talk about optimization and optimal control of these systems.</p> <p>The composition of units and the load distribution optimization task were observed in hydropower plants Saesaare and Leevaku. Both stations include two generative units.</p> <p>Thereby, unit was defined as a generative device that incorporates the interactions from water intakes to draft tube, also including transfer and generator devices.</p> <p>In the first chapter, the necessary theoretical basis of information is set out. Among other things, hydroelectric power plants under consideration, turbine types and typical efficiency curves of turbine types were presented.</p> <p>The second chapter observes more precisely with questions of optimization. The results about field measurements, to compile the water consumption characteristics, are pointed out. Based on these measurements, relative water consumption increments characteristics,</p>	

efficiency curves and water unit consumption characteristics are calculated.

Using the  $\mu$ -iteration method, the optimum composition of generative devices and distribution of the load between them, where calculated for above-mentioned hydropower plants.

In the third chapter, the solution of logic is developed. This is suitable for automation of hydroelectric power plants to upgrade the automation program.

In final chapter, the economic reasonableness of the implementation of optimization is examined. It is concluded, that overall, the implementation of optimization solution is economically feasible and the project should be implemented.

---

*Key words:* hydropower station, hydro energy, optimization, unit, generative device, optimal control

# Sisukord

<b>Lõputöö ülesanne.....</b>	<b>9</b>
<b>Eessõna .....</b>	<b>11</b>
<b>Sissejuhatus.....</b>	<b>12</b>
<b>1. Teoreetiline alusinformatsioon.....</b>	<b>14</b>
1.1. Üldmõisted ja sidusus tööga .....	14
1.1.1. Süsteem.....	14
1.1.2. Optimaaljuhtimine.....	14
1.2. Töö taustinformatsioon .....	15
1.2.1. Keskkonnanõuded.....	15
1.2.2. Veerežiim jões .....	16
1.2.3. Aastased äravoolu karakteristikud.....	17
1.3. Optimeerimiseks kogutav informatsioon .....	18
1.3.1. Hüdroelektrijaamades kasutatavad turbiinid.....	18
1.3.1.1 Propellerturbiin.....	19
1.3.1.2 Kaplan turbiin .....	19
1.3.1.3 Francis turbiin.....	20
1.3.1.4 Pelton turbiin.....	20
1.3.1.5 Kruviturbiin ehk Archimedese kruvi.....	21
1.3.2. Erinevate hüdroturbiinide tüüpilised karakteristikud .....	21
1.3.3. Tegelikkuusele vastavad hüdroturbiinide karakteristikud.....	22
<b>2. Hüdroelektrijaama agregaatide optimeerimine .....</b>	<b>23</b>
2.1. Üldpõhimõtteid ja metoodika.....	23
2.2. Elektrijaamade kirjeldus .....	24
2.2.1. Saesaare hüdroelektrijaam.....	24
2.2.2. Leevaku hüdroelektrijaam.....	25
2.3. Elektrijaamade tootmiseseadmete veekulude mõõtmine ja karakteristikute koostamine .....	26
2.3.1. Turbiinide veekulud Saesaare hüdroelektrijaamas .....	27
2.3.2. Turbiinide veekulud Leevaku hüdroelektrijaamas .....	29
2.4. Elektrijaamade veekulu karakteristikute aproksimeerimine ja interpoleerimine .....	31
2.4.1. Saesaare HEJ veekulu karakteristikute aproksimeerimine ja interpoleerimine.....	31
2.4.2. Leevaku HEJ veekulu karakteristikute aproksimeerimine ja interpoleerimine .....	34
2.5. Elektrijaamade veekulu suhteliste juurdekasvude karakteristikute leidmine.....	36
2.5.1. Saesaare HEJ veekulu suhteliste juurdekasvude leidmine .....	36
2.5.2. Leevaku HEJ veekulu suhteliste juurdekasvude leidmine .....	38
2.6. Elektrijaamade tootmiseseadmete kasutegurid ja erikulu.....	39
2.6.1. Saesaare HEJ tootmiseseadmete kasutegurid ja erikulud.....	40
2.6.2. Leevaku HEJ tootmiseseadmete kasutegurid ja erikulud.....	43
2.7. Elektrijaamade tootmiseseadmete optimaalsed töörežiimid.....	45
2.7.1. Elektrijaamade tootmiseseadmete optimaalsete režiimide leidmine kahe töötava tootmiseseadme korral .....	48
2.7.1.1 Optimaalsed töörežiimid Saesaare hüdroelektrijaamas kahe seadme paralleeltöö korral .....	48
2.7.1.2 Optimaalsed töörežiimid Leevaku hüdroelektrijaamas kahe seadme paralleeltöö korral.....	51
2.7.2. Elektrijaamade tootmiseseadmete üleminek ühe tootmiseseadme režiimilt kahe tootmiseseadmega režiimile ja täielikud optimaalsed töörežiimid.....	53
2.7.2.1 Ülemineku ning täielikud optimaalsed töörežiimid Saesaare hüdroelektrijaamas.....	53
2.7.2.2 Ülemineku ning täielikud optimaalsed töörežiimid Leevaku hüdroelektrijaamas .....	55
2.8. Järeldusi .....	56
<b>3. Optimeerimise loogika koostamine.....</b>	<b>57</b>
3.1. Optimaalsete töörežiimide juhtimissüsteemi väljatöötamiseks vajalik taustinformatsioon .....	59
3.2. Mitme seadmega hüdroelektrijaamade juhtimisloogika .....	60

<b>4. Optimeerimise majanduslik tulem .....</b>	<b>63</b>
4.1. Optimaaljuhtimise rakendamise rahavood.....	63
4.2. Optimeerimise kui investeerimisprojekti efektiivsuse hindamine mitme seadmega hüdroelektrijaamas .....	67
<b>Lõputöö kokkuvõte .....</b>	<b>70</b>
<b>Lisad .....</b>	<b>76</b>
<b>L.1. Hüdroelektrijaama automaatikaprogrammi täiendus Saesaare hüdroelektrijaama näitel. ....</b>	<b>77</b>



# Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	<b>Mitme agregaadiga hüdroelektrijaamade optimeerimine</b>
Üliõpilane:	<b>Jan Niilo, 001254</b>
Eriala:	<b>Elektroenergeetika</b>
Lõputöö liik:	<b>Magistritöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Matti Keel</b>
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>25.05.2017</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Instituudi direktor (allkiri)

## Teema põhjendus:

Eestis on ligi 50 hüdroelektrijaama ning paljudes neis on kasutusel mitu seadet. Reeglina aga ei ole nende töörežiim valitud optimaalne ning lähtunud on erinevatest kriteeriumitest, mis aga ei pruugi anda maksimaalset võimalikku tulemust ning efektiivset energiakasutust. Õige optimeerimine aga võib anda olenevalt kasutada olevast veehulgast märkimisväärse lisandväärtuse hüdroelektrijaamade operaatoritele. Konkreetne huvi on AS-il Generaator, et kasutada vett ära maksimaalselt optimaalselt ning seega maksimeerida aastatoodang ning samuti saadav tulu.

## Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on uurida mitme seadmega hüdroelektrijaamade seadmete koosseisu optimeerimisvõimalusi.

## Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- 1) Määrata konkreetsete turbiinide kasutatavate vooluhulkade kõverad suhtes võimsusesse. (Vooluhulgad määrata võimalusel mõõtmise teel, alternatiivselt analoogiate abil).
- 2) Uurida mitme seadmega hüdroelektrijaamade ülemineku karakteristikuid ühelt agregaadilt kahele ja optimeerida elektrijaamade töö vastavalt kasutada olevale vooluhulgale.
- 3) Koostada automaatika programmi osa elektrijaama optimaalse töö juhtimiseks.

- 4) Anda hinnang, mis muutuks optimeeritud elektrijaama töö korral võrreldes senini kasutatud juhtimissüsteemiga. (Kas energia toodang suureneks, milline võiks olla selle majanduslik kasu, mida tuleks erinevates elektrijaamades selleks teha, et optimaalse juhtimise süsteem ellu viia?)

**Lähteandmed:**

AS Generaator andmed vastavate turbiinide ja elektrijaamade kohta. Turbiinitootjate info ning internetist saadav informatsioon.

**Lõputöö konsultandid (vajadusel):**

\_\_\_\_\_

Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

\_\_\_\_\_

Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

# Eessõna

Konkreetne huvi käesoleva töö teostamisel on AS-il Generaator, et kasutada vett ära maksimaalselt optimaalselt ning seega maksimeerida aastatoodang ning samuti saadav tulu. Seega on lõputöö ülesanne formuleerunud käesoleva töö autori ideest parandada hüdroelektrijaamade töö efektiivsust.

Algandmete kogumine toimus AS-ile Generaator kuuluvates Saesaare ja Leevaku hüdroelektrijaamas. Konkreetselt teostati muuhulgas elektrijaamade veekulu mõõtmisi, milleks on tänapäeval ette nähtud spetsiaalsed seadmed. Siinkohal soovib käesoleva töö autor tänada Argo Kuusikut Tallinna Tehnikaülikooli Vee- ja keskkonnatehnika uurimisrühmast, kelle abil oli võimalik vastavate seadmetega vooluhulga mõõtmise läbiviimine.

Eraldi tänu avaldab lõputöö autor juhendaja Matti Keelele, tema asjatundliku ning toetava suhtumise eest lõputöö koostamise juhendamisel.

Lõputöö „Mitme agregaadiga hüdroelektrijaamade optimeerimine“ autoriks on Jan Niilo, kelle alaliseks elukoha aadressiks on Viljapuu pst. 110, Maardu linn, 74117 Harjumaa.

Lõputöö autori töökoht on AS Generaator, juhatuse liige.

# Sissejuhatus

Eestis on ligi 50 hüdroelektrijaama ning paljudes neis on kasutusel mitu agregaat. Reeglina aga ei ole nende töörežiim valitud optimaalne ning lähtunud on erinevatest kriteeriumitest, mis aga ei pruugi anda maksimaalset võimalikku tulemust ning efektiivset energiakasutust. Õige optimeerimine aga võib anda, olenevalt kasutada olevast veehulgast, märkimisväärse lisandväärtuse hüdroelektrijaamade operaatoritele.

Kuivõrd AS-i Generaator suuremates hüdroelektrijaamades ongi mitu tootmisseedet, siis osutub vajalikuks uurida, kas on võimalik nende tootlikkust läbi optimeerimise tõsta.

Erinevad kirjandusallikad annavad erinevaid kokkuvõtteid või koormuse suurenemise kasvusuurusi läbi optimeerimise. Kuivõrd tavapäraselt, vähemasti Eestis, ei ole hüdroelektrijaamades rakendatud optimaalsete töörežiimide järgi elektrijaama juhtimist, siis on suur tõenäosus, et selles vallas oleks võimalik tõsta ka terve sektori aastatoodangut.

Energiasüsteemide optimeerimise probleem muutus aktuaalseks kohe peale mitme generaatoriga energiasüsteemide loomist. Esimene teadusliku sisuga artikkel koormusjaotuse optimeerimiseks generaatorite vahel ilmus 1918. a. Sellest aastast alates hakkas energiasüsteemide optimeerimist käsitlevate artiklite arv kasvama [1].

Antud konkreetset optimeerimise lahendust ei ole ka maailmas väga palju praktiseeritud. Seetõttu on üsna vähe samalaadse ülesande püstitusega töid, mida antud töös võiks kasutada. Siiski on eelmise sajandi viiekümnendatest kuni kaheksakümnendate aastateni olemas materjale endisest Nõukogude liidust. Värskemate töödena on viimastel aastatel väike hüdroenergeetika vallas siiski ka teistes riikides sellisele optimeerimisele tähelepanu pööratud.

Antud töö läbiviimisel on olnud vajalik määrata uuringu- ja rakendamisobjektideks olevatel hüdroelektrijaamade veekulu-, veekulude suhteliste juurdekasvude-, kasuteguri- ja vee erikulude karakteristikud.

Eelnimetatud karakteristikute väljaselgitamiseks on vajalik kasutada analoogiatel põhinevaid kasutegurikarakteristikuid ning teise võimalusena, kasutades tänapäevaseid mõtteseadmeid ja mõõtes konkreetset objektil etteantud koormustele vastavad veetarbed. Selle tulemusena saame tootmisseedmete kogukasuteguri.

Veekulu mõõtmistulemustele toetudes on võimalik optimeerida hüdroelektrijaama töörežiim ning välja tuua tema olulised parameetrid ja suurenev lisaväärtus. Kuivõrd optimaalsete režiimide välja töötamine toetub iteratsiooniarvutustele, siis on lahenduse hõlbustamiseks vajalik koostada abiprogramm. See võib olla näiteks kas „*Exceli*“ tabeli vormis, kasutades Visual Basicut makrode kirjutamiseks või muid analoogseid võimalusi.

Tulemustest lähtuvalt on võimalik koostada elektrijaamade juhtimistarkvara uuendus, mis omakorda võimaldab rakendada optimaalset juhtimist elektrijaamas.

Analoogse töö otstarbekuse hindamisel tuleb hinnata ka selle lahenduse elluviimise võimalikku majanduslikku tasuvust.

Töö struktuur on üles ehitatud vastavalt lähteülesandele, mille esimeses osas tuuakse välja teoreetiline alusinformatsioon, teises peatükis käsitletakse elektrijaamade optimeerimise ülesande lahendamist, neljandas osas töötatakse välja loogikalahendus elektrijaama optimaalse töörežiimi rakendamiseks ning viimase osas analüüsitakse optimeerimise rakendamise majanduslikku otstarbekust.

# 1. Teoreetiline alusinformatsioon

## 1.1. Üldmõisted ja sidusus tööga

### 1.1.1. Süsteem

Süsteem on objekt:

- 1) mis koosneb elementidest (komponentidest) ja mille elementide vahel on mingisugused seosed või vastastikused mõjud
- 2) mis kujutab endast mingis mõttes piiritletud või defineeritud tervikut või mida vaadeldakse kui tervikut.

Süsteemi iga element (komponent) võib olla tervik objekt või süsteem ehk allsüsteem [1].

Kahtlemata on käesolevas töös vaadeldavate elektrijaamade näol tegemist süsteemidega. Hüdrolektrijaamal on olemas terve hulk komponente, millest see koosneb, nende komponentide vahel on seosed ja vastastikused mõjud ning neid saab vaadelda kui piiritletud või defineeritud tervikuid.

Neid saab liigitada üldise elektrisüsteemi allsüsteemiks, kuid kuivõrd optimeeritakse kitsalt elektrijaamade agregaatide koosseisu, vaadeldakse Saesaare ja Leevaku hüdrolektrijaamu kui kahte erinevat terviklikku süsteemi.

### 1.1.2. Optimaaljuhtimine

Optimaaljuhtimine on selline juhtimine, kus juhtimise eesmärgiks on ühe või mitme näitaja optimeerimine. Optimaalne juhtimine on teatud mõttes parim juhtimine.

Optimaaljuhtimise eesmärgiks on kulude, kadude või muude näitajate minimeerimine, kasumi või väljundite maksimeerimine jne. Lihtsamates juhtimisülesannetes on sageli vaid üks optimeerimiskriteerium, kuid keerukamad juhtimisülesanded võivad sisaldada ka mitmeid optimeerimiskriteeriumeid.

Optimaaljuhtimise põhietapid on järgmised:

- 1) optimaaljuhtimise ülesande püstitamine (sisaldab alati ühte või mitut optimeerimisoperaatorit)
- 2) vajaliku informatsiooni hankimine

- 3) optimaalsete otsuste või optimaalse plaani leidmine (optimeerimine)
- 4) otsuste analüüs
- 5) otsuste realiseerimine
- 6) otsuste efektiivsuse analüüs (tagasiside) [1]

## **1.2. Töö taustinformatsioon**

Käesolev töö käsitleb sisuliselt teatava süsteemi optimaaljuhtimise ülesannet. Konkreetselt on vaatluse all kahes erinevas hüdroelektrijaamas töötavate agregaatide koosseisu ja nendevahelise koormusjaotuse optimeerimine. Mõlemad elektrijaamad sisaldavad kahte tootmiseadet. Edaspidi kasutataksegi tootmiseadme mõistet, kuivõrd see mõiste on mõneti laiem, kui agregaat. Tootmiseadme hõlmab veehaarde, torustiku, turbiini, imitoru, ülekande ning generaatori mõjusid seadme kasuteguri osas. Sellele lähenemisele viitab ka kirjandusallikas [2]. Saesaare hüdroelektrijaamas on tootmiseadmed ühesugused (identsed), sisaldades Francis tüüpi turbiine. Leevaku hüdroelektrijaamas on tegemist kahe erineva tootmiseadmega, kus ühe seadme generaatorit käitab Kaplan tüüpi ning teise generaatorit – Semikaplan tüüpi turbiin.

Saesaare ja Leevaku hüdroelektrijaamade tänane töörežiim ja juhtimine ei toimu mitte just väga teaduspõhistel põhjendustel ja alustel. Sellest tulenevalt püüab antud magistritöö anda vastuseid lähteülesandes püstitatud küsimustele.

### **1.2.1. Keskkonnanõuded**

Keskkonnanõuetest tulenevalt, tuleb Eestis töötavatel hüdroelektrijaamadel vastavalt veeseadusele tagada vesiehitisest allpool looduslik voolusängis ökoloogiline miinimumvooluhulk või looduslik äravool, kui looduslik äravool on ökoloogilisest miinimumvooluhulgast väiksem [3].

Sisuliselt tähendab see seda, et neis elektrijaamades ei ole üldreeglina lubatud veehulga reguleerimiseks vee kogumine paisu ehk veereservuaari. Seetõttu saab liigitada meil töötavad hüdroelektrijaamad „*run-of-river*“ ehk läbivoolu-hüdroelektrijaamadeks.

### 1.2.2. Veerežiim jões

Oluliseks teguriks on ka veerežiim jões [4]. Vooluhulgad jões sõltuvad maa pinnalt jõkke voolavast veest (pinnatoide) ja pinnasest jõkke voolavast veest (pinnase toide). Eristatakse jõgedele kolme erinevat iseloomulikku olekut [5]:

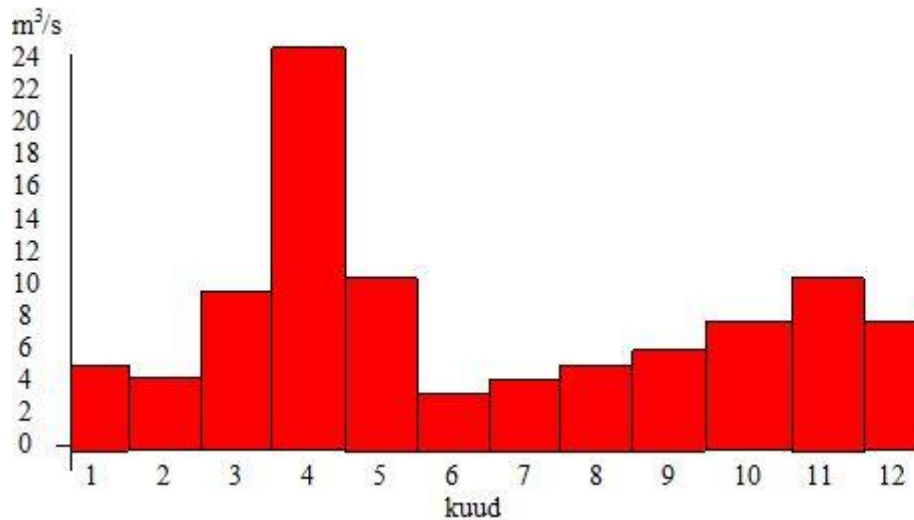
1. Madalseis – periood, mille puhul on jõed põhiliselt pinnasetoitelised (allikad). Seda perioodi täheldame enamikes jõgedes suvel, aga ka talvel, kui sademed langevad tahkel kujul ja need ei sula.
2. Üleujutused – iga-aastaselt korduv periood suurenenud pinnavee äravooluga, mis on põhjustatud kevadisest lume sulamisest, mägistes piirkondades suvise lume ja liustike sulamise tagajärjel. Viimane ei kehti Eesti jõgede kohta.
3. Tulvad – ebaregulaarne korduv suurenenud pinnatoiteline periood, mis on põhjustatud tugevatest vihmadest ja talvistest suladest.

Kuivõrd eelpool selgitatuna on tegemist läbivoolu-elektrijaamadega, on antud töö eesmärgi suhtes oluline hinnata, missugusel perioodil on optimeerimine mõistlik ning missugusel perioodil pole sellel mõtet. On selge, et kui vett on rohkem, kui elektrijaama turbiinid suudavad tarbida, siis ülejäänud vesi tuleb lasta „*run-of-river*“ tüüpi hüdroelektrijaamas liigveelasu kaudu mööda. See on ka vajalik ohutuse seisukohast, et mitte tekitada üleujutusi ja purustusi ülalpool paisu. Seega on vajalik teada keskmisi aastaseid äravoolukarakteristikuid.



### 1.2.3. Aastased äravoolu karakteristikud

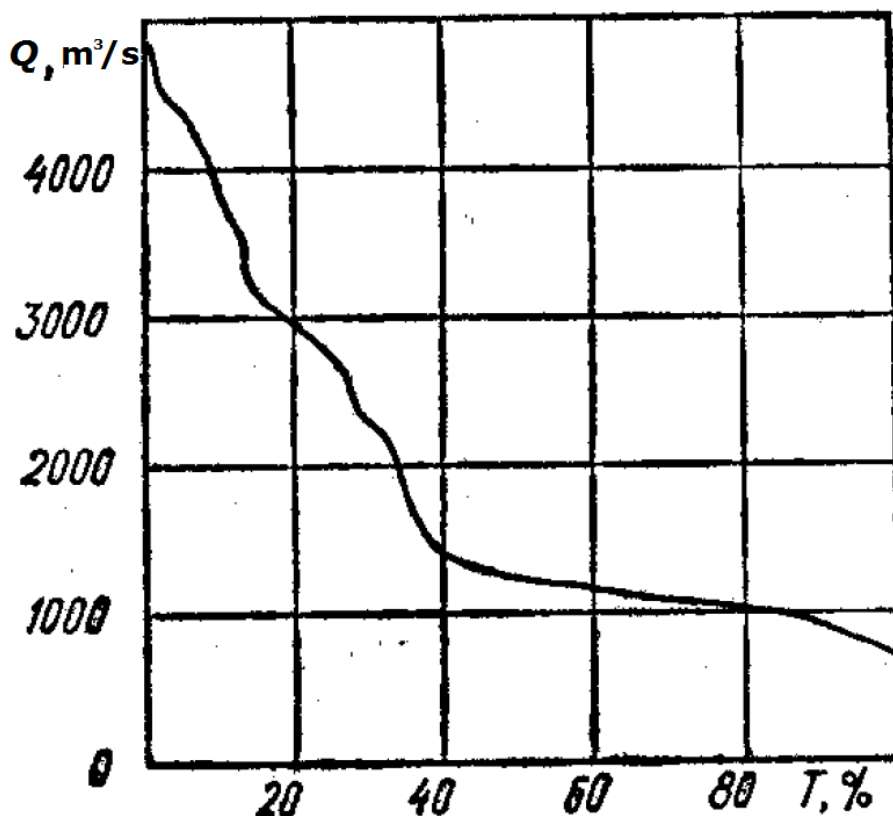
Eesti jõgedele on iseloomulik vooluhulga sesoonne muutumine (Joonis 1) [6].



*Joonis 1. Vooluhulga dünaamika Väikesel Emajõel*

Välja on toodud kuude keskmised vooluhulgad. Aastasest äravoolust langeb kevadele keskmiselt 43%, suvele 14%, sügisele 24% ja talvele 19%. Teravalt tõuseb esile maksimaalse vooluhulgaga periood aprilli lõpul, mis väikestel jõgedel, aga ka suurematel Lääne-Eesti jõgedel võib moodustada isegi 40-90 % aastasest äravoolust. Minimaalsed vooluhulgad on juunis-juulis ja talvel veebruaris [6].

Selline lähenemine aga ei anna väga oluliselt ülevaatlikku pilti jõe omadustest hüdroelektrijaama suhtes. Väikeste jõgede osas (mida Eesti jõed kahtlemata on), kus esineb vähe aega vee vähesust või väga järsku hüdrograafi graafiku kuju muutust, on kõige otstarbekam teha veerežiimi prognoose, kasutades ajakohaseid meteoroloogilisi andmeid [5]. Seetõttu on vajalik taandada joonisel (Joonis 1) esitatud graafik vooluhulga kestuskõveraks (Joonis 2) mitmete perioodide keskmistele vooluhulkadele või leida see, kasutades ajakohaseid meteoroloogilisi andmeid.



*Joonis 2. Dnepri jõe keskmiste vee vooluhulkade esinemise kestuskõver [5]*

Eelnev piiritleb ära neis elektrijaamades optimeerimise võimalikkuse ja mahu. Seega on eesmärgiks optimeerida elektrijaamade tootmiseseadmete töö vastavalt jõgedes saadaolevale vooluhulgale, arvestades seejuures suurvee perioodil oleva erisusega. Ülesanne on justkui tagurpidi pööratud, võrreldes tavapärase elektrijaama optimeerimisülesandega, kus elektrijaama töö tuleks optimeerida vastavalt tarbimiskoormusele.

### **1.3. Optimeerimiseks kogutav informatsioon**

Et püstitatud ülesannet edukalt lahendada ning optimeerida hüdroelektrijaama töö, on vajalik välja selgitada, mis tüüpi seadmeid elektrijaamas kasutatakse ning leida agregaatide karakteristikud. Antud juhul on vajalik välja selgitada konkreetsed võimsuse ja veekulu vahelised sõltuvused.

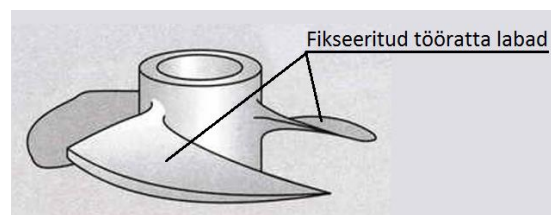
#### **1.3.1. Hüdroelektrijaamades kasutatavad turbiinid**

Hüdroturbiinide valikul on oluline silmas pidada, et iga hüdroelektrijaama jaoks on tegemist, piltlikult öeldes, just temale sobiva nn rätsepa ülikonna kujundamisega. See tähendab, et igal

elektrijaamal on oma iseärasused, mis tulenevad asukoha geoloogiast ning sellest lähtuvast survekõrgusest, jõgede vooluhulkadest ja neist määratud elektrijaama võimsusest. Hüdroturbiinid jagunevad üldisemate parameetrite järgi enamkasutatavatest turbiinitüüpidest neljaks. Nendeks on propeller-, Kaplan-, Francis- ja Peltontüüpi hüdroturbiinid. Tulenevalt keskkonnanõuete karmistumisest, on järjest enam hakanud huvi pakkuma ka varasemalt kõrvale jäänud turbiini tüüp Archimedese kruvi, mis on kalastikule ka täiendavate lisaseadmeteta (prahi ja kalatõrje võredeta) ohutu ja seetõttu kasutatav seal, kus teised turbiinitüübid on mittesoovitavad kalastiku hukkumise tõttu.

### 1.3.1.1 Propellerturbiin

Propellerturbiin (Joonis 3) on litsaim lahendus, mida on võimalik kasutada väikese ja keskmise suurusega hüdroelektrijaamades survekõrgustel 1 – 11 meetrit ja vooluhulkadel 0,5 – 40 m<sup>3</sup>/s [7]. Selle turbiini eelisteks on madal valmistamiskulu, lihtne disain, kuid

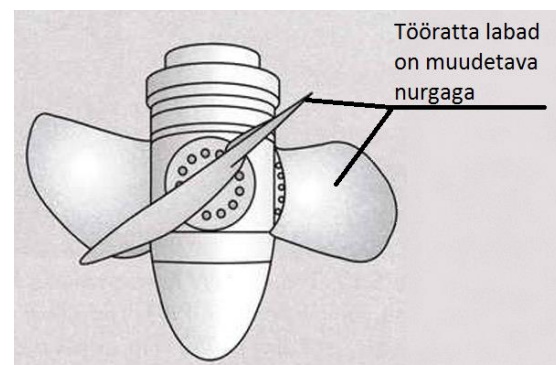


**Joonis 3. Propellerturbiini tööratas**

negatiivseks pooleks on fikseeritud juhtlabade korral vooluhulkade ja võimsuste reguleerimisvõimaluse puudumine ning kui elektrijaam koosneb vaid propellerturbiinidest, tekitatakse vooluhulkade ja veetasemete järske varieerumisi jões. Selline tegevus on aga looduskeskkonna suhtes negatiivse mõjuga ja viimasel ajal see turbiinitüüp üksinda elektrijaama valikuks pole parim variant.

### 1.3.1.2 Kaplan turbiin

Kaplan turbiin (Joonis 4) on üks paremaid lahendusi, mis on tänapäevastes hüdroelektrijaamades kasutusel, kui survekõrgused on, sarnaselt propellerturbiinile, vahemikus 1 – 11 meetrit ja vooluhulgad on vahemikus 0,5 – 40 m<sup>3</sup>/s [7]. Seda tüüpi turbiini eelisteks on hea reguleerimisvõimekus üsna laias veetarbe vahemikus ning seetõttu ka



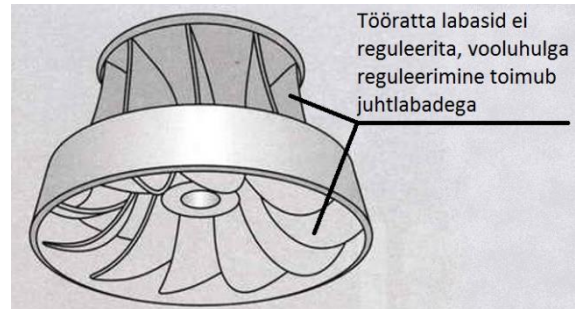
**Joonis 4. Kaplan turbiini tööratas**

keskkonnasõbralikkus. Kaplan turbiinid jagunevad täiendavalt oma konstruktsiooni ja juhtlabade asetuse tõttu mitmeks erinevaks alatüübiks ja seetõttu on võimalik neid väga hästi erinevatesse konstruktsioonidesse sobitada. Sel turbiinil on ka väga hea kasutegur.

Negatiivsest poolest võib välja tuua mõnevõrra suuremat maksumust, kuid pikemas perspektiivis kompenseerivad positiivsed küljed selle mitmekordselt. Sellist tüüpi turbiinid on kasutusel ka Leevaku hüdroelektrijaamas.

### 1.3.1.3 Francis turbiin

Francis turbiini (Joonis 5) kasutatakse suurematel survekõrgustel, võrreldes propeller- ja Kaplan turbiinidega. Seda tüüpi turbiinid sobivad vooluhulkadele  $0,4 - 23 \text{ m}^3/\text{s}$  ja survekõrgustele  $9 - 400 \text{ m}$ . Kasutegur on kõrge  $50 - 100\%$  disainitud vooluhulga vahemikus [7]. Ei sobi hästi madalatele survekõrgustele. Sellist tüüpi turbiinid on kasutusel Eesti mõistes suhteliselt suure survekõrgusega Saesaare hüdroelektrijaamas.

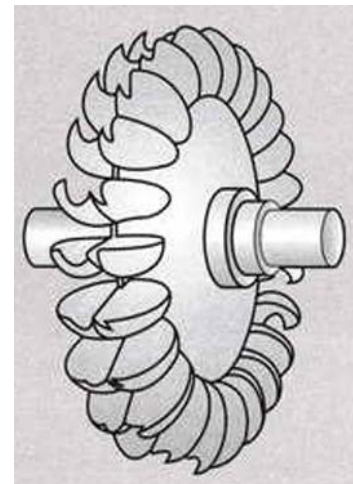


Tööratta labasid ei reguleerita, vooluhulga reguleerimine toimub juhtlabadega

*Joonis 5. Francis turbiini tööratas*

### 1.3.1.4 Pelton turbiin

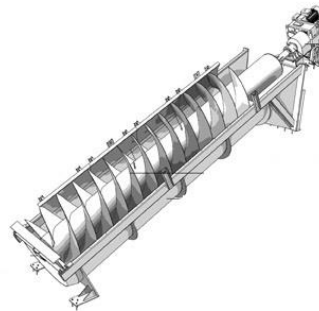
Pelton turbiini (Joonis 6) kasutusvaldkond jääb väikestes ja keskmise suurusega hüdroelektrijaamades suurtele survekõrgustele ning mõnevõrra väiksemate vooluhulkade kasutusvaldkonda. Need turbiinid on sobivad survekõrgustele  $100 - 400$  meetrit ja vooluhulkadele  $0,01 - 1 \text{ m}^3/\text{s}$  [7]. Eestis selliseid survekõrgusi ei saavutata ja seetõttu ei ole meil ka ühtegi Pelton turbiinil põhinevat hüdroelektrijaama lahendust.



*Joonis 6. Pelton turbiini tööratas*

### 1.3.1.5 Kruviturbiin ehk Archimedese kruvi

Kruviturbiin (Joonis 7) on tegelikkuses üks vanimaid turbiinitüüpe. Seda tüüpi turbiini kasutamine on aga varasemalt vähe huvipakkuv olnud, kuivõrd vajab suurt ülekande arvu, et tagada generaatorile vastav pöörlemissagedus. Varasemad tehnoloogiad ei võimaldanud mõistliku vastupidavuse ja kasuteguriga reductoreid

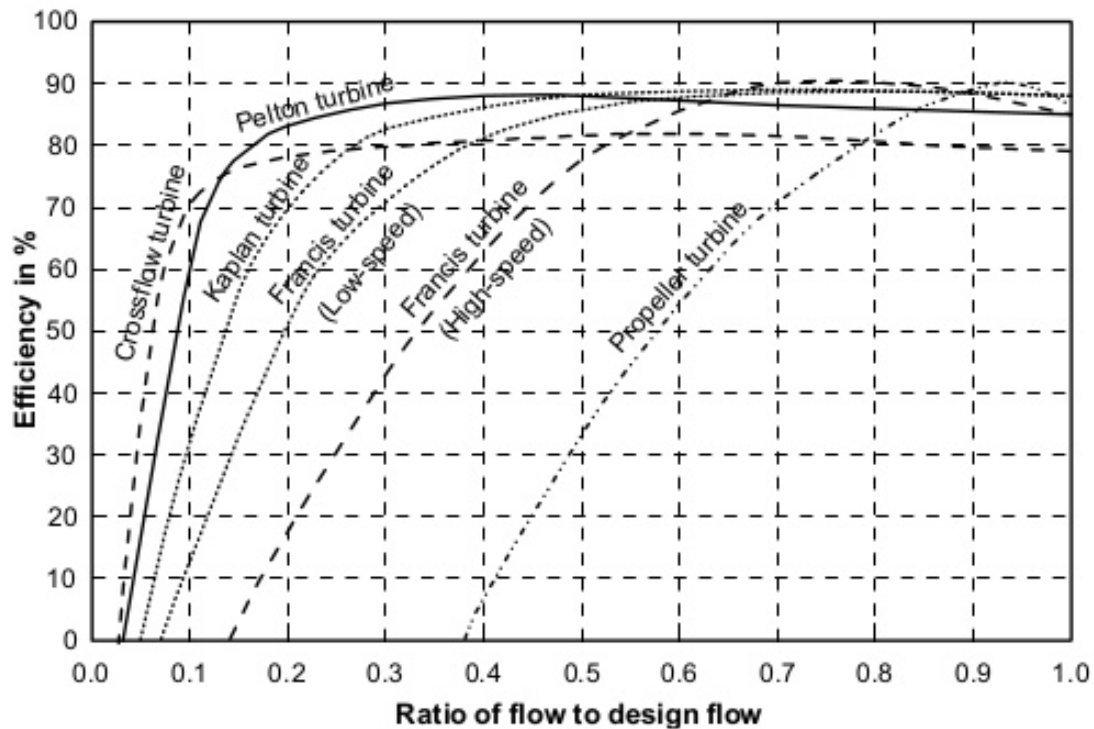


*Joonis 7. Kruviturbiini lahendus [17]*

kruviturbiinidele valmistada. Tänapäevased tehnoloogiad on aga sellise turbiinitüübi kasutamise võimalikuks teinud. Turbiinil on oluline hea omadus. Nimelt võivad kalad seda läbida ja neil ei esine vigastusi. Archimedese kruviturbiin sobib survekõrgustele 1 – 8 meetrit ning vooluhulkadele 0,25 – 14,5 m<sup>3</sup>/s. Samuti on tema kasutegur sarnaselt Kaplan turbiinile laias koormusvahemikus kõrge [8]. Sellise tehnoloogiaga turbiin võib olla lahenduseks objektidel, kus keskkonnaküsimused on eriti teravalt päevakorral.

### 1.3.2. Erinevate hüdroturbiinide tüüpilised karakteristikud

Võimalik on kasutada kirjandusallikatest leitavaid tüüpilisi karakteristikuid (näiteks Joonis 8). Antud karakteristikud antakse üldjuhul just turbiinide kohta. See tähendab, et sealjuures ei ole arvestatud kasutegureid ülekannetele, generaatori laagritele ja generaatori elektrilist kasutegurit. Seega tuleb kirjandusallikatest leitud tüüpiliste karakteristikute kaudu reaalse olukorra kirjeldamisel arvestada ka eelpoolnimetatud kasutegureid. Samuti ei pruugi tingimused, kuhu peamine agregaat ehk turbiin on paigaldatud, olla absoluutselt ideaalsed. Sellised tingimused võivad muuta tootmiseseadme üldist karakteristikut.



Joonis 8. Tüüpilised kasutegurikõverad erinevate hüdroturbiini tüüpide kohta [9]

### 1.3.3. Tegelikkuusele vastavad hüdroturbiinide karakteristikud

Tihti peale on tänapäeval valmistatud turbiinide osas probleemiks, et nendega ei anta väga täpset ja täielikku informatsiooni tellijale kaasa. Olemas võib olla vaid mõni parameeter, mis tähistab näiteks maksimum kasutegurit mingil koormusel. Samuti ei ole ka need näitajad, turbiini paigaldades konkreetsesse asukohta, tingimata väga täpsed. Sellele probleemile viidatakse ka kirjandusallikates ning täiendavalt selgitatakse, et isegi kui tegemist on tüübilt ja parameetritelt identsete seadmetega, on nad alati veidi erinevad. See tuleneb valmistustolerantsidest, samuti veehaarde ja äravoolu lahendustest elektrijaamas. Samuti muudab tavapärase kulumine, mis võib olla põhjustatud kavitatsioonist ja abrasiiverosioonist, turbiinide tööparameetreid [10]. Seadmete välikatsetused tänapäevaste mõõteseadmetega, kus mõõdetakse iga üksiku seadme võimsus ja sellele vastav vooluhulk etteantud survekõrgusel, võimaldab ülal nimetatud erinevused välja selgitada. Selle miinuseks on võimalik tekkidavõiv mõõteviga. Eeldatavasti on aga viga mõõtepiirkonnas üsna sarnane. Kuna käesoleva optimeerimise ülesande lahendamiseks on vajalik välja selgitada ühes elektrijaamas erinevate tootmiseseadmete vaheline optimaalne koormusjaotus ehk suhestamine, siis optimeerimise seisukohast vaadatuna ei ole see väga oluline.

## 2. Hüdrolektriijaama agregaatide optimeerimine

### 2.1. Üldpõhimõtteid ja meetodika

Käesoleva töö lähteülesandeks on:

- 1) Määrata konkreetsete turbiinide kasutatavate vooluhulkade kõverad suhtes võimsusesse. (Vooluhulgad määrata võimalusel mõõtmise teel, alternatiivselt aga analoogiate abil).
- 2) Uurida mitme seadmega hüdrolektriijaamade ülemineku karakteristikuid ühelt agregaadilt kahele ja optimeerida elektriijaamade töö vastavalt kasutada olevale vooluhulgale.
- 3) Koostada automaatika programmi osa loogikaskeem elektriijaama optimaalse töö juhtimiseks.
- 4) Anda hinnang, mis muutuks optimeeritud elektriijaama töö korral võrreldes senini kasutatud juhtimis põhimõtetega. (Kas energia toodang suureneks? Milline võiks olla selle majanduslik kasu? Mida tuleks erinevates elektriijaamades selleks teha, et optimaalse juhtimise süsteem ellu viia?)

Eelnevast tulenevalt ja arvestades kirjandusallikas [4] kirjeldatud, on käesoleva töö lahendamiseks vajalik määrata tootmiseseadmete veekulu karakteristikud. Kuivõrd eelmises peatükis on järeldatud, et parima tulemuse töö usaldusväärsuse osas annab reaalsete karakteristikute koostamine väliuuringute käigus, siis selles töös on valitud algandmete saamiseks just väliuuringud.

Järgmiseks etapiks on saadud katseandmete analüüs ja aproksimeerimine ning vajadusel interpoleerimine. Tulemuseks on töös kasutatavad karakteristikud, mis loovad eelduse optimaalsete töörežiimide väljaselgitamiseks.

Edasi tuleb eelmises lõigus toodud tulemused viia sobivaks elektriijaama automaatikaprogrammi muutmiseks ning vastavalt sellele koostada programmiosa. Kirjeldada tuleb programmi käiku, mis annab selguse, mis viisil elektriijaama juhitakse.

Lõpetuseks tuleb analüüsida, kas teostatud töö rakendamine kasvatab elektriijaamade aastatoodangut ning millised on võimalused sellist rakendust elektriijaamades ellu viia.

## 2.2. Elektriijaamade kirjeldus

Käesolev töö keskendub AS-ile Generaator kuuluvate kahe hüdroelektriijaama – Saesaare ja Leevaku hüdroelektriijaama – tootmiseadmete talitluse optimeerimisele.

### 2.2.1. Saesaare hüdroelektriijaam

Saesaare hüdroelektriijaam (Joonis 9) asub Põlva maakonnas Ahja jõel (X=6445557,86; Y=679835,69). Hüdroelektriijaama rajatised asuvad Vastse-Kuuste valla ja Põlva valla piiril, nii et hüdroelektriijaama hoone, abihoone ja alajaam asuvad Põlva valla Taevaskoja küla maal, paisu muldkeha, juurdepääsutee ja sild ning veehaare aga Vastse-Kuuste valla Kiidjärve küla territooriumil.



*Joonis 9. Saesaare hüdroelektriijaama pais (vasakul) ja hüdroelektriijaam (paremal) (autori foto)*

Elektriijaamas on 4 tootmiseadet, millest 2 on konserveeritud ning 2 on töös. Hüdroenergiast muudab täna elektrienergiaks 2 reguleeritavat Francis-turbiini koostoimes asünkroongeneraatoritega, mille maksimaalne koguvõimsus on 2 x 97 kW. Turbiinid on automaatselt ja sujuvalt reguleeritavad, mistõttu tulenevalt keskkonnanõuetest on võimalik tagada ühtlane vooluhulk vastavalt looduslikule vooluhulgale.

Saesaare hüdrosõlme moodustab pinnaspaisuna rajatud u 100 m pikkune ja 10 m kõrgune pais, mille ette on moodustunud Saesaare veehoidla, paisutuskõrgus on 7,65 m liigveelasu juures. Elektriijaama survekõrgus on 9 m.

Normaalpaisutuskõrguseks on 48,02 m absoluutkõrgusel. Hüdroelektriijaamade toimimiseks on vajalik vee erikasutusluba ning paisjärve veetase fikseeritakse absoluutkõrgusel mere pinnast. Jõujaama pealevool on lahendatud kahe 60 m pikkuse ja 1 m läbimõõduga



pealevoolutoru abil, mis paiknevad Saesaare veehoidla parempoolses kaldas. Äravooluks on rajatud u 80 m pikkune äravoolukanal. Ülevoolupaisu alumise osa moodustab u 1 m paksuse betoonkihiga kaetud pinnas, ülemise osa aga – eemaldatavad varjad.

Vahetult allpool liigveelasku on 6 m pikkune kaldpind ja u 30 m pikkune betoneeritud voolurahusti, millele järgneb liigvee äravoolukanal.

## 2.2.2. Leevaku hüdroelektrijaam

Leevaku hüdroelektrijaam (Joonis 10) asub Põlva maakonnas Leevaku külas Võhandu jõel (X=6443691,00; Y=697275,00). Leevaku hüdroelektrijaam ja pais asub Leevaku-Rahumäe tee ääres, Võhandu jõe kaldal. Paisust ülesvoolu moodustub Leevaku paisjärv, jõge ületab asfalteeritud autoteega betoonsild, mis toetub betoonist silla- ja ühtlasi ka paisu kaldasammastele.



*Joonis 10. Leevaku hüdroelektrijaam ja pais (foto J. Raudmaa)*

Leevakul on veejõudu kasutatud juba kaua. Vesiveski ehitati Leevakule 1835. a. 1893. aastal tegutsesid juba jahu- ja saeveskid, samuti sai seal villa kraasida. 1880. aastatel asutatud manufaktuuris kooti sineliriiet ja vooditekke Vene armeele. 1910. aastast tootis tööstusettevõtte oma tarbeks elektrit. 1917. aastast alates müüdi elektrienergiat taludele ja Toolamaa mõisale.

Jõujaamas on 2 Kaplan-turbiini. Jaama maksimaalne võimsus on ideaaltingimustel 185 kW. Tootmisseedmed on erinevad. Esimene turbiin on nn täis-Kaplan tüüpi, maksimaalse netovõimsusega 107 kW, ning teine – semi-Kaplan tüüpi, maksimaalse netovõimsusega 77kW. Niisugused koormused avalduvad tavapäraselt lühiajaliselt koormuste muutumisel.

Leevaku hüdroosõlme moodustab Võhandu jõe pinnaspaisuna rajatud u 110 m pikkune ja 5 m kõrgune pais, mille ette on moodustunud Leevaku paisjärv, paisutuskõrgus 3,0 m.

Normaalpaisutuskõrguseks on 39,20 m absoluutkõrgusel. Jõujaama pealevool on lahendatud kahe 15 m pikkuse ja 2 m läbimõõduga pealevoolutoru abil, mis paiknevad Leevaku paisjärve vasakpoolses kaldas.

Paisule on liigveelasuks rajatud ülevool, mis jaguneb varjapaaside tulemusena 12 avaks, mille keskel paikneb paisu toetuseks 1 betoonsammas. 2012. aastal lammutati vana kaheavaline Leevaku sild täielikult, seejärel ehitati uued sambad, paigaldati metalltalad, valati raudbetoonist dekiplaat ning asfalteeriti uus sild.

Ülevoolu ava pikkus on 16,00 m, millest reguleeritavate avade kogulaius on 13,60 m. Vahetult allpool liigveelasku on u 10 m pikkune betoneeritud kaldpind voolurahustamiseks.

### **2.3. Elektriijaamade tootmiseseadmete veekulude mõõtmine ja karakteristikute koostamine**

Et määrata tootmiseseadmete veekulusid, tuleb mõõta vooluhulka, mis läbib tootmiseseadme turbiini. Vooluhulkade mõõtmised teostati Tallinna Tehnikaülikooli vee- ja keskkonnatehnika uurimisrühma poolt märtsis 2017 koostöös käesoleva töö autoriga. Selleks et võimaldada vooluhulkade mõõtmist elektriijaamade tootmiseseadmete võimsuspiirkonnas, oli vajalik elektriijaama operatiivne kaugjuhtimine, mida teostati vaheetult mõõtekohal ehk elektriijaamade veehaarete juures. Vooluhulga mõõtmisviisid ja kasutatavad mõõteseadmed olid elektriijaamades erinevad. Saesaare hüdroelektriijaamas kasutati lihtsamat vooluhulga mõõtmise seadet, mis võimaldab mõõta vee voolukiirusi kindlas punktis, arvutades etteantud ristlõikepindala kaudu mõõteseria lõpus välja ka koheselt vooluhulga. Leevakul kasutati aga teist tüüpi, akustilist mõõteseadet, mis mõõtis jõel vedamise käigus (antud juhul üle veehaarde lähte) samaaegselt selle laiuse, sügavuse ja voolukiirused kogu profiilil ning seejärel arvutas kokku vooluhulga. Sobilikel tingimustel saab sellega vooluhulka mõõta kiiremini kui muude meetoditega. Erinevate mõõteseadmete kasutamise peamiseks põhjuseks osutus aga veehaarete eripära. Saesaare hüdroelektriijaamas on kitsad olud ning väiksem veehaare vee sügavusega vaid 1 meeter, kus oli sobilik ja võimalik mõõta väiksema seadmega. Leevaku hüdroelektriijaamas on veehaarde sügavus 3 meetrit ja seega ei olnud seal mõeldav väikese käsiseadmega mõõtmine. Seetõttu kasutati seal suuremat, samas ka paindlikumat seadet.

### 2.3.1. Turbiinide veekulud Saesaare hüdroelektrijaamas

Turbiinide veetarvete mõõtmiseks valiti kaks kohta jõujaama pealevoolu avadest: 1) esimese turbiini pealevoolu ava enne võret ja 2) teise turbiini pealevoolu ava enne võret. Vooluhulkade mõõtmiskohtade valikul jälgiti, et mõõdetava pealevoolu ava vooluhulki ei segaks mittemõõdetava pealevoolu ava vooluhulgad. Mõõtmiste ajal olid mõlemad turbiinid töös.

Mõõtekohale paigaldati mõõtelint, mida kasutati mõõtepunktide kauguse määramiseks pealevoolu avas. Mõlemal pealevoolu ava kambri vasakpoolne külg võeti nullpunktiks, kus sügavus oli pealevoolu ava kambri voolava vee sügavus ja kaugus oli null meetrit. Iga järgneva mõõtepunti vaheks võeti 0,20 m, mis andis 10 kuni 11 mõõtepunkti olenevalt pealevoolu ava laiuselt (I ava laius 2,30 m ja II ava laius 2,2 m). Parempoolne pealevoolu ava külg võeti lõpp punktiks, kus kaugus oli maksimaalne ja veesügavus oli pealevoolu ava kambri voolava vee sügavus. Pealevoolu ava kambrid on oma kujult ristküliku kujulised.

Vooluhulga mõõtmine tehti, kui Saesaare veehoidla veetasapind oli kõrgusel 47,97 m.abs. Antud veetase tähendab, et turbiinide survekõrguseks oli 9 m. Veehoidlat kattis jääkate. Pealevoolu avade ees puudus jääkate umbes 5 m raadiuses.

Veetarbe mõõtmise alustati turbiini labade suletud asendist. Järk järgult avades turbiini labasid kuni nende maksimaalse avatuseni, teostati vooluhulga mõõtmised pealevoolu avas ning fikseeriti turbiini koormus  $P [kW]$ .

Mõlemal pealevoolu aval teostati 12 vooluhulga mõõtmist ning esimesel aval täiendavalt 1 lisamõõtmine, saavutamaks karakteristiku suuremat ulatust.

Vooluhulga mõõtmiseks kasutatav seade: firma SonTek/YSI Inc. Flow Tracker Handheld ADV. Vooluhulgamõõtja põhineb akustilisel ultraheli seadmel, mida juhitakse lihtsa klahvistik juhtpaneeliga, kus kuvatakse reaajas juhised ja andmed LCD ekraanil. Süsteem kogub andmed kindlaksmääratud aja jooksul (40 sekundit) igas mõõtepunktis. Vajadusel sisestatakse igas mõõtepunktis vee sügavus ja mõõtepunkti kaugus algpunktist. Reaajas kuvatakse mõõtepunktis vee kiirus ja mõõtepunkti kaugus algpunktist. Andmed ja mõõtetulemused salvestatakse seadmesse ning neid on võimalik koheselt ekraanilt näha ja hiljem arvutisse laadida. Mõõtetulemused, mida saab koheselt seadmest näha, on vooluhulk  $Q$ , keskmine voolu kiirus  $V$ , maksimaalne voolukiirus  $V_{max}$ , sängi laius  $L$ , veekogu ristlõike pindala  $S$ , keskmine sügavus  $H$ , maksimaalne sügavus  $H_{max}$  ja veetemperatuuri.

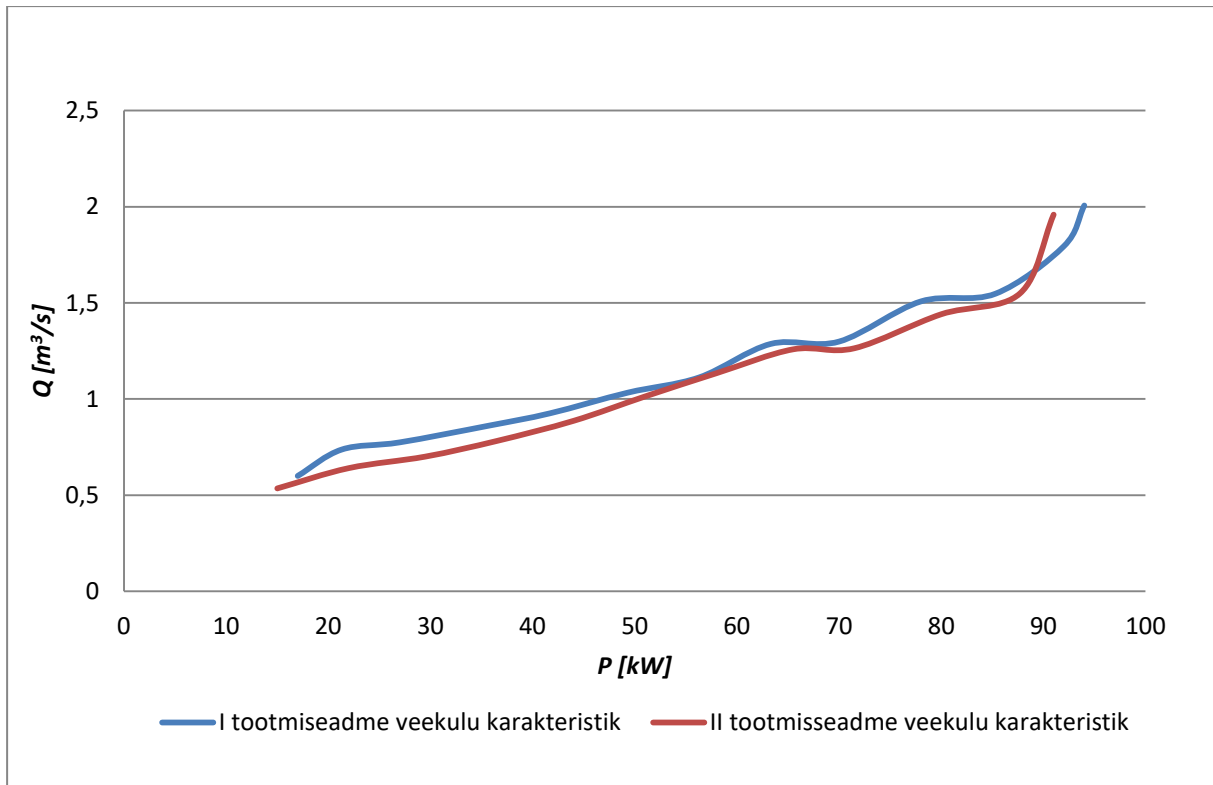
Käesolevas töös kasutatavateks andmeteks on turbiini veetarve  $Q$  koos vastava tootmiseadme koormusega  $P$ .

Mõõtmistulemused on välja toodud tabelis (Tabel 1).

**Tabel 1. Saesaare HEJ vooluhulkade mõõtmise tulemused**

nr.	I tootmiseadme		II tootmiseadme	
	$P$ kW	$Q$ $m^3/s$	$P$ kW	$Q$ $m^3/s$
1*	17	0,6001		
1	21,3	0,7372	15	0,5352
2	27	0,7748	22	0,6408
3	35,7	0,8615	29,5	0,7008
4	41,7	0,9259	36,5	0,7822
5	49,3	1,0332	44	0,8867
6	56,3	1,1125	51	1,0134
7	63,3	1,2867	58	1,1345
8	70	1,2991	65,5	1,2587
9	78	1,5077	71,5	1,2643
10	85,3	1,5478	80	1,4412
11	92	1,7949	87,7	1,5491
12	94	2,0067	91	1,9591

Mõõtmistulemustele vastavalt veekulu karakteristikult (Joonis 11) on näha, et väiksemate vooluhulkade korral on vooluhulga kõverad üsna sujuvad, kuid koormuse tõustes üle 50 kW muutuvad tulemused mõnevõrra kaootilisemaks. Seda võib seletada asjaoluga, et suurematel vooluhulkadel tekkis veehaardesse ka rohkem turbulentsmaid veekihte, mistõttu võib sellisel juhul ka mõõteviga suurem olla.



**Joonis 11. Saesare hüdroelektrijaama tootmiseseadmete veekulu karakteristikud**

### 2.3.2. Turbiinide veekulud Leevaku hüdroelektrijaamas

Veetarvete mõõtmiseks turbiinidele valiti mõõtekohaks 1. ja 2. turbiini pealevoolu ava esine enne võret. Vooluhulkade mõõtmiskoha valikul jälgiti, et mõõdetava pealevoolu ava vooluhulki ei segaks liigvee voolamine üle ülevooluavade. Mõõtmiste ajal oli töös vaid see turbiin mille veetarvet mõõdeti. Teine turbiin oli välja lülitatud, et tema veetarve ei segaks mõõdetava turbiini veekulu mõõtmistulemusi. Paisjärvel puudus jääkate.

Vooluhulga mõõtmine tehti survekõrgusel 3,0 m.

Vooluhulga mõõtmisi alustati turbiini miinimumvõimsusest. Järk järgult suurendades turbiini koormust, teostati vooluhulga mõõtmised pealevoolu avas ning fikseeriti turbiini koormus  $P [kW]$  kuni turbiini maksimaalse võimsuseni. Fikseeritud võimsustel teostati parve 3 kuni 4 edasi-tagasi tõmmet mõõtekohal. Saadud tulemused märgiti üles ja salvestati.

Esimese turbiini kohta tehti 13 ja teise turbiini kohta 11 veekulu mõõtmist.

Vooluhulga mõõtmiseks kasutatav seade: firma SonTek/YSI Inc. RiverSurveyor M715. Vooluhulgamõõtja põhineb akustilisel ultraheli seadmeh, mida juhitakse raadio teel arvutiga, kus kuvatakse reaajas juhised ja andmed arvutiekraanil. Süsteem kogub andmed parve

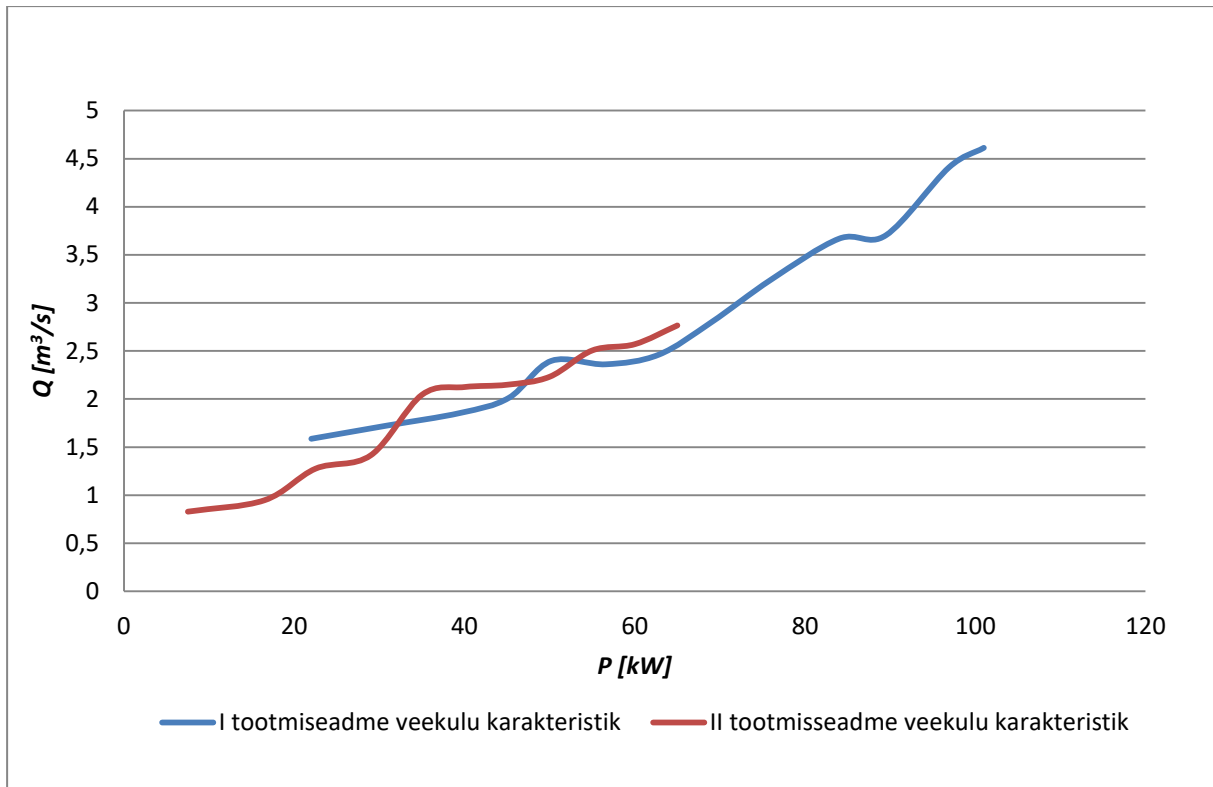
tõmbamisel üle veekogu kindlaksmääratud aja (min 5 sekundit) jooksul. Reaalajas kuvatakse vee kiirus, vooluhulk, parve liikumiskiirus, mõõtepunkti kaugus algpunktist jne. Andmed ja mõõtetulemused salvestatakse arvutisse, mida on võimalik koheselt ekraanilt näha ja hiljem arvutis töödelda. Lisaks mõõtetulemustele, mida saab koheselt arvutiekraanilt näha, on võimalik jälgida mõõtekoha profiili ja parve tõmbamise trajektoori.

Mõõtetulemused on välja toodud tabelis (Tabel 2).

**Tabel 2. Leevaku HEJ vooluhulkade mõõtmise tulemused**

nr.	I tootmiseade		II tootmiseade	
	<i>P</i> kW	<i>Q</i> m <sup>3</sup> /s	<i>P</i> kW	<i>Q</i> m <sup>3</sup> /s
1	22	1,5867	7,5	0,8289
2	30,8	1,7227	16,5	0,9477
3	39,5	1,8556	22,5	1,2761
4	45,2	2,0121	29	1,416
5	50,2	2,3974	35	2,0446
6	56,6	2,3614	40	2,1251
7	62,8	2,4612	45	2,149
8	69	2,7993	50	2,2319
9	76	3,2418	55	2,5058
10	84	3,6684	60	2,5707
11	89,5	3,7037	65	2,7658
12	96,9	4,4092		
13	101	4,6133		

Mõõtmistulemustele vastavalt veekulu karakteristikult (Joonis 12) on näha, et Leevaku hüdroelektrijaamas kasutatud vooluhulga mõõtmise seadmega on mõõtetulemused üsna sarnase varieeruvusega terves ulatuses. Tuleb märkida, et Leevaku hüdroelektrijaamas kasutatud mõõteseadme puhul on võimalik kasutada kahte erinevat mõõtemetoodikat. Nagu eelpool selgitatud, kasutati käesolevas töös kiiremat võimalust mõõtmiseks. Edaspidi võiks kasutada ka antud seadmega töötades samasugust meetodikat, nagu kasutati Saesaare hüdroelektrijaama vooluhulkade mõõtmisel. Kuna aga sellise meetodi kasutamine eeldaks erirakiste valmistamist akustilisele mõõtepeale, siis oli käesoleva töö raames otstarbekas kasutada kiiremat meetodit.



**Joonis 12. Leevaku hüdroelektrijaama tootmiseadmete veekulu karakteristikud**

## **2.4. Elektriijaamade veekulu karakteristikute aproksimeerimine ja interpoleerimine**

Edasiseks tööks on vajalik leida mõõtmistulemustele vastavad funktsioonid. Selleks tuleb aproksimeerida karakteristikud ja seda terves võimsuse diapsoonis. Sobiv on kasutada tabelarvutustarkvara „Excel“, et määrata igale karakteristikule vastav aproksimeeritud kõver ja sellele vastav funktsioon.

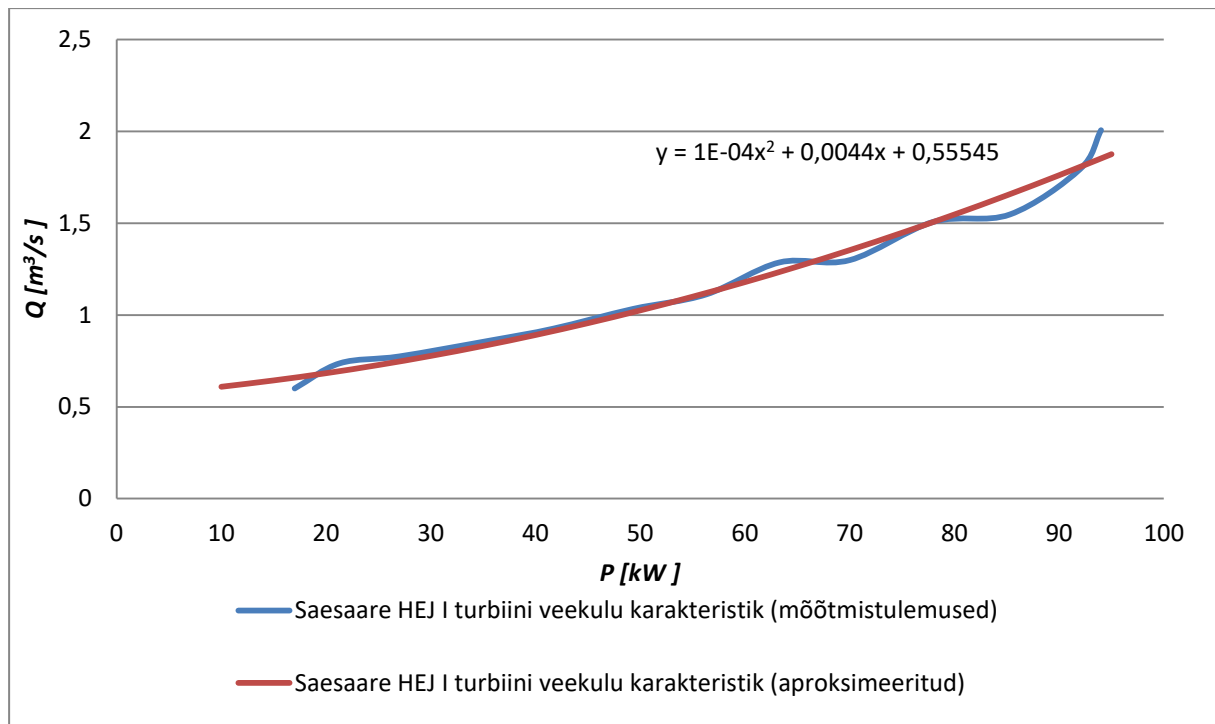
### **2.4.1. Saesaare HEJ veekulu karakteristikute aproksimeerimine ja interpoleerimine**

Leiame aproksimeeritud veekulu karakteristikute ja sellele vastava funktsiooni I tootmiseadmele (Joonis 13). Veekulu karakteristikute funktsiooni saime järgmise:

$$Q_{SAE_1}(P_{SAE_1}) = 0,0001 \cdot P_{SAE_1}^2 + 0,0044 \cdot P_{SAE_1} + 0,55545 \quad (3.1)$$

kus  $Q_{SAE_1}$  – I tootmiseadme vooluhulk, (m<sup>3</sup>/s)

$P_{SAE_1}$  – I tootmiseadme võimsus, (kW)



**Joonis 13. Saesaare HEJ I tootmiseadme aproksimeeritud veekulu karakteristik**

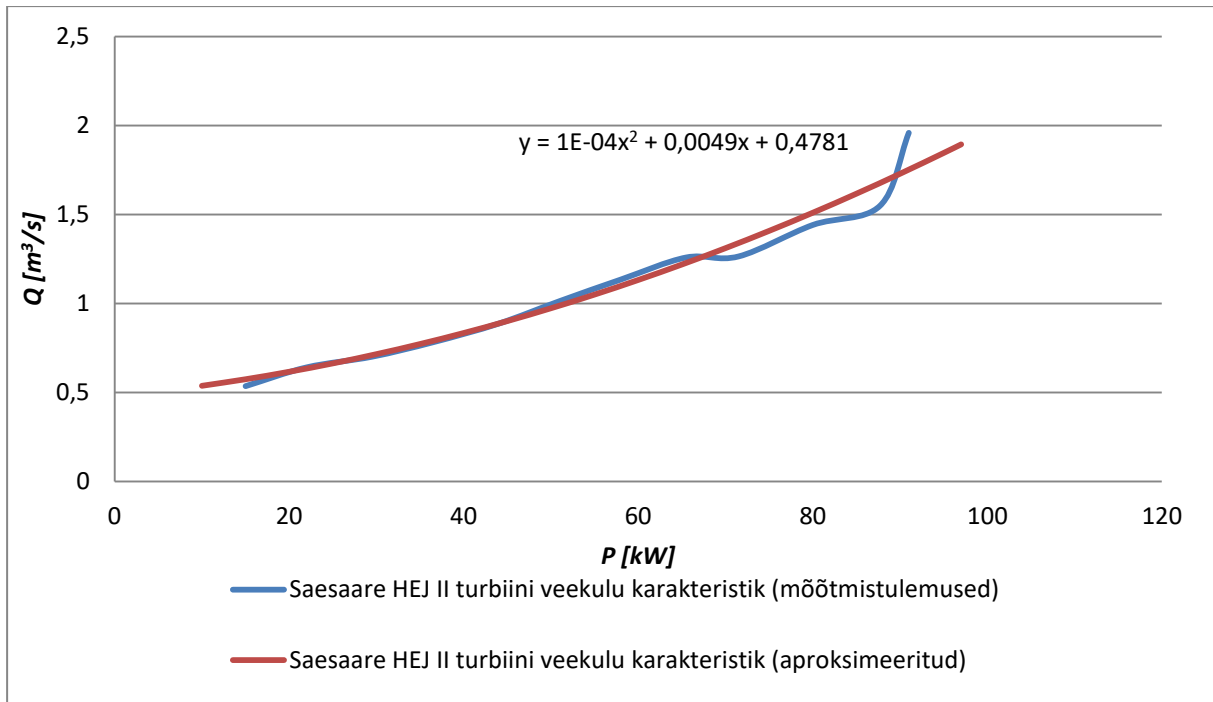
Leian aproksimeeritud veekulu karakteristiku ja sellele vastava funktsiooni II tootmiseadmele (Joonis 14). Saime, et veekulu karakteristiku funktsioon on järgmine:

$$Q_{SAE_2}(P_{SAE_2}) = 0,0001 \cdot P_{SAE_2}^2 + 0,0049 \cdot P_{SAE_2} + 0,4781 \quad (3.2)$$

kus  $Q_{SAE_2}$  – II tootmiseadme vooluhulk, ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$P_{SAE_2}$  – II tootmiseadme võimsus, (kW)





**Joonis 14. Saesaare HEJ II tootmiseadme aproksimeeritud veekulu karakteristik**

Vastavalt valemile (3.1) ja (3.2) arvutame Saesaare hüdroelektrijaama tootmiseadmete võimsustele vastavad veekulud kogu võimsusvahemikes ning need on toodud allolevas tabelis (Tabel 3).

**Tabel 3. Saesaare HEJ aproksimeeritud ja interpoleeritud veekulu väärtused**

I tootmiseadme		II tootmiseadme	
P kW	Q m <sup>3</sup> /s	P kW	Q m <sup>3</sup> /s
10	0,61	10	0,54
15	0,64	15	0,57
20	0,68	20	0,62
25	0,73	25	0,66
30	0,78	30	0,72
35	0,83	35	0,77
40	0,89	40	0,83
45	0,96	45	0,90
50	1,03	50	0,97
55	1,10	55	1,05
60	1,18	60	1,13
65	1,26	65	1,22
70	1,35	70	1,31
75	1,45	75	1,41
80	1,55	80	1,51
85	1,65	85	1,62
90	1,76	90	1,73
95	1,88	95	1,85
97	1,92	97	1,89

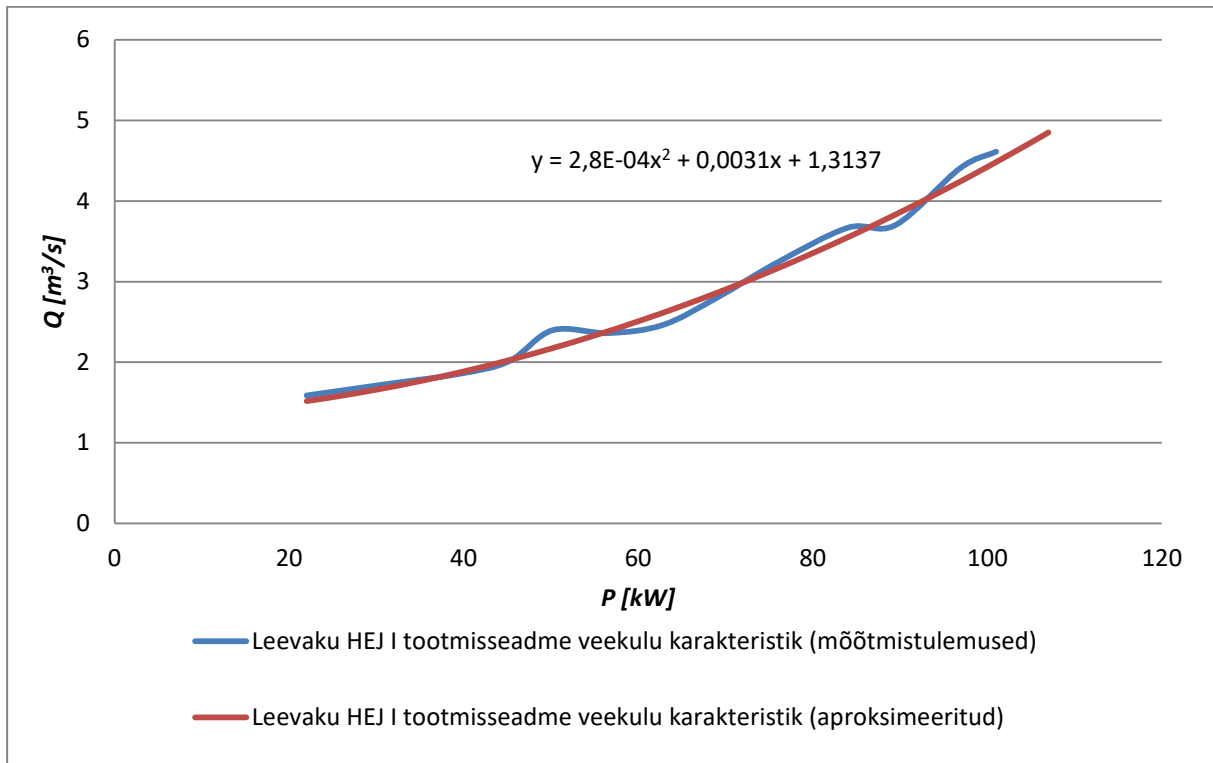
### 2.4.2. Leevaku HEJ veekulu karakteristikku aproksimeerimine ja interpoleerimine

Leiame aproksimeeritud veekulu karakteristikku ja sellele vastava funktsiooni I tootmiseadmele (Joonis 15). Saime, et veekulu karakteristiku funktsioon on järgmine:

$$Q_{LEE_1}(P_{LEE_1}) = 0,00028 \cdot P_{LEE_1}^2 + 0,0031 \cdot P_{LEE_1} + 1,3137 \quad (3.3)$$

kus  $Q_{LEE_1}$  – I tootmiseadme vooluhulk, (m<sup>3</sup>/s)

$P_{LEE_1}$  – I tootmiseadme võimsus, (kW)



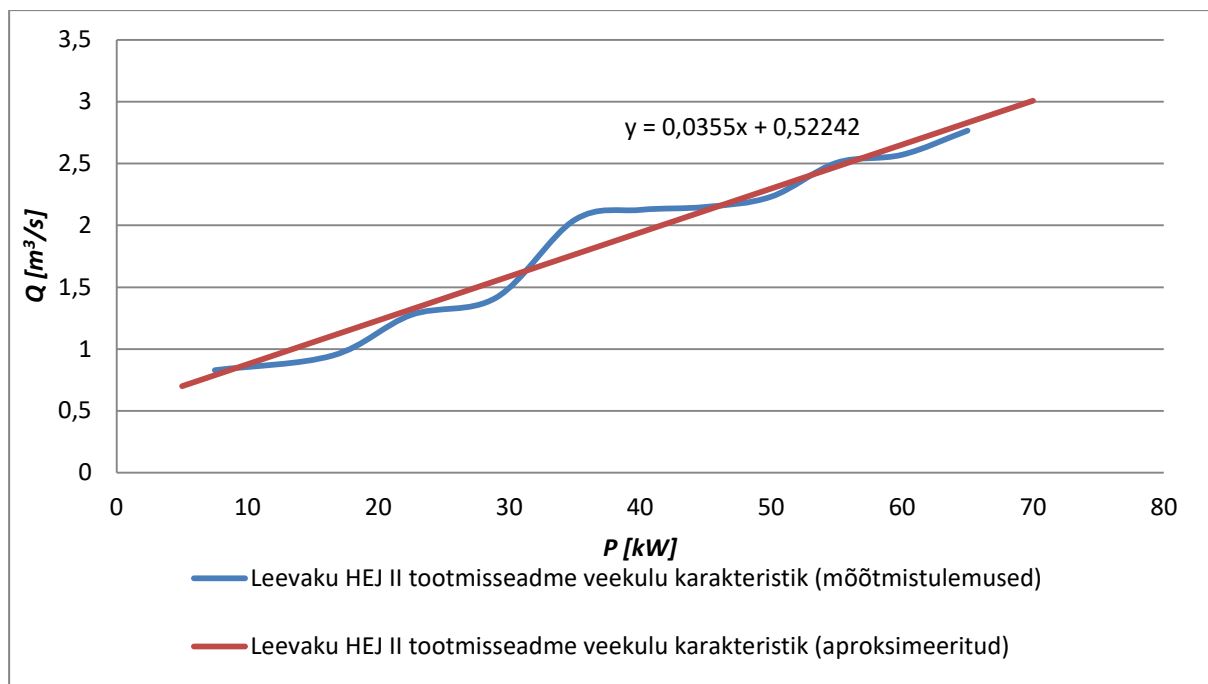
**Joonis 15. Leevaku HEJ I tootmiseadme aproksimeeritud veekulu karakteristik**

Leiame aproksimeeritud veekulu karakteristikku ja sellele vastava funktsiooni II tootmiseadmele (Joonis 16). Saime, et veekulu karakteristiku funktsioon on järgmine:

$$Q_{LEE_2}(P_{LEE_2}) = 0,0355 \cdot P_{LEE_2} + 0,52242 \quad (3.4)$$

kus  $Q_{LEE_2}$  – II tootmiseadme vooluhulk, (m<sup>3</sup>/s)

$P_{LEE_2}$  – II tootmiseadme võimsus, (kW)



**Joonis 16. Leevaku HEJ II tootmiseseadme aproksimeeritud veekulu karakteristik**

Vastavalt valemile (3.3) ja (3.4) arvutame Saesaare hüdroelektrijaama tootmiseseadmete võimsustele vastavad veekulud kogu võimsusvahemikes ning need on toodud allolevas tabelis (Tabel 4).

**Tabel 4. Leevaku HEJ aproksimeeritud ja interpoleeritud veekulu väärtused**

I tootmiseseade		II tootmiseseade	
<i>P</i> kW	<i>Q</i> m <sup>3</sup> /s	<i>P</i> kW	<i>Q</i> m <sup>3</sup> /s
22	1,52	5	0,70
25	1,57	10	0,88
30	1,66	15	1,05
35	1,77	20	1,23
40	1,89	25	1,41
45	2,02	30	1,59
50	2,17	35	1,76
55	2,33	40	1,94
60	2,51	45	2,12
65	2,70	50	2,30
70	2,90	55	2,47
75	3,12	60	2,65
80	3,35	65	2,83
85	3,60	70	3,01
90	3,86		
95	4,14		
100	4,42		
105	4,73		
107	4,85		

## 2.5. Elektriijaamade veekulu suhteliste juurdekasvude karakteristikute leidmine

Kuivõrd elektriijaama optimaalse töörežiimi leidmiseks töötavate seadmete korral on vajalik arvestada tootmisseadmete veekulu suhtelisi juurdekasve, siis leiame need vastavatele tootmisseadmetele. Suhtelised juurdekasvud on, tuginedes kirjandusallikale [1], [4], [5], leitavad veekulu karakteristikute tuletisena.

Seega:

$$q = \frac{\partial Q}{\partial P} \quad (3.5)$$

kus  $q$  – vooluhulga suhteline juurdekasv, ( $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{kW}$ )

$Q$  – vooluhulk, ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$P$  – agregaaadi võimsus, (kW)

### 2.5.1. Saesaare HEJ veekulu suhteliste juurdekasvude leidmine

Arvutame valemi (3.5) järgi Saesaare HEJ tootmisseadmete veekulu suhtelised juurdekasvud.

I tootmisseadme kohta tuleb võtta esimest järku tuletis valemist (3.1).

Seega:

$$q_{SAE_1} = \frac{\partial Q_{SAE_1}}{\partial P_{SAE_1}},$$
$$q_{SAE_1} = 0,0002 \cdot P_{SAE_1} + 0,0044 \quad (3.6)$$

II tootmisseadme kohta tuleb võtta esimest järku tuletis valemist (3.2).

Seega:

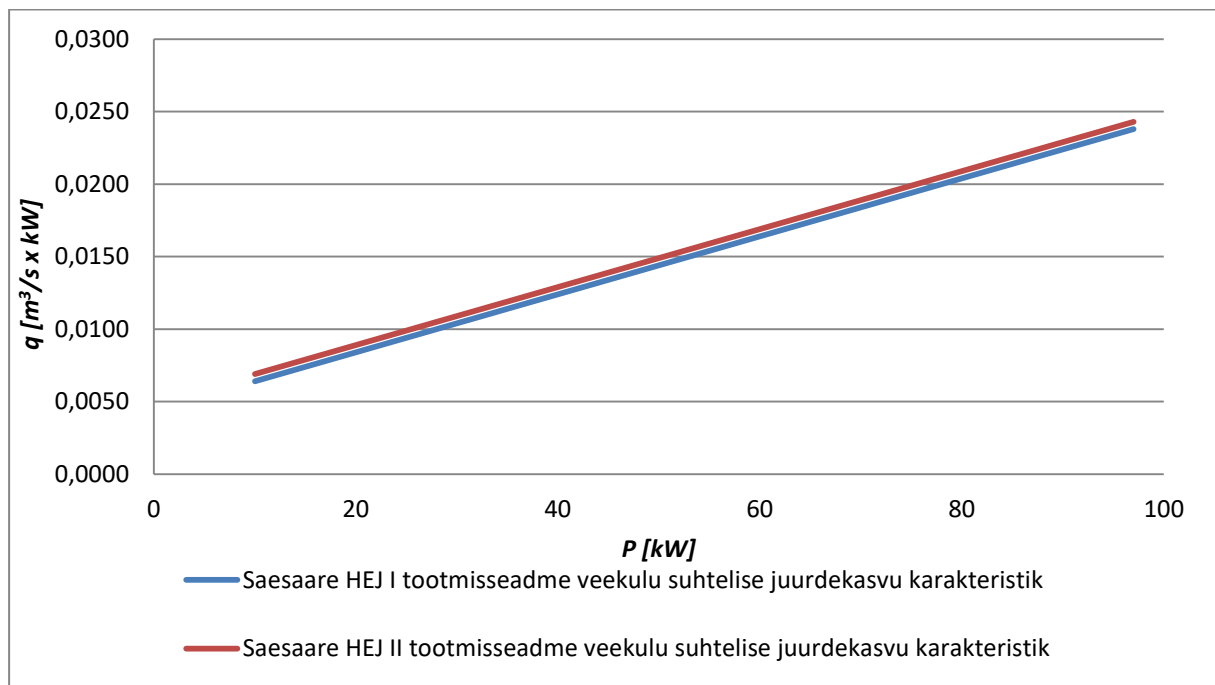
$$q_{SAE_2} = \frac{\partial Q_{SAE_2}}{\partial P_{SAE_2}},$$
$$q_{SAE_2} = 0,0002 \cdot P_{SAE_2} + 0,0049 \quad (3.7)$$

Vastavalt valemile (3.6) ja (3.7) arvutame Saesaare hüdroelektriijaama tootmisseadmete võimsustele vastavad veekulude suhtelised juurdekasvud kogu võimsusvahemikes ning need on esitatud järgnevas tabelis (Tabel 5).

**Tabel 5. Saesaare HEJ tootmiseadmete veekulu suhtelised juurdekasvud**

I tootmiseseade		II tootmiseseade	
$P$ kW	$q$ $m^3/s \cdot kW$	$P$ kW	$q$ $m^3/s \cdot kW$
10	0,0064	10	0,0069
15	0,0074	15	0,0079
20	0,0084	20	0,0089
25	0,0094	25	0,0099
30	0,0104	30	0,0109
35	0,0114	35	0,0119
40	0,0124	40	0,0129
45	0,0134	45	0,0139
50	0,0144	50	0,0149
55	0,0154	55	0,0159
60	0,0164	60	0,0169
65	0,0174	65	0,0179
70	0,0184	70	0,0189
75	0,0194	75	0,0199
80	0,0204	80	0,0209
85	0,0214	85	0,0219
90	0,0224	90	0,0229
95	0,0234	95	0,0239
97	0,0238	97	0,0243

Siit on võimalik tuua välja suhteliste juurdekasvude karakteristik (Joonis 17). Näeme, et kuigi turbiinid on oma ehituselt ja tüübilt identsed on siiski olemas teatavad erisused.



**Joonis 17. Saesaare HEJ veekulu suhteliste juurdekasvude karakteristik**

### 2.5.2. Leevaku HEJ veekulu suhteliste juurdekasvude leidmine

Arvutame valemi (3.5) järgi Leevaku HEJ tootmiseadmete veekulu suhtelised juurdekasvud.

I tootmiseadme kohta tuleb võtta esimest järku tuletis valemist (3.3).

Seega:

$$q_{LEE_1} = \frac{\partial Q_{LEE_1}}{\partial P_{LEE_1}},$$

$$q_{LEE_1} = 0,00056 \cdot P_{LEE_1} + 0,0031 \quad (3.8)$$

II tootmiseadme kohta tuleb võtta esimest järku tuletis valemist (3.4).

Seega:

$$q_{LEE_2} = \frac{\partial Q_{LEE_2}}{\partial P_{LEE_2}},$$

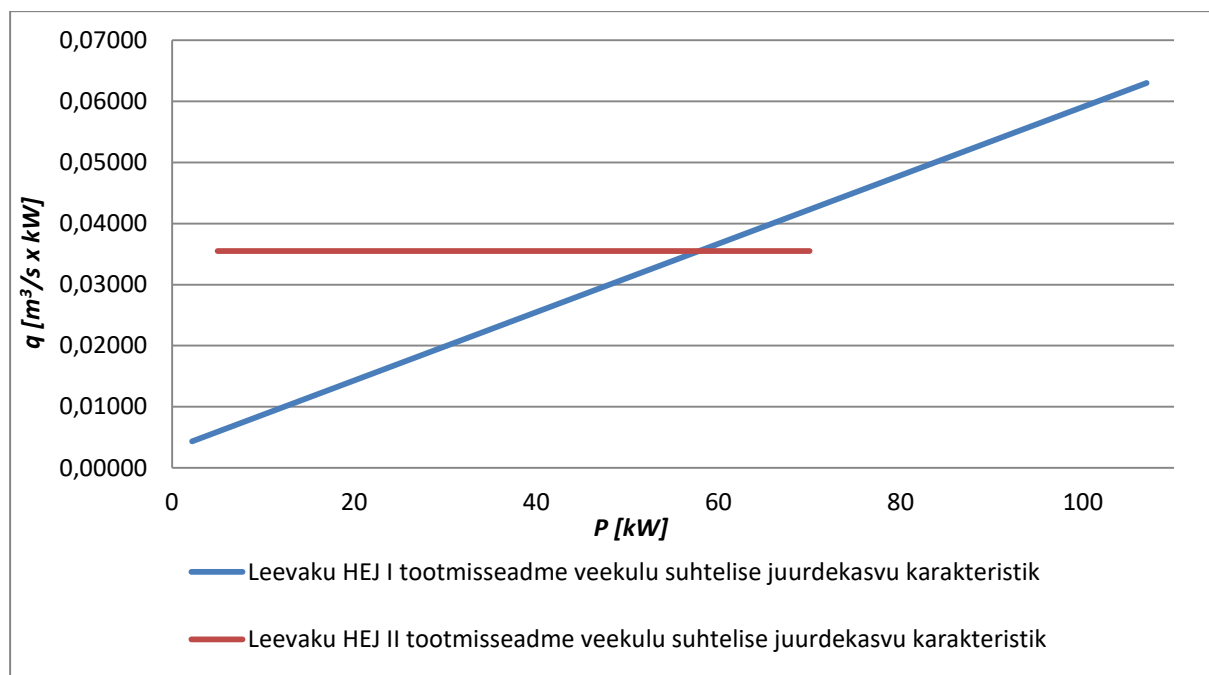
$$q_{LEE_2} = 0,0355 \quad (3.9)$$

Vastavalt valemile (3.8) ja (3.9) arvutame Leevaku hüdroelektrijaama tootmiseadmete võimsustele vastavad veekulude suhtelised juurdekasvud kogu võimsusvahemikes ning need on toodud järgnevas tabelis (Tabel 6).

**Tabel 6. Leevaku HEJ tootmiseadmete veekulu suhtelised juurdekasvud**

I tootmiseadme		II tootmiseadme	
$P$ kW	$q$ $m^3/s \times kW$	$P$ kW	$q$ $m^3/s \times kW$
22	0,01542	5	0,0355
25	0,01710	10	0,0355
30	0,01990	15	0,0355
35	0,02270	20	0,0355
40	0,02550	25	0,0355
45	0,02830	30	0,0355
50	0,03110	35	0,0355
55	0,03390	40	0,0355
60	0,03670	45	0,0355
65	0,03950	50	0,0355
70	0,04230	55	0,0355
75	0,04510	60	0,0355
80	0,04790	65	0,0355
85	0,05070	70	0,0355
90	0,05350		
95	0,05630		
100	0,05910		
105	0,06190		
107	0,06302		

Siit esitame suhteliste juurdekasvude karakteristiku (Joonis 18). Näeme, et tegemist on selgelt erinevate karakteristikutega, mis oli ka eeldatav, kuivõrd Leevaku hüdroelektrijaama tootmiseadmed on tehnilise lahenduse poolest üsna olulisel määral erinevad.



Joonis 18. Leevaku HEJ veekulu suhteliste juurdekasvude karakteristik

## 2.6. Elektriijaamade tootmiseadmete kasutegurid ja erikulu

Olukorras, kus hüdroelektrijaamas ei jätku vett mitmele tootmiseadmele korraga töötamiseks, tuleb teha valik seadmete osas, milline seade peaks kõigepealt töötama. Käesolevas töös on tegemist kahe tootmiseadmega hüdroelektrijaamadega. Seega tuleb valida mõlemas elektrijaamas, milline seade peaks töötama, kui töötada saab vaid üks tootmiseseade.

Agregaatide ja energiablokkide töökorra optimeerimine on diskreetse optimeerimise ülesanne. Soojuselektrijaamade puhul minimeeritakse summaarne kütusekulu ajaperioodis T. Lisatingimusteks on võimsuste bilansivõrrandid ja võrratuste kujulised reservinõuded [1].

Antud juhul on kütusekulu asemel veekulu ning lisatingimusteks tootmiseadmete minimaalsed ja maksimaalsed võimalikud töövõimsused ning minimaalsed veekulud.

Algandmetele tuginedes on võimalik välja arvutada ka kasutegurid ning erikulud tootmisseadmete erinevatel võimsustel. Kasuteguri kõverat on võimalik võrrelda analoogiliste tüüpkarakteristikutega, hinnates edaspidiste võimalike sarnaste tööde puhul konkreetsete mõõtmiste läbiviimise vajalikkust. Erikulude alusel saab teha valiku, milline seadmetest peaks töötama ühe turbiini töörežiimis.

Vastavalt kirjandusallikale [11] ja [2] määratakse hüdroelektrijaamas tootmisseadme või seadmete võimsus järgmise valemiga:

$$P = 9,81 \cdot H \cdot Q \cdot \eta \quad (3.10)$$

kus  $P$  – tootmisseadme võimsus (kW)

$H$  – neto rõhk (m)

$Q$  – vooluhulk (veekulu) (m<sup>3</sup>/s)

$\eta$  – muundamise kasutegur.

Avaldame valemist (3.10) kasuteguri  $\eta$ :

$$\eta = \frac{9,81 \cdot H \cdot Q}{P} \quad (3.11)$$

Kirjandusallikas [1] väljendatud erikulu arvutamise valemi järgi saab välja arvutada tootmisseadmete vee erikulud:

$$\delta = \frac{Q}{P} \quad (3.12)$$

kus  $\delta$  – tootmisseadme vee erikulu  $\left(\frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{kW}}\right)$

$Q$  – vooluhulk (veekulu) (m<sup>3</sup>/s)

$P$  – tootmisseadme võimsus (kW)

### 2.6.1. Saesaare HEJ tootmisseadmete kasutegurid ja erikulud

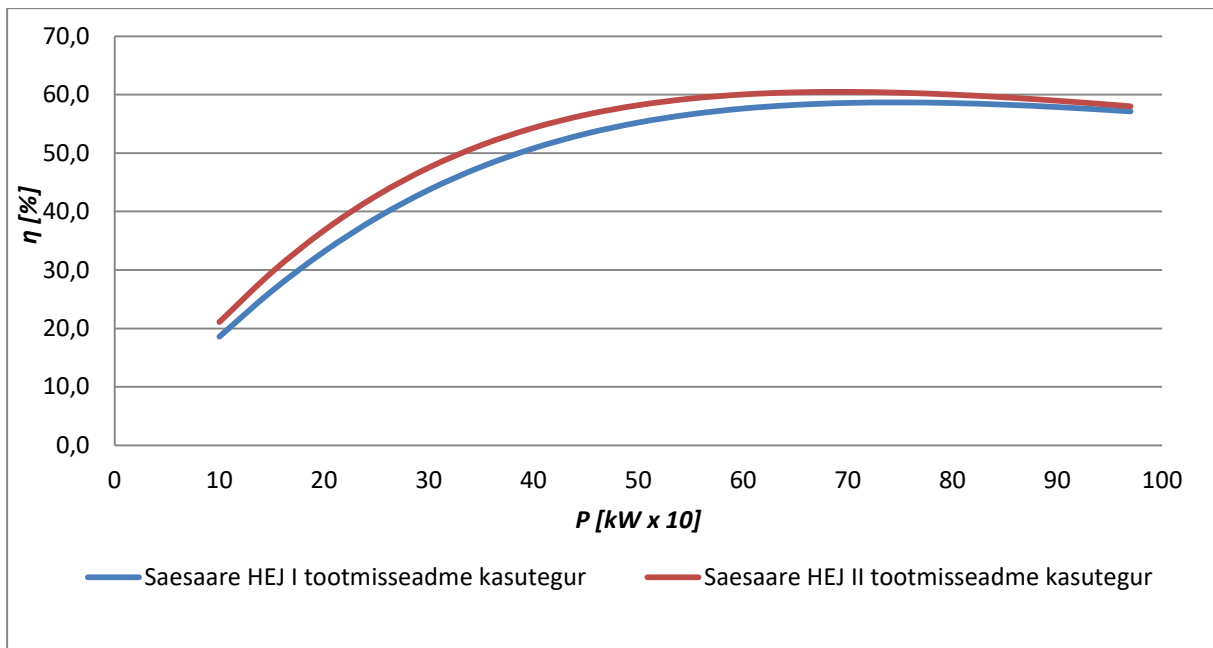
Vastavalt valemitele (3.11) ja (3.12) arvutame Saesaare hüdroelektrijaama tootmisseadmete kasutegurid ja vee erikulud ning esitame need tabeli kujul (Tabel 7).



**Tabel 7. Saesaare HEJ tootmisseedmete kasutegurid ja vee erikulud**

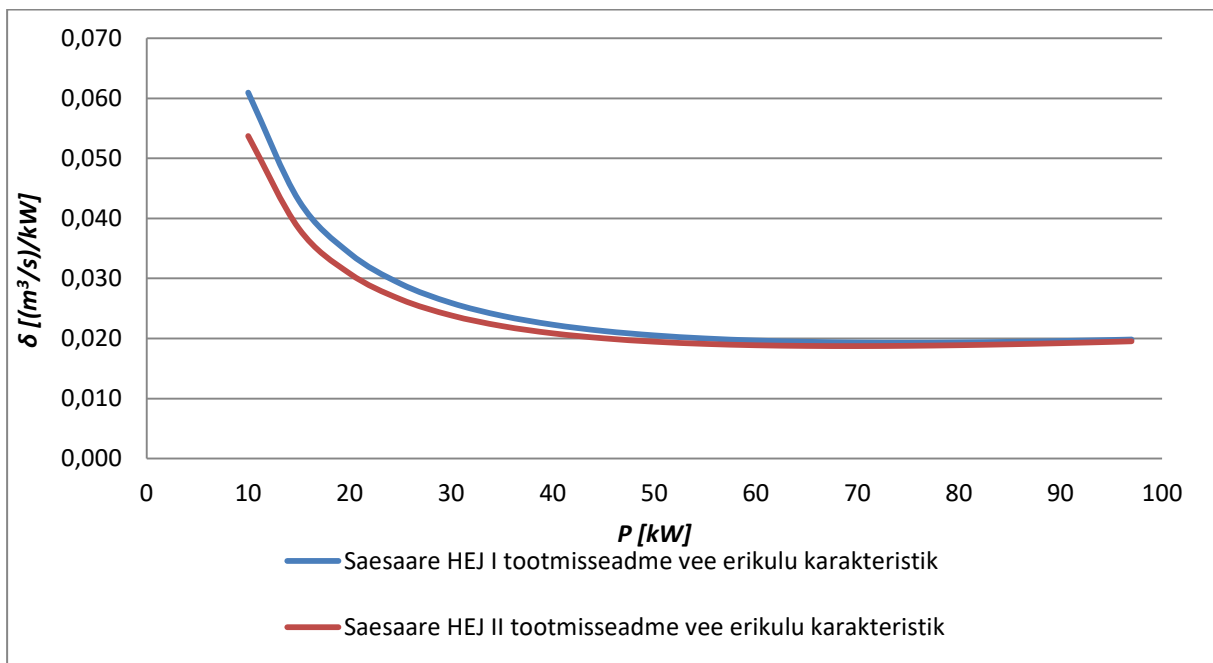
I Tootmisseede				II Tootmisseede			
$P$ kW	$Q$ $m^3/s$	$\eta$ %	$\delta$ $\frac{m^3/s}{kW}$	$P$ kW	$Q$ $m^3/s$	$\eta$ %	$\delta$ $\frac{m^3/s}{kW}$
10	0,61	18,6	0,061	10	0,54	21,1	0,054
15	0,64	26,4	0,043	15	0,57	29,6	0,038
20	0,68	33,1	0,034	20	0,62	36,8	0,031
25	0,73	38,9	0,029	25	0,66	42,7	0,027
30	0,78	43,7	0,026	30	0,72	47,5	0,024
35	0,83	47,6	0,024	35	0,77	51,3	0,022
40	0,89	50,8	0,022	40	0,83	54,3	0,021
45	0,96	53,3	0,021	45	0,90	56,6	0,020
50	1,03	55,2	0,021	50	0,97	58,2	0,019
55	1,10	56,6	0,020	55	1,05	59,3	0,019
60	1,18	57,6	0,020	60	1,13	60,0	0,019
65	1,26	58,2	0,019	65	1,22	60,4	0,019
70	1,35	58,6	0,019	70	1,31	60,5	0,019
75	1,45	58,7	0,019	75	1,41	60,3	0,019
80	1,55	58,6	0,019	80	1,51	60,0	0,019
85	1,65	58,3	0,019	85	1,62	59,5	0,019
90	1,76	57,9	0,020	90	1,73	59,0	0,019
95	1,88	57,4	0,020	95	1,85	58,3	0,019
97	1,92	57,1	0,020	97	1,89	58,0	0,020

Vastavalt tabelile (Tabel 7) saame välja tuua kasuteguri- ja vee erikulukarakteristikud Saesaare hüdroelektrijaama kohta joonistena. Võrreldes Saesaare hüdroelektrijaama tootmisseedmete kasuteguri karakteristikute graafikuid (Joonis 19), näeme, et kuigi tegemist on sisuliselt identsete tootmisseedmetega, on siiski olemas erinevus ka kasutegurites. Siinkohal tuleb arvestada, et tegemist on kasuteguriga, mis sisaldab muundamise kadusid kogu tootmisüksuse süsteemis, alates veehaardest kuni generaatori klemmideni. Kui võrrelda saadud tegelikele andmetele vastavat kasuteguri graafikut analoogiatega (Joonis 8) ja arvestades, et ülekanne ja generaatori summaarne kasutegur võib olla konkreetses lahenduses vahemikus 0,9 – 0,92 (AS-i Generaator andmed), siis ideaaljuhtumil võiks olla tootmisseedme kasutegur kuni 20% kõrgem. Sellisel kasuteguril on käesoleva aja seisuga teada ka põhjused, millele tuleb edaspidi tähelepanu suunata ning püüda olukorda parandada. Kuigi kasuteguri parandamine ei ole käesoleva töö küsimus, tuleb märkida, et kasuteguri parandamise meetmete rakendamise järgselt on vajalik teostada uued vooluhulga mõõtmised ning korrigeerida vajadusel optimeerimisprogrammi. Järelikult saab kinnitada käesolevas töös pt. 1.3 väljatoodut, et reaalsete andmete kogumine otseste mõõtmiste kaudu on üldiselt soovitatav.



**Joonis 19. Saesaare HEJ tootmiseseadmete kasuteguri karakteristikud**

Saesaare hüdroelektrijaama tootmiseseadmete erikulu karakteristikult (Joonis 20) näeme, et ühe tootmiseseadme töötamise korral tuleb eelistada II tootmiseseadet, kuna sel on vee erikulu praktiliselt kogu võimsusvahemikus väiksem.



**Joonis 20. Saesaare HEJ tootmiseseadmete vee erikulukarakteristikud**

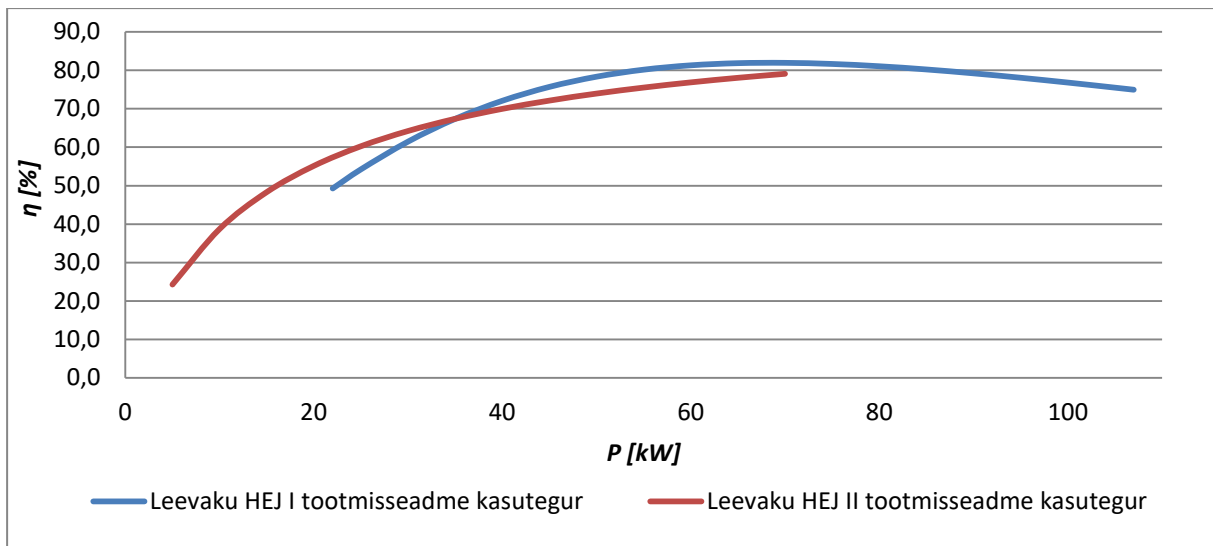
## 2.6.2. Leevaku HEJ tootmiseadmete kasutegurid ja erikulud

Vastavalt valemitele (3.11) ja (3.12) arvutame välja Leevaku hüdroelektrijaama tootmiseadmete kasutegurid ja vee erikulud ning esitame need tabeli kujul (Tabel 8).

**Tabel 8. Leevaku HEJ tootmiseadmete kasutegurid ja vee erikulud**

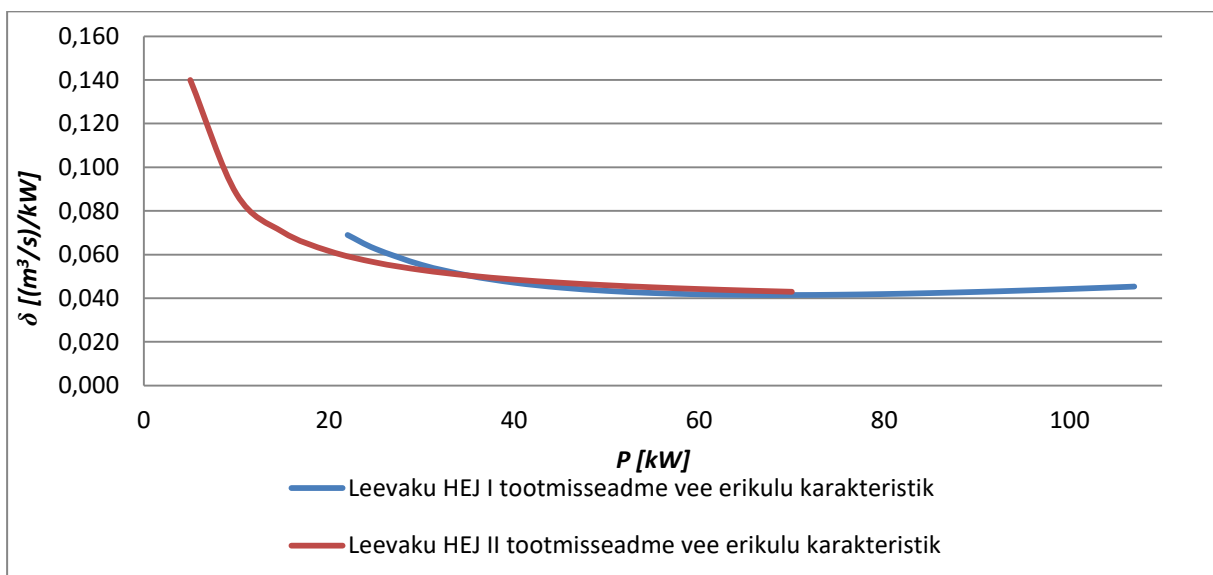
I Tootmiseseade				II Tootmiseseade			
$P$ $kW$	$Q$ $m^3/s$	$\eta$ %	$\delta$ $\frac{m^3/s}{kW}$	$P$ $kW$	$Q$ $m^3/s$	$\eta$ %	$\delta$ $\frac{m^3/s}{kW}$
22	1,52	49,3	0,069	5	0,70	24,3	0,140
25	1,57	54,2	0,063	10	0,88	38,7	0,088
30	1,66	61,5	0,055	15	1,05	48,3	0,070
35	1,77	67,4	0,050	20	1,23	55,1	0,062
40	1,89	72,1	0,047	25	1,41	60,2	0,056
45	2,02	75,7	0,045	30	1,59	64,2	0,053
50	2,17	78,3	0,043	35	1,76	67,4	0,050
55	2,33	80,2	0,042	40	1,94	70,0	0,049
60	2,51	81,3	0,042	45	2,12	72,1	0,047
65	2,70	81,9	0,042	50	2,30	74,0	0,046
70	2,90	81,9	0,041	55	2,47	75,5	0,045
75	3,12	81,6	0,042	60	2,65	76,9	0,044
80	3,35	81,1	0,042	65	2,83	78,0	0,044
85	3,60	80,2	0,042	70	3,01	79,1	0,043
90	3,86	79,2	0,043				
95	4,14	78,1	0,044				
100	4,42	76,8	0,044				
105	4,73	75,5	0,045				
107	4,85	74,9	0,045				

Vastavalt tabelile (Tabel 8) koostame kasuteguri ja vee erikulu karakteristikute kõverad Leevaku hüdroelektrijaama kohta. Võrdleme kasuteguri karakteristikuid (Joonis 21) analoogiatega (Joonis 8). Arvestades, et ülekande ja generaatori summaarne kasutegur võib konkreetses lahenduses sarnaselt Saesaare seadmetele olla vahemikus 0,9 – 0,92 (AS-i Generaator andmed), on tegemist parima võimaliku saavutada võidava kasuteguriga. Kõvera kuju on aga erinevatel seadmetel mõnevõrra erinev, seega annab ka siin reaalsele mõõtetulemustele toetumine hea eelduse edukaks optimeerimiseks.



**Joonis 21. Leevaku HEJ tootmisseedmete kasutegurikarakteristikud**

Leevaku hüdroelektrijaamas on aga erinev ühe tootmisseedmega töörežiimis tootmisseedme valik. Vee erikulu karakteristikutelt (Joonis 22) nähtub II tootmisseedme väiksem vee erikulu võrreldes I tootmisseedmega võimsuse alumises osas ning ülemises osas on olukord vastupidine. Tabelist (Tabel 8) täpsustame, et lõikumine toimub 35 kW võimsuse juures. Seega tuleks ühe tootmisseedme töötamise korral, lähtudes tootmisseedmete vee erikuludest, kasutada alla 35 kW koormuse režiimis II tootmisseedet ning üle 35 kW koormuse – I tootmisseedet.



**Joonis 22. Leevaku HEJ tootmisseedmete vee erikulukarakteristikud**

## 2.7. Elektriyaamad tootmisseadmete optimaalsed töörežiimid

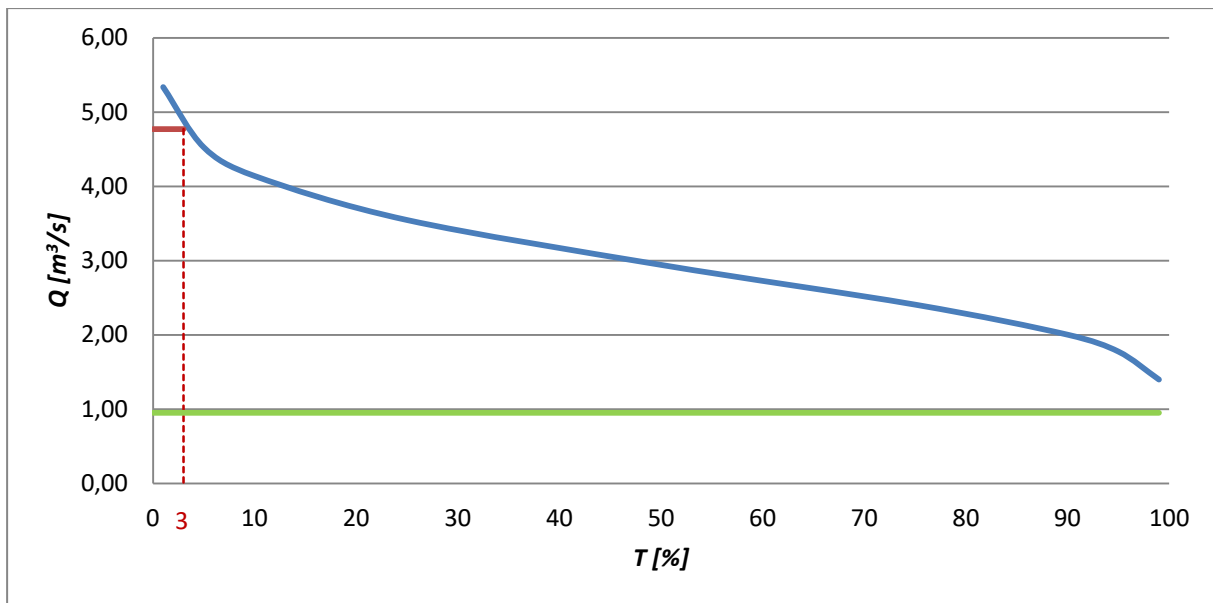
Kirjandusallikates on välja toodud, et varasemalt välja töötatud traditsioonilised optimeerimismeetodid ei pööra väga palju tähelepanu ökoloogilisele keskkonnale. [12]

Samuti on selgitatud, et nii nimetatud „*run-of-river*“ tüüpi elektriyaamad, mis kasutavad vett vastavalt looduses saadaolevale vooluhulgale, on keskkonnasõbralikumad ning seetõttu keskkonnanõu seisukohast rohkem soovitatavad. [13]

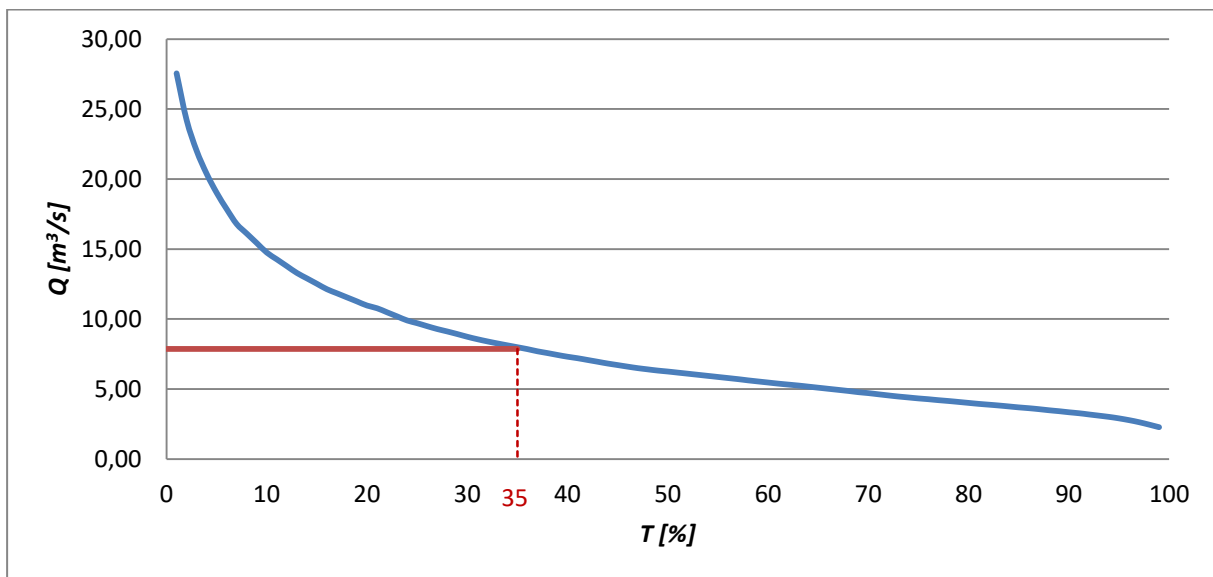
Saesaare ja Leevaku hüdroelektriyaamad on olemas küll Eesti mõistes suured paisjärved, kuid siiski on keskkonnanõuded sätestatud selliselt, et alumise bjeeffi veetaset ei ole lubatud oluliselt kõigutada ning veel vähem kuivale jätta elektriyaama seiskamise läbi. Seetõttu on nimetatud yaamad nende veekasutuse poolest käsitletavad „*run-of-river*“ tüüpi yaamadena.

Edasise optimeerimisülesande lahendamise huvides on asjakohane välja selgitada, missune on aasta jooksul optimeerimist võimaldav ajavahemik ja missugused on sellisel juhul veetasemed. Optimeeritud töörežiimi ajahulk võimaldab välja tuua võimaliku optimeeritud režiimi tõttu tekkiva lisaväärtuse. Veetase on vajalik hindamiseks, kas optimeeritud režiimis töötades on mõõdetud veetarbed asjakohased või on vajalik teostada edaspidi veetarbe mõõtmisi erinevatel survekõrgustel.

Eelnevas lõigus välja toodud küsimuste lahendamiseks on vajalik esitada vooluhulkade kestuskõverad vastavalt pt. 1.2 esitatud joonise (Joonis 2) kujul. Graafikud on esitatud Riigi Ilmateenistuse andmete alusel. Selline graafik väljendab ka aastas võimalikke esineda võivaid vooluhulki [5].



**Joonis 23. Vooluhulga kestuskõver Saesaare HEJ lävendis ning ökoloogiline vooluhulk ja tootmiseadmete maksimum vooluhulk**



**Joonis 24. Vooluhulga kestuskõver Leevaku HEJ lävendis ning tootmiseadmete maksimum vooluhulk**

Saesaare hüdroelektrijaamas on veehulga kasutamisele täiendav piirang ökoloogilise vooluhulga tagamise näol, mis tuleb lihtsalt mööda juhtida. Tegemist on keskkonnanõudega ning selle tingib asjaolu, et Saesaare hüdroelektrijaam on derivatsiooni tüüpi jaam. See tähendab, et konkreetsel juhul juhitakse elektrijaamas kasutatud vesi äravoolukanalit mööda

jõe looduslikku sängi. Elektriijaama liigveelasust aga tuleb veestada ka liigvee äralasu kanalit, et säilitada sinna laienuvad elustikku. Joonisele (Joonis 23) on märgitud ökoloogilise vooluhulga veekogus roheline joonena ning sellest üle jääva veehulga kasutus kuni elektriijaama tootmiseseadmete maksimum veetarbeni. Nähtub, et maksimum veetarbel saab jaam keskmiselt töötada vaid 3% aastast ning sel ajal optimaalseks töörežiimiks maksimaalne võimsus. Tootmiseseadmete koosseisu täpsem optimeerimine on vajalik 97%-l aastast.

Leevaku hüdroelektriijaama lävendi aastaste äravoolude karakteristikult selgub, et jaam saab töötada maksimum veetarbel ja võimsusel 35% aastast. Kuna jaam on paisjaama tüüpi ja seega puuduvad derivatsiooni kanalid ning torud, siis on võimalik ökoloogiline vooluhulk tagada läbi elektriijaama turbiinide. Seega ei esine lisapiirangut vee kasutamisele ning kogu jões saadaolev vooluhulk kuni maksimum veetarbeni on kasutatav elektriijaamas. Jooniselt (Joonis 24) selgub, et tootmiseseadmete täpsem optimeerimine on vajalik 65%-l aastast.

AS-i Generaator andmetel on antud vooluhulkade korral, mil on vajalik tootmiseseadmete täpsem optimaaljuhtimine, tagatud nimisurvekõrgus. Saesaare hüdroelektriijaama puhul on see 9 meetrit ning Leevaku hüdroelektriijaama puhul 3 meetrit. Asjaolu on selgitatav ühelt poolt keskkonnanõuetega, kuivõrd elektriijaamade veehoidlates tuleb hoida ühtlast veetaset, siis ei muutu veetase ülemises bjeefis oluliselt. Teisalt on aga jaamades kasutatavate maksimumvooluhulkade puhul tagatud vaba äravool alumises bjeefis ja seega ei esine ka alumise bjeefi veetaseme tõusu. Kuivõrd madalad äravoolu perioodid langevad suvisesse vegetatsiooniperioodi ning sel ajal kasvab jõgedes taimestik, mis tekitab äravoolu takistuse, siis esineb ka alumise bjeefi veetaseme olulist langust harva ja selle küsimuse võib jätta käesolevas töös arvestamata.

Arvestades eelnevat ja lähteülesannet, on meil tegemist minimeerimise ülesandega, kus tuleb minimeerida veekulu arvestades, et täidetud on võimsuste bilansitingimus. Matemaatiliselt tuleks minimeerida seega järgmist funktsiooni:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i(P_i) \tag{3.13}$$

- kus  $Q$  – jaama vooluhulk  
 $Q_i$  – i-nda tootmiseseadme vooluhulk  
 $P_i$  – i-nda tootmiseseadme võimsus

Teisalt, on võimalik lahendada ülesanne ka maksimeerimisülesandena. Sel juhtumil tuleks maksimeerida jaama väljundvõimsus etteantud veehulga juures. Ehk täidetud peab olema veekulude bilansi tingimus. Seega on antud juhul olemas kaks erinevat lähenemist – minimeerimise ülesanne või maksimeerimisülesanne. Kuivõrd aga optimaalne talitus saavutatakse igal juhul veekulude suhteliste juurdekasvude võrdsuse põhimõttel määratud koormuse jaotusega, siis ei mängi ülesande lahendamise seisukohast erilist rolli, milline võimalus valida. Antud töös valime minimeerimise ülesande.

### 2.7.1. Elektriyaamade tootmiseseadmete optimaalsete režiimide leidmine kahe töötava tootmiseseadme korral

Seega on meil olemas vajalik alusinformatsioon ja teoreetiline baas, et asuda leidma elektriyaamade optimaalset töörežiimi. Selleks on sobiv kasutada  $\mu$ -iteratsiooni meetodit. Esmalt moodustame Lagrange'i funktsiooni.

Üldine funktsioon hüdroelektriyaama optimaalse töörežiimi leidmiseks on järgmine:

$$\Phi = \sum_{i=1}^2 Q_i(P_i) + \mu \left( P_{\Sigma} - \sum_{i=1}^2 P_i \right) \quad (3.14)$$

kus  $P_i$  –  $i$ -nda tootmiseseadme võimsus (kW)

$Q_i$  –  $i$ -nda tootmiseseadme veekulu ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$P_{\Sigma}$  – hüdroelektriyaama summaarne võimsus (kW)

$\mu$  – Lagrange kordaja, mis on siinkohal elektriyaama veekulu suhteline juurdekasv

#### 2.7.1.1 Optimaalsed töörežiimid Saesaare hüdroelektriyaamas kahe seadme paralleeltöö korral

Optimeerime Saesaare hüdroelektriyaama tootmiseseadmete võimsused kahe seadme režiimis. Täidetud peavad olema järgmised tingimused:



$$P_{\Sigma} - \sum_{i=1}^2 P_i = 0 \quad (3.15)$$

$$10 \leq P_{SAE_1} \leq 97 \quad (3.16)$$

$$10 \leq P_{SAE_2} \leq 97 \quad (3.17)$$

Koostame Lagrange'i funktsiooni Saesaare hüdroelektrijaama kohta vastavalt valemile (3.14), kasutades selleks varasemalt leitud veekulu karakteristikute funktsioone.

$$\begin{aligned} \Phi = & 0,00001 \cdot P_{SAE_1}^2 + 0,0044 \cdot P_{SAE_1} + 5,5545 + 0,00001 \cdot P_{SAE_2}^2 + \\ & + 0,0049 \cdot P_{SAE_2} + 4,781 + \mu(P_{\Sigma} - P_{SAE_1} - P_{SAE_2}) \end{aligned} \quad (3.18)$$

Edasi on tarvis leida osatuletised kõikide otsitavate järgi, ning avaldame järgnevad optimaalsuse tingimused, võrrutades  $\Phi$  osatuletised võimsuste järgi nulliga.

$$\mu = q = 0,00002 \cdot P_{SAE_1} + 0,0044 = 0,00002 \cdot P_{SAE_2} + 0,0049 \quad (3.19)$$

Siit on võimalik avaldada tootmisseedmete optimaalsed võimsused

$$\begin{cases} P_{SAE_1} = \frac{\mu - 0,0044}{0,00002} \\ P_{SAE_2} = \frac{\mu - 0,0049}{0,00002} \end{cases} \quad (3.20)$$

Leiame optimaalse koormusjaotuse optimaalsustingimuste (3.20) lahendamise teel. Lahenduse hõlbustamiseks on koostatud „*Exceli*“ tabelarvutustarkvara abil arvutuslahendus, kus antakse ette summaarne jaama võimsus ning seejärel tuleb sobitada  $\mu$  väärtust selliselt, et tootmisseedmete võimsusbilansi tingimus on täidetud. Näide arvutustabelist (Tabel 9).

**Tabel 9. Näide Saesaare HEJ optimaalsete töörežiimide arvutamise abitabelist**

Saesaare		Q=aP <sup>2</sup> +bP+c			μ=dQ/dP=2aP+b	P <sub>opt</sub> =(μ-b)/2a			
Jaamade kulukarakteristikud		μ:			0,0074	Summ. P:		27,5	
	Pmin	Pmax	a	b	c	P <sub>opt,teoreet</sub>	P <sub>opt</sub>	Olek (1/0)	Kulud
1	10	97	0,0001	0,0044	0,55545	15,00	15	1	0,64395
2	10	97	0,0001	0,0049	0,4781	12,50	12,5	1	0,554975
		194							
									Arvutuslik veekulu:
		- Sisestatavad andmed				Kokku:	27,50		1,20
Optimaalne lahendus saadakse katseliselt, andes ette μ väärtuseid.						Sobitame neid nii, et arvutuslik koguvõimsus võrduks etteantuga.			

Vastavalt tabelis (Tabel 9) esitatud abiprogrammi abil tehtud iteratsiooni arvutuste tulemustele esitame järgneva tabeli (Tabel 10) Saesaare hüdroelektrijaama optimaalsete töörežiimide kohta.

**Tabel 10. Saesaare HEJ tootmiseseadmete optimaalsed töörežiimid kahe seadme töö korral**

Q <sub>Σ</sub> m <sup>3</sup> /s	P <sub>Σ</sub> kW	P <sub>1</sub> kW	Q <sub>1</sub> m <sup>3</sup> /s	P <sub>2</sub> kW	Q <sub>2</sub> m <sup>3</sup> /s	μ
1,2	27,5	15	0,64	12,5	0,55	0,0074
1,4	51	26,8	0,74	24,2	0,66	0,00975
1,6	69,7	36,1	0,84	33,6	0,76	0,01162
1,8	85,8	44,2	0,94	41,6	0,86	0,01323
1,9	93,1	47,8	0,99	45,3	0,91	0,01396
2	100,1	51,3	1,04	48,8	0,96	0,01466
2,2	113,2	57,9	1,14	55,3	1,06	0,01597
2,4	125,3	63,9	1,24	61,4	1,16	0,017175
2,6	136,5	69,5	1,34	67	1,26	0,0183
2,8	147,1	74,8	1,44	72,3	1,36	0,019365
3	157,2	79,8	1,54	77,4	1,46	0,02037
3,2	166,8	84,6	1,64	82,2	1,56	0,02133
3,4	176	89,2	1,74	86,8	1,66	0,02225
3,6	184,8	93,6	1,84	91,2	1,76	0,02313
3,8	193,3	97	1,92	96,3	1,88	0,02416
3,82	194	97	1,92	97	1,89	0,0243

### 2.7.1.2 Optimaalsed töörežiimid Leevaku hüdroelektrijaamas kahe seadme paralleeltöö korral

Optimeerime Leevaku hüdroelektrijaama tootmisseadmete võimsused kahe seadme režiimis. Täidetud peavad olema järgmised tingimused:

$$P_{\Sigma} - \sum_{i=1}^2 P_i = 0 \quad (3.21)$$

$$22 \leq P_{LEE_1} \leq 107 \quad (3.22)$$

$$5 \leq P_{LEE_2} \leq 70 \quad (3.23)$$

Koostame Lagrange'i funktsiooni Leevaku hüdroelektrijaama kohta vastavalt valemile (3.14), kasutades selleks varasemalt leitud veekulu karakteristikute funktsioone.

$$\begin{aligned} \Phi = & 0,00028 \cdot P_{LEE_1}^2 + 0,0031 \cdot P_{LEE_1} + 1,3137 + 0,0355 \cdot P_{LEE_2} + \\ & + 0,5224 + \mu(P_{\Sigma} - P_{LEE_1} - P_{LEE_2}) \end{aligned} \quad (3.24)$$

Edasi on tarvis leida osatuletised kõikide otsitavate järgi, ning avaldame järgnevad optimaalsuse tingimused, võrrutades  $\Phi$  osatuletised võimsuste järgi nulliga.

$$\mu = q = 0,00056 \cdot P_{LEE_1} + 0,0031 = 0,0355 \quad (3.25)$$

Siit on võimalik avaldada tootmisseadmete optimaalsed võimsused

$$P_{LEE_1} = \frac{\mu - 0,0031}{0,00056} \quad (3.26)$$

Leiame optimaalse koormusjaotuse (3.26) abil ning toetume kirjandusallikale [1], milles on selgitatud, et töös olevatest agregaatidest tuleb koormata kõigepealt seda agregaati, mille veekulu suhteline juurdekasv on väiksem. Leevaku hüdroelektrijaama II tootmisseadme puhul on tegemist lineaarse kulukarakteristikuga. II tootmisseadme veekulu suhtelise juurdekasvu karakteristik on konstantne, nagu näib ka valemist (3.9). Seega tuleb jaama koormust kasvatades reguleerida alguses I tootmisseadme koormust, kuni süsteemi suhtelise juurdekasvu  $\mu$  kasvamiseni 0,0355-ks. Edasi jääb süsteemi suhteline juurdekasv  $\mu = 0,0355$  ja sellele vastab vastavalt valemist (3.25) avaldatule võimuse  $P_{LEE_1} = 57,9\text{kW}$ . Seejuures tõstetakse vaid II tootmisseadme koormust, kuni koormusmaksimumini. Seejärel koormatakse edasi I tootmisseadet, seejuures suureneb  $\mu$  0,0355-st edasi. Ka Leevaku hüdroelektrijaama

optimaalsete töörežiimide leidmiseks on lahenduse hõlbustamiseks koostatud „Exceli“ tabelarvutustarkvara abil arvutuslahendus. Ette antakse summaarne jaama võimsus ning seejärel tuleb sobitada  $\mu$  väärtust selliselt, et tootmisseadmete võimsusbilansi tingimus on täidetud. Näide arvutustabelist (Tabel 11).

**Tabel 11. Näide Leevaku HEJ optimaalsete töörežiimide arvutamise abitabelist**

Leevaku	$Q=aP^2+bP+c$					$\mu=dQ/dP=2aP+b$		$P_{opt}=(\mu-b)/2a$	
Jaamade kulukarakteristikud			$\mu$ :	0,0355	Summ. P:	93			
	Pmin	Pmax	a	b	c	$P_{opt,teoreet}$	$P_{opt}$	Olek (1/0)	Kulud
1	22	107	0,00028	0,0031	1,3137	57,86	<b>57,85714</b>	1	<b>2,4303429</b>
2	5	70	0	<b>0,0355</b>	0,52242	35,14	<b>35,14286</b>	1	<b>1,7699914</b>
177									
- Sisestatavad andmed						Kokku:	93,00	Arvutuslik veekulu: 4,20	
Optimaalne lahendus saadakse katseliselt, andes ette $\mu$ väärtuseid.						Sobitame neid nii, et arvutuslik koguvõimsus võrduks etteantuga.			

Vastavalt tabelis (Tabel 11) esitatud abiprogrammi abil tehtud iteratsiooni arvutuste tulemustele esitame järgneva tabeli (Tabel 12) Leevaku hüdroelektrijaama optimaalsete töörežiimide kohta.

**Tabel 12. Leevaku HEJ tootmisseadmete optimaalsed töörežiimid kahe seadme töö korral**

$Q_{\Sigma}$ $m^3/s$	$P_{\Sigma}$ $kW$	$P_1$ $kW$	$Q_1$ $m^3/s$	$P_2$ $kW$	$Q_2$ $m^3/s$	$\mu$
2,2	27	22	1,52	5	0,7	0,01544
2,6	45,6	40,6	1,9	5	0,7	0,02581
3	59,1	54,1	2,3	5	0,7	0,03338
3,4	70,5	57,9	2,43	12,6	0,97	0,0355
3,8	81,8	57,9	2,43	23,9	1,37	0,0355
4,2	93	57,9	2,43	35,1	1,77	0,0355
4,6	104,3	57,9	2,43	46,4	2,17	0,0355
5	115,6	57,9	2,43	57,7	2,57	0,0355
5,4	126,8	57,9	2,43	68,9	2,97	0,0355
5,8	137,4	67,4	2,79	70	3,01	0,04082
6,2	146,6	76,6	3,19	70	3,01	0,04598
6,6	154,9	84,9	3,59	70	3,01	0,05062
7	162,4	92,4	3,99	70	3,01	0,05486
7,4	169,5	99,5	4,39	70	3,01	0,0588
7,86	177	107	4,85	70	3,01	0,06302

## **2.7.2. Elektriijaamade tootmiseseadmete üleminek ühe tootmiseseadme režiimilt kahe tootmiseseadmega režiimile ja täielikud optimaalsed töörežiimid**

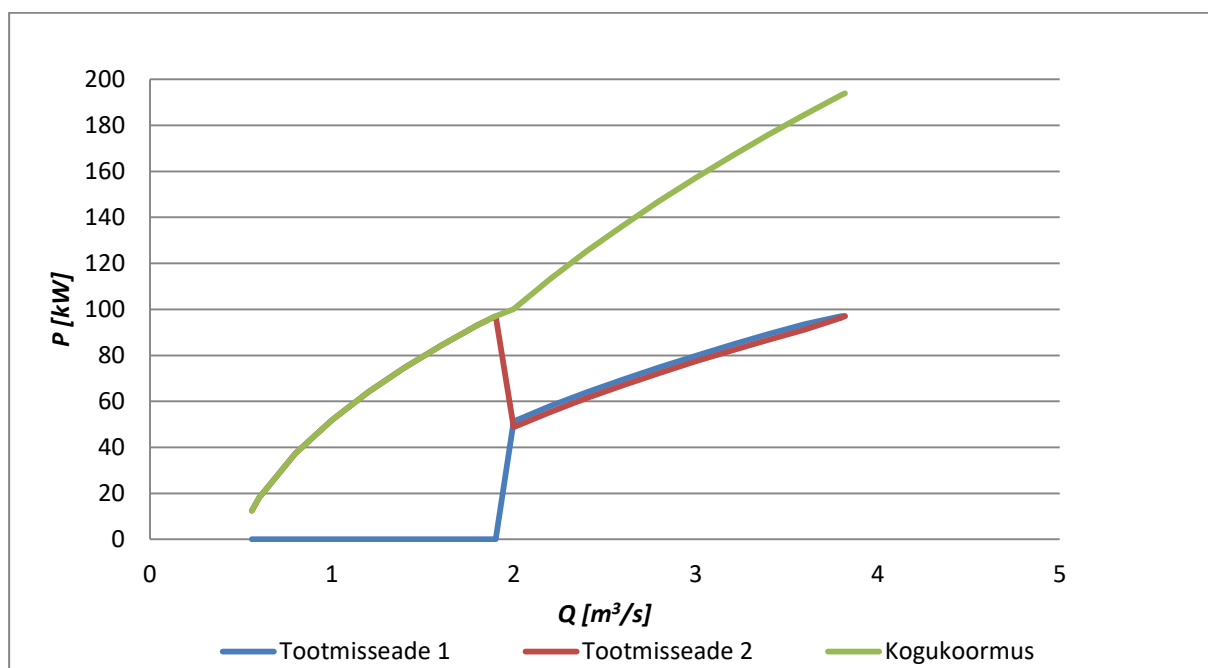
Varasemas teoorias ollakse seisukohal, et koormuse kasvamisel järjekordse agregaadid töösse panek on põhjendatud siis, kui tema erikulu on väiksem kui süsteemi suhteline juurdekasv [5]. Antud juhul tuleb aga arvestada hüdroturbiinide operatiivse käivitus- ja seiskamisvõimalusega. Samuti on hilisem kirjandus [10] viidanud lahendusele mille kohaselt on hüdroelektriijaama erinevate seadmete töösse lülitamine ja välja lülitamine sobivam välja selgitada erinevate tootmiseseadmete ja tootmiseseadmete gruppide töörežiimide võrdlemise teel. Võrreldud on seejuures veekulusid ning elektriijaama koormust. Kuivõrd käesolevas töös käsitletakse maailma mõistes väikehüdrojaamu, mille operatiivsus tootmiseseadmete sisse ja välja lülitamisel on üks paremaid, on sobilik kasutada ülemineku režiimide leidmiseks eelnimetatud meetodikat. Võrdlust on üsna sobilik läbi viia tabelites (Tabel 10) ja (Tabel 12) välja toodud summaarsete ja tootmiseseadme põhiste koormuste ja veekulude võrdlemise teel.

### **2.7.2.1 Ülemineku ning täielikud optimaalsed töörežiimid Saesaare hüdroelektriijaamas**

Tabelist (Tabel 10) näeme, et kummagi tootmiseseadme maksimum koormuse puhul on veetarve väiksem, kui sama võimsuse korral kahe tootmiseseadmega töörežiimis. Seetõttu on selge, et kõigepealt tuleb koormata vaid üht tootmiseseadet. Eelnevalt juba ptk. 2.6.1 välja selgitatu põhjal tuleb esmalt eelistada seega II tootmiseseadet. Seega toome välja terves võimsuse töövahemikus elektriijaama töörežiimi karakteristiku andmed (Tabel 13) ja sellele vastava graafiku (Joonis 26).

**Tabel 13. Saesaare hüdroelektrijaama optimaalne töörežim**

$Q_{\Sigma}$ $m^3/s$	$P_{\Sigma}$ kW	$P_1$ kW	$Q_1$ $m^3/s$	$P_2$ kW	$Q_2$ $m^3/s$
0,56	12,5	0	0	12,5	0,56
0,6	18,2	0	0	18,2	0,6
0,8	37,3	0	0	37,3	0,8
1	51,8	0	0	51,8	1
1,2	64	0	0	64	1,2
1,4	74,6	0	0	74,6	1,4
1,6	84,2	0	0	84,2	1,6
1,8	93,1	0	0	93,1	1,8
1,9	97	0	0	97	1,9
2	100,1	51,3	1,04	48,8	0,96
2,2	113,2	57,9	1,14	55,3	1,06
2,4	125,3	63,9	1,24	61,4	1,16
2,6	136,5	69,5	1,34	67	1,26
2,8	147,1	74,8	1,44	72,3	1,36
3	157,2	79,8	1,54	77,4	1,46
3,2	166,8	84,6	1,64	82,2	1,56
3,4	176	89,2	1,74	86,8	1,66
3,6	184,8	93,6	1,84	91,2	1,76
3,8	193,3	97	1,92	96,3	1,88
3,82	194	97	1,92	97	1,89



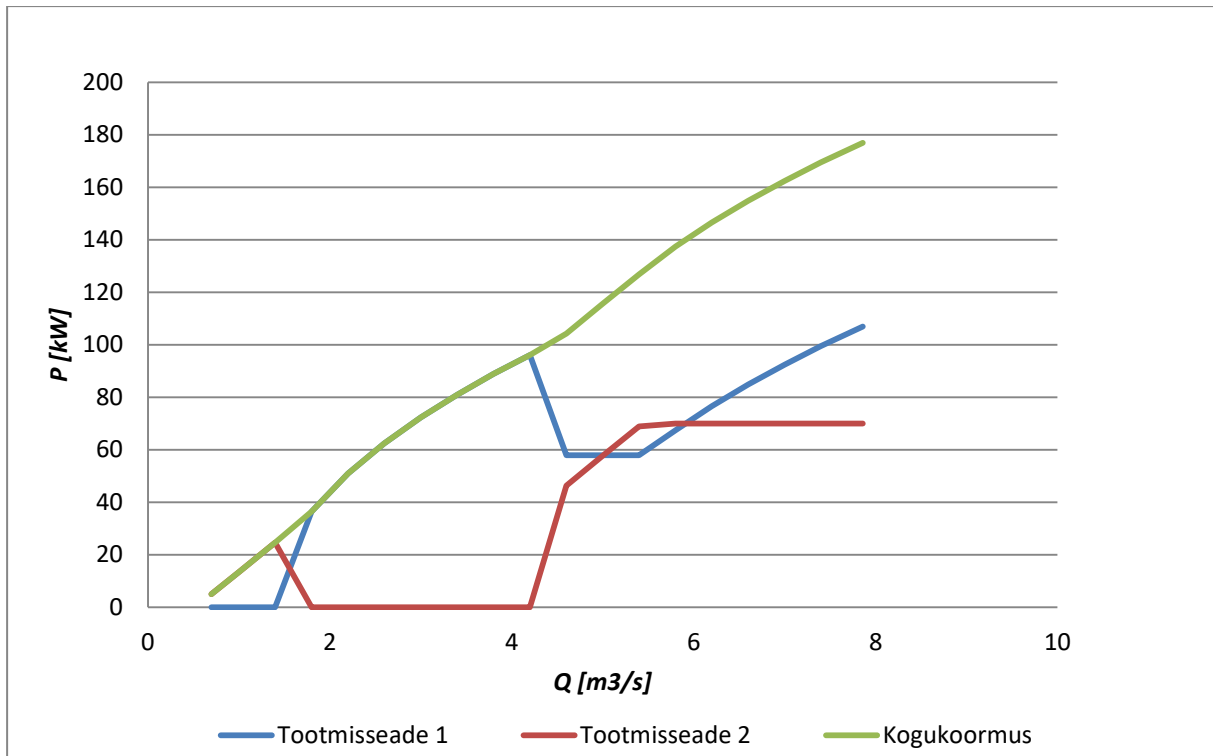
**Joonis 25. Saesaare hüdroelektrijaama optimaalse töörežiimi graafik**

### 2.7.2.2 Ülemineku ning täielikud optimaalsed töörežiimid Leevaku hüdroelektrijaamas

Tabelist (Tabel 10) ei selgu koheselt mis koormuseni ja millist seadet tuleb koormata kuni üleminekuni kahe tootmiseadme režiimi. Seega tuleb teha lisa arvutus. Kasutame selleks abi arvutustabelit (Tabel 11) iteratsiooniarvutuste läbi viimiseks. Selgub, et koormusel 93 kW on kahtlemata eelistatum kasutada ühte tootmiseadet. 93 kW koormuse juures on kahe seadme töörežiimis veekulu 4,2 m<sup>3</sup>/s ning ühe tootmiseadme režiimis 4 m<sup>3</sup>/s. 104 kW koormuse puhul on olukord vastupidine ehk kahe seadme režiimi kasuks. Eelnevalt ptk. 2.6.2 välja selgitatu põhjal tuleb ühe tootmiseadme töörežiimis esmalt eelistada seega II tootmiseadet, kuni võimsuseni 35 kW. Seejärel tuleks vahetada seadet, mis tähendab, et II tootmiseadet tuleb seisata ning 35 kW-st edasi koormata II tootmiseadet, kuni võimsuseni 93 kW. Järgnevalt tuleb koormuse kasvades üle minna kahe tootmiseadme režiimi ning talitleda edasi vastavalt tabelis (Tabel 12) kirja pandule. Seega koostame terves võimsuse töövahemikus elektrijaama töörežiimi karakteristiku andmed (Tabel 14) ning sellele vastava graafiku (Joonis 26).

**Tabel 14. Leevaku hüdroelektrijaama optimaalne töörežiim**

$Q_{\Sigma}$ m <sup>3</sup> /s	$P_{\Sigma}$ kW	$P_1$ kW	$Q_1$ m <sup>3</sup> /s	$P_2$ kW	$Q_2$ m <sup>3</sup> /s
0,7	5	0	0	5	0,7
1	13,5	0	0	13,5	1
1,4	24,7	0	0	24,7	1,4
1,8	36,5	36,5	1,8	0	0
2,2	51	51	2,2	0	0
2,6	62,5	62,5	2,6	0	0
3	72,3	72,3	3	0	0
3,4	81	81	3,4	0	0
3,8	88,9	88,9	3,8	0	0
4,2	96,1	96,1	4,2	0	0
4,6	104,3	57,9	2,43	46,4	2,17
5	115,6	57,9	2,43	57,7	2,57
5,4	126,8	57,9	2,43	68,9	2,97
5,8	137,4	67,4	2,79	70	3,01
6,2	146,6	76,6	3,19	70	3,01
6,6	154,9	84,9	3,59	70	3,01
7	162,4	92,4	3,99	70	3,01
7,4	169,5	99,5	4,39	70	3,01
7,86	177	107	4,85	70	3,01



*Joonis 26. Leevaku hüdroelektrijaama optimaalse töörežiimi graafik*

## 2.8. Järeldusi

Võib järeldada, et tõepoolest nagu ka kirjandusallikas [10] välja toodud, ei ole tehasest või ka üldiste kasutegurite või veekulu karakteristikutega opereerimine optimeerimise seisukohast alati mõistlik lähenemine, kuivõrd esineda võivad suured erinevused teoreetiliste ja tegelike andmete vahel.

Saesaare HEJ tootmiseadmete kasuteguri osas tuleb tarvitusele võtta kasuteguri parandamise meetmed ning seejärel tuleks optimeerimise seisukohast teostada uued tootmiseadmete veekulu mõõtmised.



### 3. Optimeerimise loogika koostamine

Käesolevas töös käsitletud maailma mõistes väikestele hüdroelektrijaamadele sarnastes elektrijaamades kasutatakse erinevaid automaatikaseadmeid, kontrollereid. Protsesside juhtimiseks on võimalik kasutada nii tööstusarvuteid kui programmeeritavaid kontrollereid. Programmeeritavaid kontrollereid nimetatakse ka sõnaga *PLC*, mis tuleneb ingliskeelsest terminist „*Programmable Logic Controller*“. *PLC*-de kasutamise eelistena on välja toodud nende vastupidavust keskkonnatingimustele, modulaarsust (lihtsalt asendatavad ja laiendatavad) ning neil on standardsed sisend/väljundliidesed ja signaalinivood, lihtsalt arusaadavad programmeerimiskeeled. Samuti on nad kohapeal lihtsalt programmeeritavad ja ümberprogrammeeritavad [14]. Eelnimetatud asjaolude tõttu on ka väikehüdroelektrijaamades kasutust leidnud just programmeeritavad kontrollid. Tootevalik on selles vallas kujunenud väga laiaks ning seetõttu on ka erinevates lahendustes kasutatavate erinevate seadmetootjate erinevus lai. Tuntumaid programmeeritavaid kontrollereid, mida kasutatakse väikehüdroelektrijaamades, pakuvad Siemens, Unitronics, Omron, Vipa jt. Ühiseks nimetajaks kasutatavatel kontrollritel saab siiski pidada nende suhteliselt sarnast programmeerimise lähenemist. Tavapäraselt on võimalik neid programmeerida kasutades erinevaid programmeerimiskeeli. Võimalikeks programmeerimiskeelteks on:

- kontaktaseskeem või ka redeldiagramm [14]
- algoritmi plokk skeem ehk sammprogramm
- loogikaskeem
- kõrgkeel, sarnaneb programmeerimiskeeltele C++ või Pascal
- käsuloend



Joonis 27. PLC Unitronics Vision 1040

Antud töö raames käsitletavates elektrijaamades on kasutusel Unitronics'i kontrollid, tüüp Vision 1040 (Joonis 27).

Selle lahenduse positiivseteks külgedeks on:

- Integreeritud PLC ja visuaalne juhtimisekraan

- Optimaalne jõudluse, kvaliteedi ja hinna kombinatsioon
- Sisse ehitatud liidesed: võrguühendus, tööstuslikud ja mobiilsed võrgud
- Tarkvara on vabavarana kasutatav

Programmeerimiskeelena kasutatakse kontaktskeemi ehk redeldiagrammi abil programmeerimist, kuivõrd see on Unitronicsi kontrollerite puhul kasutatava tarkvara VisiLogic vaikimisi programmeerimiskeeleks.

	Opr.	Addr.	Use	Format	Description
O	Outputs	MI 0	<input type="checkbox"/>	DEC	
T	Timers	MI 1	<input checked="" type="checkbox"/>	DEC	Veetaseme sisend
MB	Memory Bits	MI 2	<input checked="" type="checkbox"/>	DEC	Elektrijaama summaarne võimsus (0-100%)
MI	Memory Integer	MI 3	<input checked="" type="checkbox"/>	DEC	I tootmiseadme optimaalne juhtvoolu asend [%]
ML	Memory Long	MI 4	<input checked="" type="checkbox"/>	DEC	I tootmiseadme optimaalne juhtvoolu asend [%]
DW	Double Word	MI 5	<input type="checkbox"/>	DEC	
XB	X Bits	MI 6	<input type="checkbox"/>	DEC	
XI	X Integer	MI 7	<input type="checkbox"/>	DEC	
XL	X Long	MI 8	<input type="checkbox"/>	DEC	
XDW	X Double Word			DEC	
MF	Memory Float			DEC	

### Joonis 28. Näide Unitronics Vision seeria kontrollerite programmeerimistarkvarast VisiLogic

Kontaktaseskeemina programmeerimine kujutab endast programmi graafilist esitust ja on mõeldud relee-kontaktor-juhtimislülituste hõlpsaks teisendamiseks kontrolleri programmiks. Kontaktaseskeem sarnaneb tavalise elektriskeemiga. Kui tavalises elektriskeemis kontakte, lüliteid ja täitureid ühendavad juhtmed paiknevad vertikaalsihis, siis kontaktaseskeemi puhul

paiknevad nad horisontaalsihis. Kontaktaseskeemina programmeerimise eelisteks on kasutajasõbralikkus ja lihtsus [15]. Olgu siin kohal öeldud, et VisiLogic'ü tarkvara puhul on kontaktaseskeemi programmeerimiskeeles võimalik kasutada kõiki juhtimisoperatsioone ja käske nagu teisteski esitusviisides.

### **3.1. Optimaalsete töörežiimide juhtimissüsteemi väljatöötamiseks vajalik taustinformatsioon**

Peatükis 2.7.2 leidsime optimaalsetele töörežiimidele vastavad koormuste jaotused ning neile vastavad veetarbed. Praktikas ei ole aga väga võimalik neid sellisel kujul rakendada. Jões esinevaid vooluhulki otseselt ei möödeta, mistõttu veetarvet etteantava suurusena kasutada pole võimalik. Siiski saavutatakse elektrijaamades looduslikule vooluhulgale lähedane veetarve, kuivõrd seda on tarvis ühtlase veetaseme hoidmiseks. Looduslikule vooluhulgale lähedane veetarve saavutataksegi veetaseme muutuse hindamise läbi paisjärves. Vastav algoritm kontrollib veetaseme muutusi ja vajadusel lisab elektrijaamale koormust või kahandab seda. Seetõttu on oluliseks kasutatavaks kriteeriumiks siinjuures just mitme tootmiseadme omavaheline võimsuste bilanss. On võimalik kasutada lähenemist, kus kahe tootmiseadme töörežiimis antakse ühele tootmiseadmele ette koormus ja teise tootmiseadme koormus sobitatakse seejärel sobivaks ehk optimaalseks. Tuleb aga välja tuua, et tootmiseadmete koormuse hetkväärtus võib ajas mõnevõrra muutlik olla, mistõttu tekib koormuste pidev korrigeerimisvajadus ja seetõttu suureneb tootmiseadmete kulumine, mis lõpptulemusena võib nullida optimeerimisest saadava võimaliku lisaväärtuse. Et sellist pidevat korrigeerimist vältida, tuleks koormustelt üle minna tootmiseadme turbiinide veetarvet ja ühtlasi koormust muutvate labade avatusprotsentidele. Niisiis, tootmiseadme võimsusskaala vahetatakse protsendiskaala vastu. Eelduseks on, et turbiinide omavaheline koormuse optimaalne jaotamine toimub, nagu selgitatud peatükis 2.7, kindlaks määratud survekõrgusel  $H$ . Seega mõõtmise ajal olnud olukord peegeldab just sellist situatsiooni, mis esineb siis, kui toimub elektrijaama tootmiseadmete omavahelise koormuse optimaaljuhtimine. Arvestades eelnevat, on võimalik minna üle välja pakutud protsendiskaalale. Täiendava märkusena saab välja tuua veel ka võimaluse lisada elektrijaama juhtimisprogrammi lisakontrollmehhanism, mis kontrollib, kas vastava juhtlabade ja/või tööratla labade avatuse juures on saavutatud ettenähtud koormus. Saadud informatsiooni järgi on võimalik otsustada, kas tootmiseadmed vajavad puhastamist või tehnilist kontrolli.

### 3.2. Mitme seadmega hüdroelektrijaamade juhtimisloogika

Juhtimissüsteemile üleminekuks sobivad andmed Saesaare hüdroelektrijaama jaoks on toodud tabelis (Tabel 15). Jaama automaatikalahenduses on elektrijaama tootmiseadme juhtlabade avatuse ja selle koormuse vahel seatud lineaarne sõltuvus selliselt, et koormuse piirkonnale 10 kuni 97 kW vastab juhtlabade avatuse piirkond 0 kuni 100%. Kahe seadme juhtimiseks on sisse viidud üldine protsendiskaala, kus elektrijaama üldisele võimsusele vastab piirkond 0 kuni 194 kW. Neid andmeid on võimalik elektrijaama juhtkontrollerisse edukalt sisestada.

Juhtimiseautomaatika toimib selliselt, et vastavalt veetaseme muutumise algoritmist saadavale informatsioonile muudetakse üldise jaama koormatuse protsendi suurust ning vastavalt sellele reguleeritakse Saesaare hüdroelektrijaama II tootmiseadme koormust, muutes juhtlabade nurka. Vastavalt II tootmiseadme juhtlabade avatusele seatakse I tootmiseadme juhtlabade asend. Samal ajal võetakse arvesse, kas töös on kaks või üks seade.

*Tabel 15. Saesaare juhtimisautomaatika juhtlabade avatusprotsendi järgi*

Üld [%]	0	1	4	15	23	29	35	40	45	47	49	56	63	69	75	80	85	90	95	100
TS 1 [%]											48	56	62	69	75	81	86	92	97	100
TS 2 [%]	0	3	10	32	49	63	75	86	96	100	45	53	60	66	72	78	83	89	94	100

Sarnaselt Saesaare hüdroelektrijaama juhtimislahendusele koostame ka Leevaku hüdroelektrijaama kohta protsendiskaalad (Tabel 16). Leevaku hüdroelektrijaama I tootmiseadme osas on protsendiskaala vastavus koormusesse veidi erinev. See on seotud asjaoluga, et selle tootmiseadme turbiinil kasutatakse tootmiseadme seiskamisel juhtlabasid ka vee sulgemiseks, mistõttu 0% juures on labad täiesti sulgunud ning seade seisab. Ülemises osas on aga reservi labasid rohkem avada kevadise suurvee olukorras, kus on võimalik tagada turbiini suurem veetarve. Koormus seejuures üle lubatu ei kasva, kuna alumise bjeefi veetase on tõusnud ja survekõrgus seetõttu vähenenud.

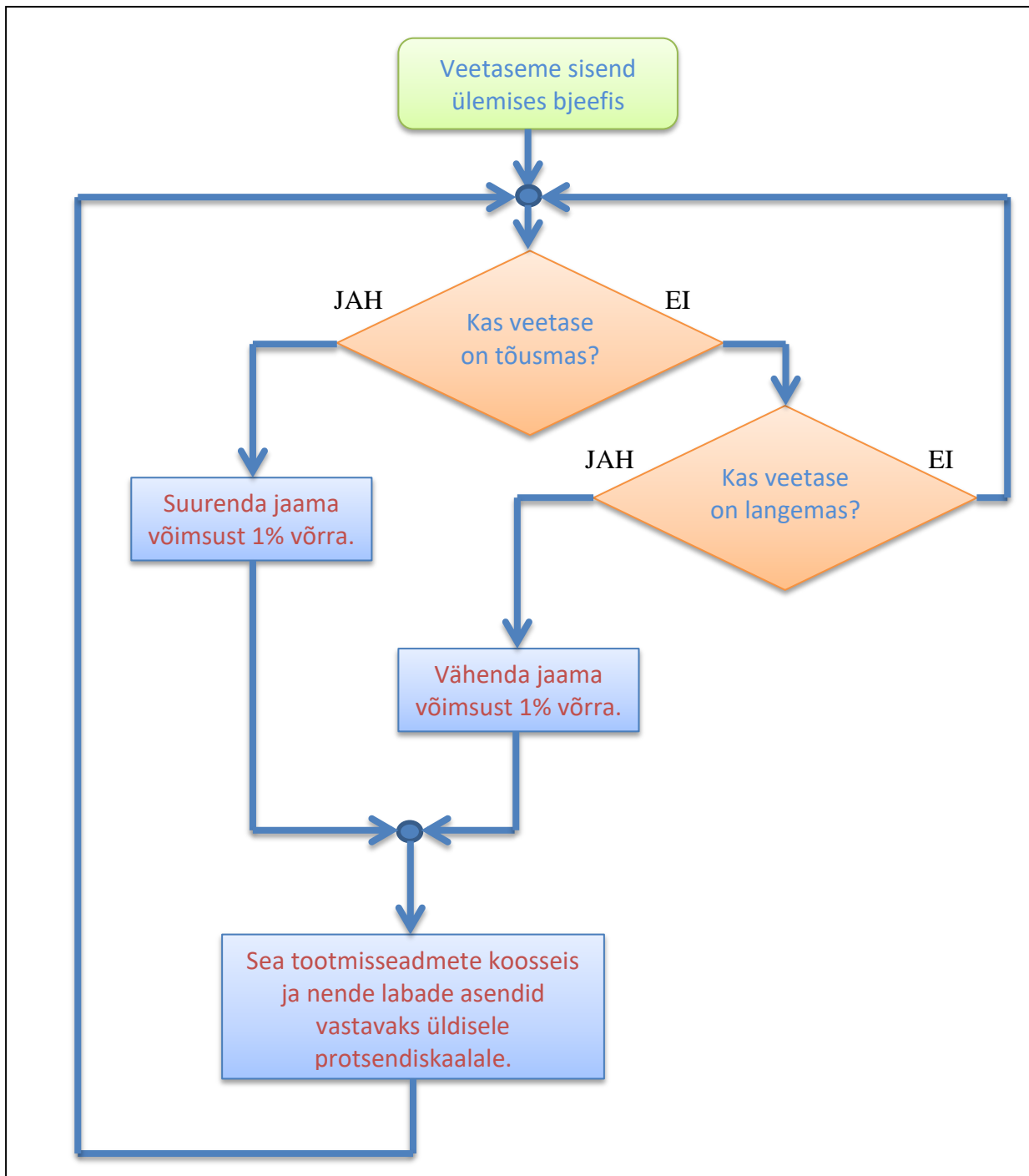
Seega vastab normaalolukorras I tootmiseadme koormusvahemikule 22 kuni 107 kW labade asendi piirkond 27 kuni 87%. II tootmiseadme koormusvahemikule 5 kuni 70 kW vastab labade asendi piirkond 0 kuni 100%.

Leevaku hüdroelektrijaama juhtimiseautomaatika toimib sarnaselt Saesaare hüdroelektrijaama automaatikale. Vastavalt veetaseme muutumise algoritmist saadavale informatsioonile muudetakse üldise jaama koormatuse protsendi suurust. Leevaku hüdroelektrijaamas tuleb enamus ajast juhtida korraga vaid ühe tootmiseseadme koormust. Seega on jagatud koormuste juhtimine osadeks ning juhitudakse otseselt üldisest protsendiskaalast, mille järgi seatakse nii I kui II tootmiseseadme labade asend.

***Tabel 16. Leevaku juhtimiseautomaatika labade avatusprotsendi järgi***

Üld [%]	0	5	11	18	27	33	39	44	49	53	58	64	71	77	82	87	92	96	100
TS 1 [%]				37	47	56	63	69	74	79	52	52	52	59	66	71	77	82	87
TS 2 [%]	0	13	30								64	81	98	100	100	100	100	100	100

Mitme tootmiseseadmega hüdroelektrijaamadele optimaalset töörežiimi võimaldav loogikaskeemi osa on välja toodud joonisel (Joonis 29). Lisas (L.1) on toodud sellele loogikale vastav loogikaprogrammi osa näide, mis võimaldab elektrijaama optimaalset juhtimist juhul, kui elektrijaamas on kasutusel Unitronics'i PLC.



*Joonis 29. Mitme seadmega hüdroelektrijaama optimaalse juhtimissüsteemi osa loogikaskeem*

## 4. Optimeerimise majanduslik tulem

Et hinnata käesolevas töös käsitletava optimeerimise rakendamist praktikas, tuleks välja selgitada, kas rakendatav optimaaljuhtimine on majanduslikus mõttes mõistlik.

Mõistlik on käsitleda käesoleva projekti elluviimist investeeringu planeerimisena.

Ettevõtlusteoorias selgitatakse, et investeerimise planeerimise etappideks on:

- investeerimisprojektide läbivaatamine;
- investeeringu rahavoogude arvutamine;
- investeerimisprojektide efektiivsuse hindamine;
- investeerimisprojekti valik [16].

Investeerimisprojektide läbivaatamiseks jaotatakse investeerimisprojektid tinglikult 5 (viide) põhirühma:

- 1) tootmise ning turustamise alustamise/laiendamise projektid – tootmise alustamiseks/olemasolevate võimsuste laiendamiseks, uute toodete juurutamise või uutele turgudele mineku eesmärgil;
- 2) põhivara moderniseerimise projektid – tootmiskulude vähendamise eesmärgil;
- 3) keskkonnakaitselised projektid – keskkonnasõbralike tehnoloogiate väljatöötamiseks ja juurutamiseks;
- 4) turu-uuringute projektid – uuritakse nõudlust toodete või teenuste järele, jälgitakse konkurentide tegevust;
- 5) uurimistöö projektid – investeeritakse uue toodangu või tehnoloogia väljatöötamiseks [16].

Käesolevas töös käsitletud optimaaljuhtimise süsteemi juurutamine sobib eelnevast viiest kriteeriumist kõige enam kokku esimesega. Tegemist on projektiga, millega kavandatakse kasvatada elektriyaamade aastatoodangut.

### 4.1. Optimaaljuhtimise rakendamise rahavood

Investeeringu rahavoogude arvutamisel tuleb leida raha vajadus ehk puhasinvesteering (esialgsed kulud) ja samuti investeeringu tulemusena lisanduvad rahavood.

Esialgsete kulude leidmine antud projekti puhul on üsna selgesti määratletav. Puhasinvesteering leitakse järgmise valemi abil:

$$PUHASINVESTEERING = SVM + TPK - OV \quad (5.1)$$

kus *SVM* – soetatava vara maksumus

*TPK* – transpordi- ja paigalduskulud

*OV* – olemasoleva ettevõtluses mittekasutatava vara müük.

Siinjuures saab öelda, et olemasolevat ettevõtluses mittekasutatavat vara käesolevas töös käsitletud elektrijaamades optimaaljuhtimise rakendamisega ei teki. Transpordikulud võib lugeda samuti nulliks. Paigalduskulud loetakse soetatava vara maksumuse hulka, kuivõrd füüsiliselt midagi ei paigaldata ja uuendused on seotud elektrijaama PLC juhtimistarkvara uuendamisega, mida on võimalik teostada läbi arvutivõrgu.

Järelikult saame valemi (5.1) esitada antud projekti kohta järgnevalt:

$$PUHASINVESTEERING = SVM \quad (5.2)$$

Puhasinvesteeringut iseloomustab allolev tabel (Tabel 17). Kulud uuringutele on elektrijaamadel erinevad seetõttu, et neis kasutati veehulkade välja selgitamiseks erinevaid meetodeid, mistõttu on ka nende eeldatavad kulud erinevad.

**Tabel 17. Esialgsed optimeerimiskulud Saesaare ja Leevaku hüdroelektrijaamades**

Leevaku hüdroelektrijaam	€
Kulud uuringutele	400
Optimeerimisrežiimide leidmine ja välja töötamine	688
Automaatika tarkvarauuenduse väljatöötamine ja seadistamine	860
KOKKU:	1948

Saesaare hüdroelektrijaam	€
Kulud uuringutele	200
Optimeerimisrežiimide leidmine ja välja töötamine	688
Automaatika tarkvarauuenduse väljatöötamine ja seadistamine	860
KOKKU:	1748

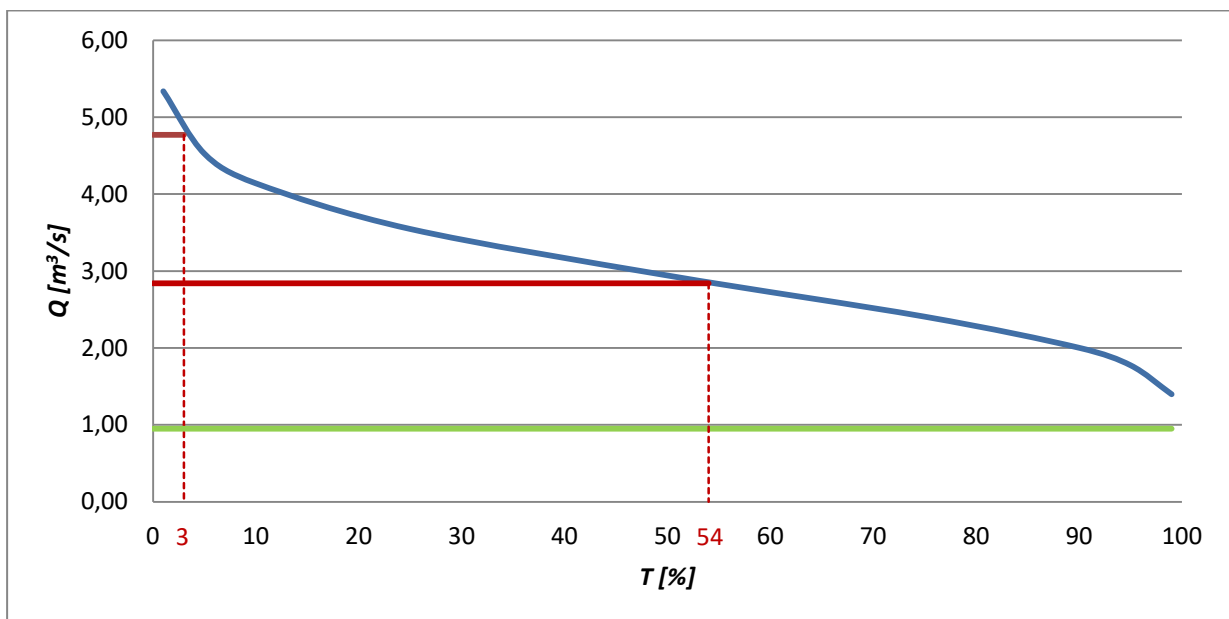
Toome välja puhasinvesteeringu kogukulu:

$$PUHASINVESTEERING = 3696 \text{ €}$$

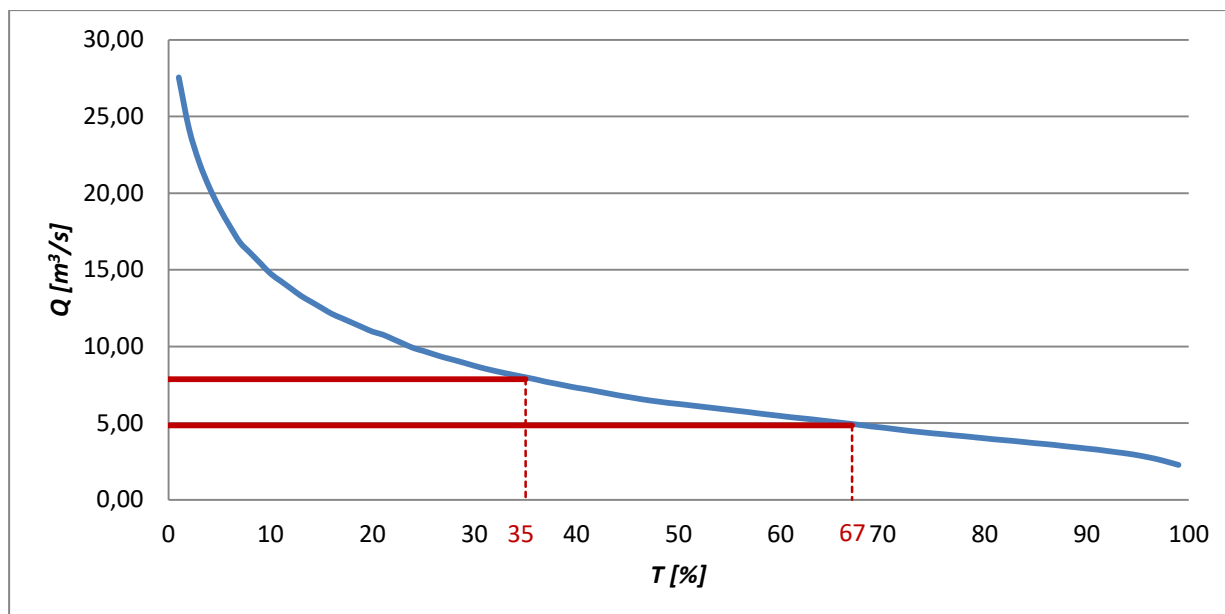


Järgnevalt on investeerimisprojekti hindamiseks vajalik hinnata investeringu tulemusena lisanduvaid rahavoogusid. See ülesanne on aga antud juhul üsna ebamäärane, kuivõrd hüdroelektrijaamade energiatoodang sõltub suurel määral looduses esinevatest vooluhulkadest ja puudub kindel nullpunkt, mida võtta aluseks lisanduva elektrienergia toodagu arvutamiseks.

Siiski on võimalik välja tuua periood, mille puhul optimaaljuhtimine on kõige intensiivsemalt kasutuses. Nagu peatükis 2.7 välja toodud vooluhulga kestuskõveratest nähtub, siis Saesaare hüdroelektrijaamas on eeldatav optimaaljuhtimisel toimiv juhtimine 97% aastast, Leevakul on see aga 65% aastast. Seejuures aga võib eeldada, et olulist lisaväärtust ei too optimeerimine ka sel juhul, kui töötab vaid üks turbiinidest. Ühe turbiini töö korral on ka varasemalt kasutatud juhtimisprogrammi järgi sama situatsioon nagu käesolevas töös väljatöötatud juhtimissüsteemi korral. Seega tuleks välja selgitada kahe turbiiniga töörežiimil töötava hüdroelektrijaama optimaalsest juhtimisest saadav lisaväärtus. Toome veelkord välja vooluhulga kestuskõverad, ning lisame graafikutele ühe turbiiniga töörežiimide joonised (Joonis 30 ja Joonis 31).



**Joonis 30. Saesaare HEJ vooluhulga kestuskõver koos kahe tootmiseseadme töörežiimi vahemikuga**



**Joonis 31. Leevaku HEJ vooluhulga kestuskõver koos kahe tootmiseadme töörežiimi vahemikuga**

Näeme, et eeldatav lisaväärtus on võimalik saavutada Saesaare hüdroelektrijaama osas keskmiselt 51% aastast ning Leevaku hüdroelektrijaama puhul on see 32% aastast. See tähendab, et Saesaare hüdroelektrijaamas on sel perioodil koormus üle 97 kW ja Leevakul üle 107 kW. Edasi on vajalik välja selgitada, mis võiks olla sellisel juhul täiendav toodang.

AS-i Generaator andmetele tuginedes on nende perioodide keskmiseks võimsuseks Saesaare hüdroelektrijaamas 116 kW ja Leevaku hüdroelektrijaamas 132 kW. Teame, et juhtimissüsteem on üles ehitatud täna selliselt, et üks tootmiseadmetest on fikseeritud teatud võimsusele ja teist seadet juhitakse vastavalt looduslikule vooluhulgale.

Saesaares 116 kW puhul on tootmiseadme koormus jagatud olnud selliselt, et II tootmiseadme on reguleeritud töörežiimile 87 kW ja I tootmiseadme koormus on 29 kW. Sellistele koormustele vastavad veetarbed vastavalt 1,66 ja 0,77 m<sup>3</sup>/s. Kasutades optimeerimiseks juba tuttavat „Exceli“ tabelit (Tabel 9) selgub, et optimaalse koormusjaotuse korral tuleb eelnimetatud veetarbele vastav elektrijaama koormus 127 kW ehk 9,5% kõrgem koormus.

Kuivõrd täpsemat analüüsi ei võimalda käesoleva töö maht ning teisalt on täpsema analüüsi läbi viimine ka reaalselt vägagi kulukas, opereerimegi saadud keskmise tulemusega.

51% aastast on 4468 tundi. Seega arvutame sellele perioodile vastavad toodangud. Saame, et optimaaljuhtimist mitte kasutades on selle perioodi toodanguks 518288 kWh. Optimaaljuhtimise rakendamise järgselt tõuseb eelduslikult eeltoodud perioodil toodang

567436 kWh-ni. Seega lisanduvaks toodangu koguseks on 49148 kWh. Võttes arvesse 2016 aasta keskmise elektrienergia hinna 32 €/MWh, saame lisanduvaks rahavooks 1572,74 € aastas.

Leevaku hüdroelektrijaama puhul on 132 kW juures koormus jagatud nii, et II tootmiseseade on seatud koormusele 58 kW ja I tootmiseseade on seatud koormusele 74 kW. Sellistel koormustel on veetarbed vastavalt 2,58 ja 3,08 m<sup>3</sup>/s. Kasutades optimeerimiseks tuttavat „*Exceli*“ tabelit (Tabel 11) selgub, et optimaalse koormusjaotuse korral tuleb eelnimetatud veetarbele vastav elektrijaama koormus 134 kW ehk 1,5% kõrgem koormus.

32% aastast on 2803 tundi. Sellele perioodile vastav energia toodang optimaaljuhtimiseta on 369996 kWh. Optimaaljuhtimise rakendamise järgselt tõuseb eelduslikult eeltoodud perioodil toodang 375602 kWh-ni. See on 5606 kWh lisanduvat toodangut. Võttes arvesse 2016 aasta keskmise elektrienergia hinna 32 €/MWh, saame lisanduvaks rahavooks 179,39 € aastas.

Selgub, et kuna täiendavaid kulusid antud projekti elluviimine kaasa ei too, siis annab mõlema elektrijaama optimeerimine lisanduvaks rahavooks kokku 1752,13 € aastas. Samuti saab järeldada, et optimeerimine võib anda väga erinevate tulukustega tulemusi. Seega saab järeldada tehtud töö põhjal, et optimeerimise tulukust ja mõstlikkust on otstarbekas alati hinnata vastavate uuringute läbiviimisega, lähtuvalt konkreetsest olukorrast.

## **4.2. Optimeerimise kui investeerimisprojekti efektiivsuse hindamine mitme seadmega hüdroelektrijaamas**

Eelnevast peatükist on olemas algandmed, mille baasil hinnata optimeerimise rakendamise kui investeerimisprojekti efektiivsust.

Võimalik on valida mitme erineva hindamiskriteeriumi vahel. Kasutame käesolevas töös kolme:

- tasuvusaeg
- praegune puhasväärtus – NPV
- sisemine tasuvus – IRR

$$Tasuvusaeg = \frac{Investeeringu\ summa}{Aastane\ keskmine\ investeeringust\ saadav\ rahavoog} \quad (5.3)$$

Seega saame tasuvusajaks käesoleva projekti rakendamisel  $3696 / 1752,13 = 2,1$  aastat.

Saadud tulemust tuleb pidada üldiste kriteeriumite järgi väga heaks tulemuseks ning projekt tuleks vastu võtta.

Praeguse puhasväärtuse (NPV) arvutamisel eeldame, et projekti elueaks on 20 aastat. See tuleneb sellest, et selle aja möödudes vahetatakse eeldatavasti välja elektrijaama automaatika. Nõutavaks tulunormiks on 10%.

$$NPV = (Lisandunud\ rahavoog \cdot APVDT) - Alginvesteering \quad (5.4)$$

kus  $APVDT$  on annuiteedi nüüdisväärtuse diskontotegur.

$APVDT$  saame projekti eluea ja nõutava tulunormi alusel annuiteetide tabelist:

$$APVDT_{20,10} = 8,514$$

$$NPV = (1752,13 \cdot 8,514) - 3696 = 11221,63 \text{ €}$$

Üldise hindamiskriteeriumi järgi võib projekti vastu võtta kui  $NPV > 0$  ning projekt tuleks tagasi lükata kui  $NPV < 0$ . [16] Projekt on seega antud hindamiskriteeriumi järgi vastuvõetav.

Anname hinnangu sisemise tasuvuslävi (IRR) abil:

IRR-i saame arvutada, kasutades finantsmatemaatika annuiteetide praeguste väärtuste tabelit, arvutades välja  $AVPDT$ .

$$AVPDT = \frac{Alginvesteering}{Puhaskasum} \quad (5.4)$$

Puhaskasumina saab käsitleda antud juhul lisanduvat rahavoogu, kuivõrd investeeringu tagajärjel täiendavaid kulusid ei teki.

$$AVPDT = \frac{3696}{1752,13} = 2,109$$

Leiame finantsmatemaatika annuiteedi praeguse väärtuse tabelist diskontotegurile 2,109 ning 20 aastale vastava protsentmäära. Kõige ligem protsentmäär on 40 % (annuiteedi diskontotehuri arväärtus 2,497).

Kui IRR on suurem kui nõutav tulunorm, siis tuleks projekt vastu võtta ja projekt tuleks tagasi lükata, kui IRR on väiksem, kui nõutav tulunorm. Antud juhul saime, et  $IRR = 40\%$ . Nõutav tulunorm oli aga  $10\%$ . Seega on tegemist hea projektiga ja see tuleks vastu võtta.

Kõigi valitud hindamiskriteeriumite tulemused näitasid, et projekt tuleks vastu võtta. Järelikult on tegemist hea projektiga, mis tuleks ellu viia.

# Lõputöö kokkuvõte

Lõputöö ülesandeks oli mitme tootmiseseadmega hüdroelektrijaamade optimeerimine.

Vaadeldi Saesaare ja Leevaku hüdroelektrijaamade töös olevate agregaatide koosseisu ja nende vahelise koormusjaotuse optimeerimise ülesannet. Mõlemad elektrijaamad sisaldavad kahte tootmiseseadet. Seejuures piiritleti tulenevalt mõneta laiemast tähendusest agregaatide koosseis mõistega tootmiseseade, mis sisaldab endas vastastikuseid mõjusid alates veehaaretest lõpetades imitoruga ning sisaldades seejuures ülekandeid ja generaatorseadmeid.

Lahendada tuli järgmised küsimused:

- 1) Määrata konkreetsete turbiinide kasutatavate vooluhulkade kõverad suhtes võimsusesse. (Vooluhulgad määrata võimalusel mõõtmise teel, alternatiivselt analoogiate abil).
- 2) Uurida mitme seadmega hüdroelektrijaamade ülemineku karakteristikuid ühelt agregaadilt kahele ja optimeerida elektrijaamade töö vastavalt kasutada olevale vooluhulgale.
- 3) Koostada automaatika programmi osa elektrijaama optimaalse töö juhtimiseks.
- 4) Anda hinnang, mis muutuks optimeeritud elektrijaama töö korral, võrreldes senini kasutatud juhtimissüsteemiga. (Kas energia toodang suureneks, milline võiks olla selle majanduslik kasu, mida tuleks erinevates elektrijaamades selleks teha, et optimaalse juhtimise süsteem ellu viia?)

Eeldati, et elektrijaamade tänane töörežiim ja juhtimine ei toimu mitte just väga teaduspõhistel põhjendustel ja alustel. Sellest tulenevalt püüab antud magistritöö anda vastuseid lähteülesandes püstitatud küsimustele.

Magistritöö arutluste käigus jõuti järeldusele, et tegemist on läbivoolu hüdroelektrijaamadega (ingl. k. „*run-of-river*“ *hydro power plant*), mistõttu on oluline hinnata missugusel perioodil on optimeerimine mõistlik ning missugusel perioodil pole sellel mõtet. Teisisõnu – mis perioodil annab optimeerimine võrreldes olemasoleva olukorraga täiendavat lisaväärtust.

Oluline on välja selgitada, mis tüüpi turbiinid on hüdroelektrijaamas kasutusel. Selle alusel on võimalik valida õige üldtuntud (tüüpiline) karakteristik turbiini kohta (näiteks kasutegurikarakteristik). Üldised karakteristikud antakse üldjuhul just turbiinile, mis tähendab, et sealjuures ei ole arvestatud kasutegureid ülekannetele, generaatori laagritele ja generaatori elektrilist kasutegurit. Seda tuleb üldiste karakteristikute kasutamisel arvesse võtta.

Saesaare hüdroelektrijaamas on kasutusel Francis tüüpi turbiinid ja Leevaku hüdroelektrijaamas üks Kaplan tüüpi ning teine Semi-Kaplan tüüpi turbiin.

Üldised karakteristikud on aga liigagi üldised, et tulemused võiksid tulla usaldusväärsed. Samuti on tänapäeval valmistatud turbiinide osas probleemiks, et nendega ei anta väga täpset ja täielikku informatsiooni tellijale kaasa. Olemas võib olla vaid mõni parameeter, mis tähistab näiteks maksimum kasutegurit mingil koormusel. Samuti ei ole ka need näitajad, turbiini paigaldamisel konkreetsele asukohta, tingimata väga täpsed.

Töö käigus jõuti kirjandusallikates viidatud seisukohale, et seadmete välikatsetused tänapäevaste mõõteseadmetega, kus mõõdetakse iga üksiku tootmiseadme koormus ja sellele vastav veekulu etteantud survekõrgusel, võimaldab saavutada parima algandmete kvaliteedi.

Eelnevalt tulenevalt viidi käesoleva töö raames läbi väliuuringud. Optimeerimiseks vajalikeks karakteristikuteks on veekulu karakteristikud suhtes elektrijaama koormusesse.

Väliuuringute käigus kasutati Saesaare hüdroelektrijaama puhul lihtsamat vooluhulga mõõtmise seadet, mis võimaldab mõõta vee voolukiirusi kindlas punktis, arvutades etteantud ristlõikepindala kaudu mõõteseria lõpus välja ka koheselt vooluhulga. Leevakul kasutati aga teist tüüpi, akustilist mõõteseadet, mis mõõtis jõel vedamise käigus (antud juhul üle veehaarde lähte) samaaegselt selle laiuse, sügavuse ja voolukiirused kogu profiilil ning seejärel arvutas kokku vooluhulga. Erinevate seadmete kasutamise vajaduse tingis veehaarete eripära – sügavus, laius, vooluhulk.

Saadud tulemusi osutus vajalikuks siiski aproksimeerida ning interpoleerida puuduvad andmed. Tulemuseks on töös kasutatavad veekulu karakteristikud, mis loovad eelduse optimaalsete töörežiimide väljaselgitamiseks. Toetudes veekulu karakteristikute andmetele arvutati optimeerimise jaoks välja ka kõik teised elektrijaamade tööparameetreid iseloomustavad karakteristikud. Nendeks on veekulu suhtelise juurdekasvu karakteristikud, kasutegurikarakteristikud ja vee erikulukarakteristikud.

Saesaare hüdroelektrijaama tootmiseadmete kasutegurikarakteristikute võrdlemisel selgus, et kuigi tegemist on identsete seadmetega, on siiski olemas teatav tööparameetrite erinevus. Teisalt, võrreldes kasutegurikarakteristikuid tüüpikarakteristikutega Francis turbiinitüübi kohta, võib väita, et karakteristikute kuju on tõepoolest sarnane tegeliku kasuteguri karakteristikuga. Konkreetsete väärtuste osas on tegelikud karakteristikud siiski erinevad sellest, mida võiks tuletada tüüpikarakteristikust.

Analüüsid Saesaare hüdroelektrijaama vee erikulukarakteristikuid jõuti järeldusele, et ühe tootmiseadmega töörežiimis tuleb eelistada II tootmiseadet.

Leevaku hüdroelektrijaama kasuteguri karakteristikud on tulenevalt turbiinide tüübierinevusest erinevad, kuid siiski sarnased tüüpkarakteristikutele Kaplan turbiinide kohta.

Vee erikulukarakteristikute analüüs näitas, et Leevaku hüdroelektrijaamas on ühe turbiiniga töörežiimis vaja koormata kuni koormuseni 35 kW II tootmiseadet ning edasi seisata see ning alates koormusest 35 kW koormata I tootmiseadet.

Üldise järeldusena saab välja tuua, et reaalsele mõõtetulemustele toetumine annab hea eelduse edukaks optimeerimiseks.

Vastavalt vooluhulga kestuskõverate analüüsile leiti, et tootmiseadmete koosseisu täpsem optimeerimine on vajalik 97% aastast Saesaare hüdroelektrijaama puhul ning 65% aastast Leevaku hüdroelektrijaama puhul. Seejuures on elektrijaamade survekõrgus vastavalt 9 ja 3 meetrit.

Kasutades  $\mu$ -iteratsiooni meetodit, leiti optimumi tingimustele tuginedes optimaalsed koormusjaotused. Nende koormusjaotuste alusel on võimalik seadistada elektrijaamade automaatika selliseks, et elektrijaamade kogu võimsuste diapsoonis jälgitakse optimaalset koormusjaotust ja seadmete optimaalset töökoosseisu.

Magistritöös käsitlevates hüdroelektrijaamades on elektrijaama juhtimiseks kasutusel Unitronicsi'i kontrollid tüüp Vision 1040 ning neid programmeeritakse tarkvaraga VisiLogic. Selleks, et edukalt elektrijaama kontrollid vajadustele vastavaks seadistada, leiti analüüsi käigus, et tootmiseadme võimsusskaala on vajalik välja vahetada protsendiskaala vastu. Eelduseks on, et turbiinide omavaheline koormuse optimaalne jaotamine toimub, vastavalt leitud koormusjaotusele kindlaks määratud survekõrgusel H. Töös on esitatud mitme seadmega hüdroelektrijaama optimaalse juhtimissüsteemi osa loogikaskeem.

Et hinnata käesolevas töös käsitletava optimeerimise rakendamist praktikas, uuriti kas rakendatav optimaaljuhtimine on majanduslikus mõttes mõistlik. Tegemist on projektiga, millega kavandatakse kasvatada elektrijaamade aastatoodangut ja seeläbi suurendada müügitulu. Leiti, et juhul, kui optimeerimise koguteenus tuleks sisse osta, oleksid Saesaare ja Leevaku hüdroelektrijaama optimeerimise kogukulud 3696 €. Täiendavalt analüüsiti, missuguse pikkusega perioodil aastast võiks tekkida lisatootlus tulenevalt optimeerimisest. Selgus, et Saesaare hüdroelektrijaamas on see näitaja 51% ja Leevaku hüdroelektrijaamas



32% aastast. Võimalikuks aastaks lisanduvaks toodanguks saadi vastavalt 49149 kWh (1573 €/aastas) ja 5606 kWh (179 €/aastas). Seega võib optimeerimine anda väga erinevaid tulemusi, mistõttu saab järeldada tehtud töö põhjal, et optimeerimise tulukust ja mõstlikkust on otstarbekas alati hinnata vastavate uuringute teostamisega, lähtuvalt konkreetsest olukorrast.

Vastavalt eelenvale, saadi projekti elluviimise tasuvusajaks 2,1 aastat, praegune nüüdisväärtus (NPV) on antud projektil 11222 € ja sisemine tasuvuslävi (IRR) 40 %. Tulemused näitavad, et tegemist on kokkuvõttes hea investeerimisprojektiga ning projekt tuleks vastu võtta ning ellu viia.

Autori hinnangul näitab antud magistritöö, et läbi tarkade juhtimissüsteemide ning optimeeritud hüdroelektrijaama töö korral on võimalik suurendada elektrijaamade aastatoodanguid. Seejuures ei ole selleks tehtavad investeeringud põhjendamatud. Täiendavalt võib sarnane analüüs anda ka muud olulist teavet elektrijaamade operaatoritele, näiteks tootmiseseadmete korrasoleku kohta läbi kasutegurikõverate hindamise. Töös välja toodud meetodikat kasutades on võimalik optimeerida ka teisi väiksemaid ja ka suuremaid elektrijaamu ning mitte ainult hüdroelektrijaamu. Mõnevõrra ebamäärane on lisanduva toodangu hindamine, kuivõrd see sõltub hüdroelektrijaamades saadaolevast ressursist ehk veekogusest ning selle varieeruvusest aasta lõikes. Pikaajalises perspektiivis, mida energiasüsteemide arendamine kahtlemata eeldab, on optimeerimine siiski töö autori hinnangul vajalik.

# Kirjandus

- [1] M. Valdma, „Energiasüsteemide optimaaljuhtimine,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2014.
- [2] Е. В. Цветков, Т. М. Алябышева, Л. Г. Парфенов, Оптимальные режимы гидроэлектростанций в энергетических системах, Москва: Энергоатомиздат, 1984.
- [3] EV, *Veeseadus*, Riigikogu, 2016.
- [4] В. М. Горнштейн, Наивыгоднейшие режимы работы гидростанций в энергетических системах, Москва; Ленинград, 1959.
- [5] В. М. проф. Синькова, Оптимизация режимов энергетических систем, Киев: Вища школа, 1976.
- [6] T. Kõiv, „Jõgede geomorfoloogia,“ EMÜ, 2013. [Võrgumaterjal]. Available: <http://jogedegeomorfoloogia.weebly.com/index.html>. [Kasutatud 27 3 2016].
- [7] „Tridentes-Energy,“ 2009. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.tridentes.com/energy/en/turbines.html>. [Kasutatud 14 Mai 2017].
- [8] „Renewables First,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.renewablesfirst.co.uk/hydropower/hydropower-learning-centre/archimedean-screw-hydro-turbine/>. [Kasutatud 15 Mai 2017].
- [9] K. Vaugh, „Hydropower,“ 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.slideshare.net/KeithVaugh/hydropower-11538342>. [Kasutatud 27 03 2016].
- [10] J. Cook ja J. Walsh, „International Group for Hydraulic Efficiency Measurements,“ 2008. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ighem.org/Paper2008/02.pdf>. [Kasutatud 23 aprill 2017].
- [11] P. Raesaar, *Vee-energia Eestis*, Tallinn: Energiakeskus TAASEN, 1995.
- [12] X. Huang, G. Fang, Y. Gao ja Q. Dong, „Scientific Research,“ 10 Juuli 2010. [Võrgumaterjal]. Available: [http://file.scirp.org/pdf/EPE20100300007\\_45353728.pdf](http://file.scirp.org/pdf/EPE20100300007_45353728.pdf).

[Kasutatud 1 Mai 2017].

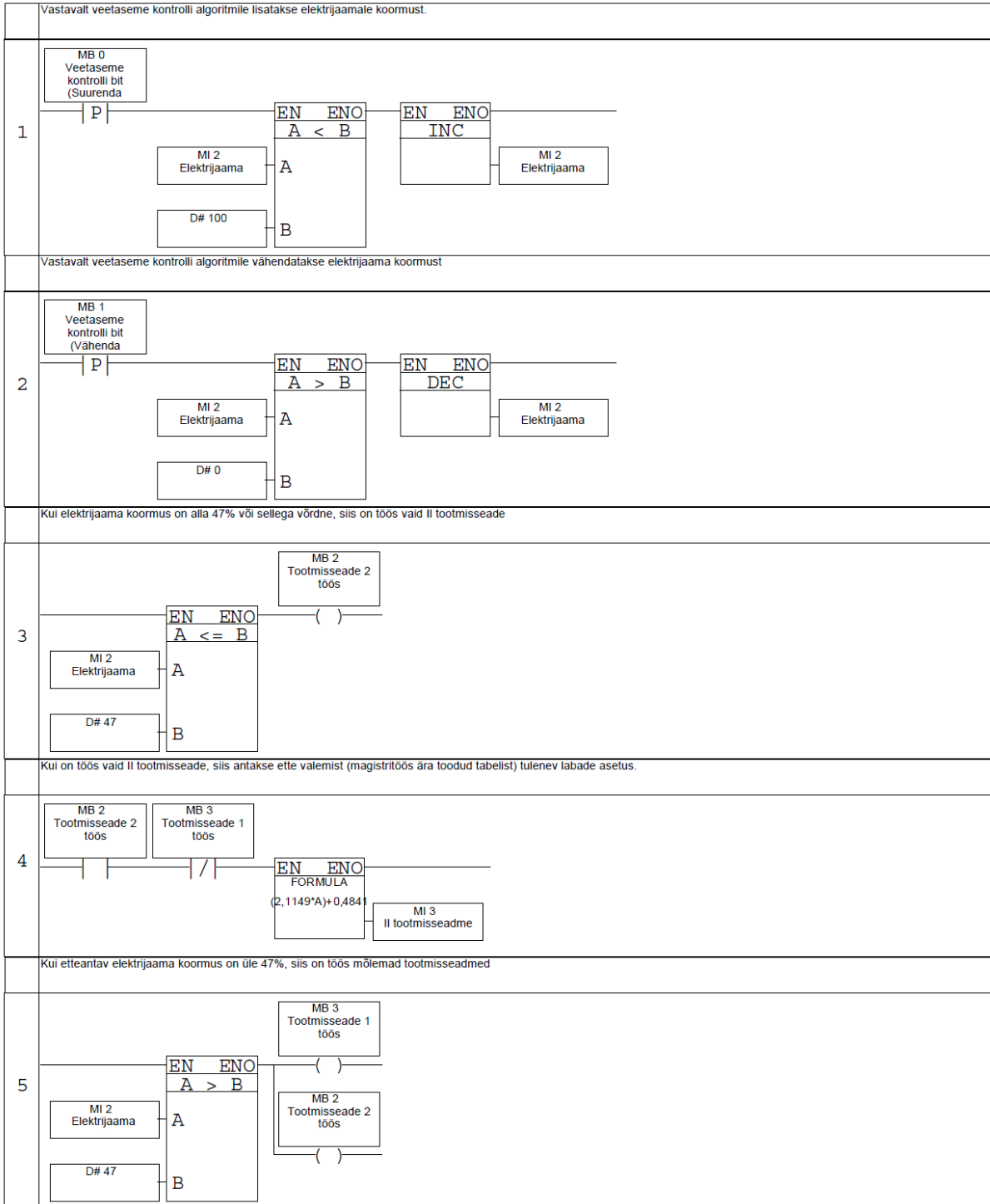
- [13] S. Basso ja G. Botter, „Agu Publications,“ 12 Oktoober 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2012WR012017/full>. [Kasutatud 1 Mai 2017].
- [14] R. Paluoja, „Tallinna Tehnikaülikool,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.ttu.ee/public/i/infotehnoloogia-teaduskond/Instituudid/automaatikainstituut/oppeained/ReinP/Kontrollerid/PLC\\_sissejuhatus3.pdf](https://www.ttu.ee/public/i/infotehnoloogia-teaduskond/Instituudid/automaatikainstituut/oppeained/ReinP/Kontrollerid/PLC_sissejuhatus3.pdf). [Kasutatud 15 Aprill 2017].
- [15] T. Lehtla ja A. Rosin, Loogika ja programmeerimine, Tallinn: International Curricula of Mechatronics and Training Materials for Initial Vocational Training, 2001.
- [16] P. Zeiger, Vajalikke teadmisi ettevõtlusest, Tallinn: Tallinna Ülikool, 2013.
- [17] „Rehart Power,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.rehart-power.com/en/hydropower-screws/mode-of-operation.html>. [Kasutatud 15 Mai 2017].

# Lisad

L.1. Hüdrolektriijaama automaatikaprogrammi täiendus Saesaare hüdrolektriijaama näitel.

# L.1. Hüdrolektriijaama automaatikaprogrammi täiendus Saesaare hüdrolektriijaama näitel.

Module: ! Main Module  
Subroutine: Elektriijaama optimaalne juhtimine



	Kui mõlemad tootmiseadmed on töös, siis antakse ette vastavalt valemile (magistritöös ära toodud tabelist) tulenev labade asetus II tootmiseadmele.
6	<p>MB 3 Tootmiseadme 1 töös</p> <p>MB 2 Tootmiseadme 2 töös</p> <p>EN ENO FORMULA (1,0684*a)-7,403</p> <p>MI 3 II tootmiseadme</p>
	Kui mõlemad tootmiseadmed on töös, siis antakse ette vastavalt valemile II tootmiseadme järgi tulenev labade asetus I tootmiseadme kohta (alternatiivselt magistritööst aratoodud tabeli järgi).
7	<p>MB 3 Tootmiseadme 1 töös</p> <p>MB 2 Tootmiseadme 2 töös</p> <p>EN ENO FORMULA (0,9792*a)+4,1707</p> <p>MI 4 I tootmiseadme</p>
17	<p>RET</p>