



**Open your mind. LUT.**

Lappeenranta **University of Technology**

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

## **PIENVESIVOIMALAN UUSINTA**

Juha Hakulinen

Työn tarkastajat: Professori Jari Backman  
Tutkijaopettaja Pekka Punnonen

Työn ohjaaja: Professori Jari Backman

Lappeenrannassa 10.12.2013

# TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikka

Juha Hakulinen

## **Pienvesivoimalan uusinta**

Diplomityö

2013

84 sivua, 80 kuvaa, 4 taulukkoa ja 5 liitettä.

Tarkastajat: Professori Jari Backman

Tutkijaopettaja Pekka Punnonen

Hakusanat: pienvesivoima, Kaplan-turbiini, vesivoima, uusinta, mitoitus

Diplomityön tavoitteena on tutkia eri vaihtoehtojen kannattavuutta pienvesivoimalan uusinnassa. Sähkönhinnan muodostus ja tulokseen vaikuttavat tekijät käsitellään kokonaisuuksinaan. Työssä tehdään kustannuslaskenta valmistajien tarjouksien perusteella ja suoritetaan esittely eri tarjouksista.

Valmisteluosassa tutustutaan mitoitusarvoihin ja jos niitä ei ole miten ne selvitetään. Mittauksen kautta saadut arvot käsitellään ja sovelletaan siten, että valmistajat pystyvät käyttämään niitä. Lisäksi tutustutaan turbiinin laskentaan ja mitoitetaan Kaplan-turbiini työssä käytettyyn pienvesivoimalaan.

# **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology

Faculty of technology

Department of technology

Juha Hakulinen

## **Reforming a small hydro plant**

Master's thesis

2013

84 pages, 80 figures, 4 tables and 5 appendixes.

Supervisors: Professor Jari Backman

Research teacher Pekka Punnonen

Keywords: small hydro, Kaplan-turbine, hydropower, reforming, dimensioning

Reforming a hydro plant is a large task and several factors influences how the amendment is done. In this Master's thesis the goal is to research how profitability of the reforming succeeds. The elements of how the price of the electricity consists of are dealt in a whole. And so are the elements who affect the profitability. A cost analysis of the reforming was done on each of the offering. Propositions were also introduced.

In a preparation part the dimensioning values were introduced and if there were not any, it was revealed how the dimensioning values can be obtained. Measured values were processed and fit in fashion that a manufacturer can use them. Calculation of Kaplan turbine was introduced as well and as an example a Kaplan turbine was dimensioned.

## ALKUSANAT

Diplomityö on tehty Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston energiatekniikan osastolla Lohikosken Mylly Oy:lle Suur-Savon Energiasäätiön myöntämällä stipendillä.

Professori Jari Backmanin kertoessa tästä työstä alkumietteet olivat hämmentävät työn laajuuden ja kokonaisvaltaisuuden vuoksi. Työtä tehdessä ja sen edetessä hämmennys kuitenkin lisääntyi kun kävi hyvin selväksi, että kaikkea ei voi ottaa huomioon annetun ajan puitteissa.

Haluankin kiittää työn avustamisessa Mikko Ruotsalaista Saimaan ammattikorkeakoulusta, Petri Tonteria Labkoteciltä, Ari Koistista ympäristökeskukselta, Markus Huttusta ympäristökeskukselta, Ismo Aukeeta VEO Oy:sta, Tero Ahosta sähkötekniikan osastolta ja Heikki Pirttiniemeä Waterpumps Oy:stä työn tarkastajien ja ohjaajan työpanosta kuitenkin unohtamatta.

Henkisen hyvinvoinnin kannalta tärkeänä henkireikänä on toiminut Lappeenrannassa sijaitseva kuntosali Bullfactory. Päivän jälkeinen raudan kanssa telmiminen toimi erittäin hyvänä tapana irtautua arjen murheista ja työasioista. Elämä on kuormittavaa, mutta antoisaa ja kovat haasteet tarjoavat yksilölle mahdollisuuden kehittyä niin fyysisesti kuin henkisesti.

Lappeenrannassa 10.12.2013

Juha Hakulinen

## SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO .....	7
2	VESIVOIMA .....	8
2.1	HISTORIA .....	10
2.2	SÄÄTÖVOIMA.....	11
2.3	VIRTAAMAN VAIHTELU .....	12
2.4	KEHITYSMAHDOLLISUUDET .....	13
3	VESIVOIMALAITOS.....	15
3.1	TURBIINIT.....	16
3.1.1	Francis-turbiini .....	17
3.1.2	Kaplan-turbiini.....	19
3.1.3	Pelton-turbiini.....	20
3.2	GENERAATTORI .....	21
3.3	AUTOMAATIO .....	23
4	LOHIKOSKEN MYLLY .....	25
5	MITOITUSARVOJEN SELVITYS .....	30
5.1	MITTAAMINEN .....	30
5.2	VIRTAAMA JA VIRTAUSNOPEUS.....	32
5.2.1	Mittauksen tulos .....	33
5.2.2	Suodatetut ja keskiarvoistetut arvot .....	35
5.3	PYSYVYYSKÄYRÄ.....	38
6	TEOREETTINEN MALLI .....	40
6.1	KANAVAN VIRTAUSHÄVIÖIDEN LASKENTA .....	40
6.1.1	Virtauksen supistuma.....	40
6.1.2	Putkivirtaus .....	43
6.2	TURBIININ LASKENTA JA MITOITUS.....	45
6.2.1	1D-teoria .....	45
6.2.2	Nopeuskolmiot Kaplan-turbiinissa.....	49
6.2.3	Mitoitus .....	52

6.3	PARANTAMINEN.....	54
7	LASKENTA OHJELMAT .....	56
7.1	MITTAUS .....	56
7.2	KANAVA JA TULOPUTKI.....	58
7.3	TURBIINI .....	59
7.4	KAPLAN-TURBIINI.....	60
7.5	LASKENTA.....	60
8	TEOREETTISEN LASKENNAN TULOKSET .....	62
9	UUSINTA .....	64
9.1	WATERPUMPS WP OY .....	64
9.2	VEO .....	64
9.3	OY M&S POWER LTD .....	65
9.4	WATERPUMPS WP OY VANHA TARJOUS.....	66
9.5	MUUT VAIHTOEHDOT .....	66
10	KANNATTAVUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT .....	68
10.1	TUET .....	68
10.2	MAKSUT .....	69
10.3	ILMASTON MUUTOKSEN VAIKUTUS VESIVOIMAAN .....	69
10.4	SÄHKÖMARKKINAT .....	72
11	TARJOUSTEN VERTAILU .....	76
12	YHTEENVETO .....	80
	LÄHDELUETTELO.....	81

## SYMBOLILUETTELO

**Roomalaiset**

<i>A</i>	pinta-ala, RMS amplitudi	$m^2$ , -
<i>c</i>	absoluuttinopeus	m/s
<i>c<sub>a</sub></i>	aksiaalinopeus	m/s
<i>c<sub>u</sub></i>	tangentiaalinopeus	m/s
<i>d</i>	halkaisija	m
<i>D</i>	halkaisija, karakteristinen mitta	m
<i>E</i>	hyödynnetty putouskorkeus	m
<i>f</i>	kitkakerroin, sähkön taajuus	-, Hz
<i>g</i>	putoamiskiihtyvyyys	$m/s^2$
<i>h<sub>f</sub></i>	putouskorkeuden häviö (head loss due friction)	m
<i>H</i>	häviöistä vähennetty putouskorkeus	m
<i>HI</i>	vesivoimalaitoksen ylä- ja alaveden erotus, putouskorkeus	m
<i>k</i>	siipiluvun kerroin	-
<i>L</i>	tuloputken pituus	m
<i>n</i>	pyörimisnopeus	1/s, 1/min
<i>n<sub>s</sub></i>	ominaispyörimisnopeus (kuva 6.5)	-
<i>n<sub>q</sub></i>	ominaispyörimisnopeus (kuva 8.1)	rpm
<i>p</i>	paine, generaattorin napapariiluku	Pa, -
<i>P</i>	akseliteho, teho, keskimääräinen teho	W
<i>P<sub>spec</sub></i>	ominaisteho	J/kg
<i>r</i>	säde, etäisyys keskipisteestä	m
<i>u</i>	kehänopeus	m/s
<i>v</i>	virtausnopeus	m/s
$\bar{v}$	keskimääräinen virtausnopeus	m/s
<i>w</i>	suhteellinen nopeus	m/s
<i>q<sub>m</sub></i>	massavirta	kg/s
<i>q<sub>v</sub></i>	tilavuusvirta, virtaama	$m^3/s$
<i>z</i>	syvyys, siipien lukumäärä	m, -

**Kreikkalaiset**

$\alpha$	kineettisen energian korjauskerroin, poistumiskulma	-, °
$\beta$	lähtevän virtauksen kulma, kulma	°
$\beta_2$	siipikulma jättöreunalla	°
$\varepsilon$	pinnan karheus	mm
$\rho$	tiheys	kg/m <sup>3</sup>
$\eta$	hyötysuhde	-
$\nu$	kinemaattinen viskositeetti	m <sup>2</sup> /s
$\mu$	dynaaminen viskositeetti	kg/ms
$\zeta$	paikallisvastuskerroin	-
$\theta$	kulma, tulevan virtauksen kulma	°
$\omega$	kulmanopeus	1/s, rad/s
$\Delta$	erotus	-
$^*\Omega$	nopeuskerroin	-

**Ala- ja yläindeksit**

$1$	tuleva virtaus
$2$	lähtevä virtaus
$a$	aikakeskiarvotettu, suurempi
$average$	keskiarvo
$b$	pienempi
$f$	radiaalisuunnan
$hydr$	hydraulinen
$kin,maks$	suurin mahdollinen
$m$	massa
$N$	kohina
$r$	suhteellinen
$S$	signaali



$w$	tangentiaalisuunnan
$\infty$	ääretön
*	teoreettinen

### **Lyhenteet**

VTT	Teknologian tutkimuskeskus
-----	----------------------------

### **Termit**

fluidi	aine, joka ei pysyvästi vastusta muodonmuutosta
--------	---

### **Ominaisarvot**

-	keskiarvo
—	reduoitu arvo

# 1 JOHDANTO

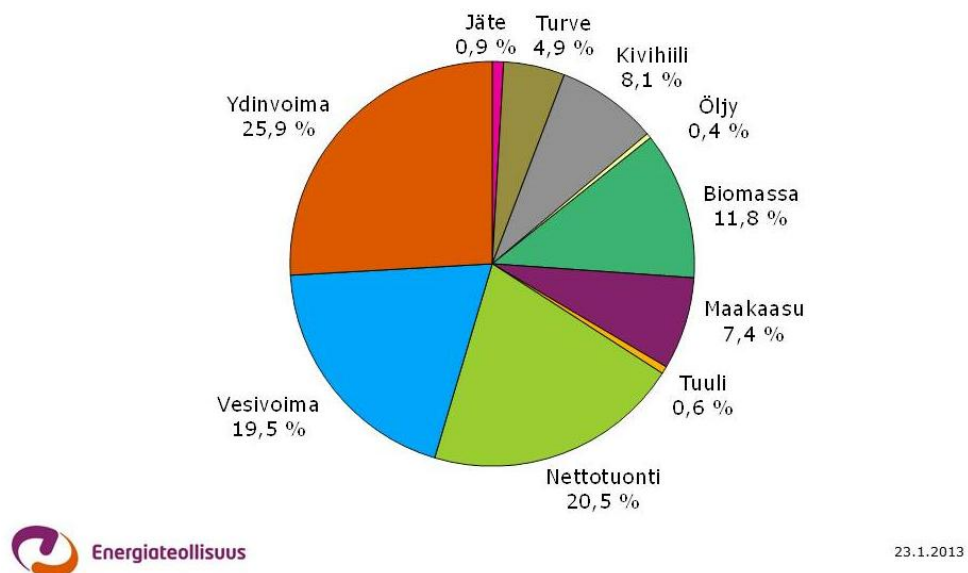
Työn tarkoitus on selvittää uuden laitteiston hankinta Lohikosken Mylly Oy:lle. Diplomityö kuuluu osaksi toimenpidesuunnitelmaa, jonka tarkoitus on parantaa vesivoimalan toimintaa, laajentaa asiakasmäärää, aktivoida osakkaita ja saada myllylle sekä karavaanaritoiminnalle selvä jatkuvuus. Lohikosken myllyn kehittämisen toimenpidesuunnitelma on nähtävillä liitteessä 5.

Työhön liittyy myös kannattavuuteen ja sähkön hintaan vaikuttavien tekijöiden arviointi. Työssä ei käsitellä lupamenettelyä eikä vesilakia, joita on käsitelty Matti Kinttulan Diplomityössä (Kinttula, 2008). Työ jakaantuu kolmeen osaan: laskentaan, valmisteluihin ja uusintaan. Teoriassa käsitellään Kaplan-turbiinin mitoituslaskentaa, Lohikoskelle sopivan Kaplan-turbiinin toimintaa, esitellään lyhyesti laskentaohjelmat, paneudutaan hieman pyöriviin rotodynaamisiin koneisiin ja tarkastellaan teoriassa saatuja tuloksia. Valmisteluosassa esitellään Lohikosken Myllyn nykyinen tila, käydään läpi kuinka mitoitusarvoja selvitetään, käsitellään mitoitusarvot ja tähän osaan kuuluu myös vesivoiman ja vesivoimalaitoksen esittely. Uusintaosassa esitellään laitteistotoimittajien voimalaitosratkaisut, uusintavaihtoehtoja, vertaillaan tarjoukset ja paneudutaan kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä. Laskennassa tehdään yksinkertaistuksia, eikä kaikkea tarvittavaa voitu ottaa huomioon.

## 2 VESIVOIMA

Tärkeimmät energialähteet sähköntuotannossa ovat ydinvoima, vesivoima, kivihiili, maakaasu, puupolttoaineet sekä turve. Vesivoiman osuus sähköntuotannosta vaihtelee vuosittain sen mukaan kuinka paljon vesivoimaa on tarjolla. Suomessa on noin 400 voimalaitosta sähköntuotantoon ja näistä yli puolet on vesivoimalaitoksia. Vuonna 2012 vesivoiman osuus energialähteistä oli liki 20 prosenttia (kuva alla). Suomen yli yhden megawatin vesivoimalaitokset ovat nähtävillä liitteessä 1. (Energiateollisuus, 2013)

### Sähkön hankinta energialähteittäin 2012 (85,2 TWh)



Kuva 2.1: Sähkön hankinta energialähteittäin vuonna 2012. (Energiateollisuus, 2013)

Vesivoima on uusiutuvista energiamuodoista merkittävin tuotantomuoto ja energiajärjestelmän toimivuuden sekä käyttövarmuuden kannalta vesivoimalla on erityisasema säätöominaisuuksiensa vuoksi. Veden energiasta tehdään sähköä hyödyntämällä veden voimaa sen virratessa korkeammasta tasosta alempaan. Vesiturbiinin teho lasketaan yhtälöllä (2.1) (Perttula, 2000)

$$P = \eta \rho g H q_v \quad (2.1)$$

missä

$\eta$	hydraulinen hyötysuhde	[%]
$\rho$	veden tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	putoamiskiihtyvyys	[m/s <sup>2</sup> ]
$H$	putouskorkeus	[m]
$q_v$	tilavuusvirta	[m <sup>3</sup> /s]

Putouskorkeus  $H$  on yleistäen ylä- ja alaveden pinnankorkeuksien erotus. Tarkemmin se määritellään vesien pinnankorkeuden erotuksen ja veden virtausnopeuksien avulla yhtälön 2.2 mukaisesti. (Huhtinen, et al., 2008)

$$H = H_1 + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.2)$$

missä

$H_1$	ylä- ja alaveden pinnan korkeuden ero	[m]
$v_1$	turbiinin virtaavan veden nopeus	[m/s]
$v_2$	turbiinista poistuvan veden virtausnopeus	[m/s]

Veden virtaus muutetaan turbiinissa aksiaalivoimaksi, joka pyörittää sähköä tuottavaa generaattoria. Suomessa on yli 220 vesivoimalaitosta yhteisteholtaan noin 3100 MW. Nämä ovat jaoteltu suurivesivoimaksi, joka on nimellisteholtaan 10 MW, pienvesivoimaksi (1-10 MW) ja alle 1 MW:n minivesivoimaksi. (Energiateollisuus, 2013)

Rakentamiskelpoista vesivoimaa on vuonna 2007 tehdyn selvityksen (Oy Vesirakentaja, 2007) mukaan 1710 MW. Sähköntuotannon nopeaan säätöön soveltuvaa vesivoimaa voitaisiin lisätä vuoteen 2020 mennessä 470 MW, josta neljännes toteutunee suunniteltuina jo toiminnassa olevien voimalaitosten parannuksilla ja koneistojen uusinoilla. Muut hankkeet vesivoiman lisäämiseksi sijaitsevat Kemijoella(44 MW), Iijoella ja Kymijoella. Lisäksi 460 MW vesivoimaa on Ounasjoella ja Iijoen keskijuoksulla, mutta molemmat vesistöt ovat suojeltuja. Pienvesivoimaa on mahdollista rakentaa noin 60 MW. Pienvesivoiman rakentaminen ei ole ollut taloudellisesti erityisen kannattavaa ja viimeisen 10 vuoden aikana avustuksia on myönnetty keskimäärin noin 0,5 milj € vuodessa. Vesivoimalle on kuitenkin paikalliset perusteet ja uusiutuvana energialähteenä energiapoliittinen tuki.

## 2.1 Historia

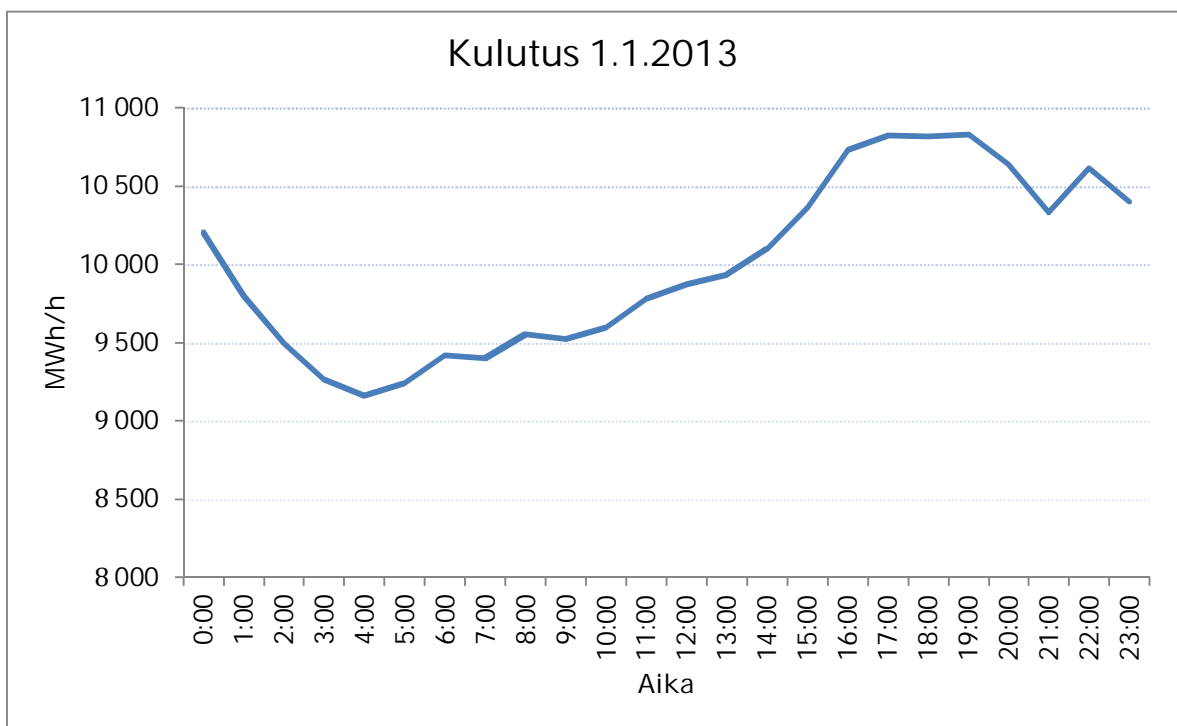
Koskien ja putousten voimaa on hyödynnetty jo yli viiden tuhannen vuoden ajan egyptiläisten ja kiinalaisten ollessa edelläkävijöitä. Roomalaiset rakensivat aikanaan maailman suurimman vesirattaan, mutta ensimmäisen tunnetun vesimyllyn rakensi kreikkalainen Mitridates Vähä-Aasian Lycusjokeen. Tämä ”neljän härän voiman” vaaka-akselinen vesiratas rakennettiin noin vuonna 80 eKr.

Suomeen vesimylly tuli asiakirjatietojen mukaan vuonna 1352 piispa Hemmingille, joka sai myllyoikeudet Aurajoen Halisten-koskeen. 1400-luvulla vesimyllyjä sijaitsi Hämeessä, Varsinais-Suomessa ja Satakunnassa ja sata vuotta myöhemmin myllyjä levisi Pohjanmaalle ja Savoan. Vuosisadan lopulla valtakunnan myllyveroluettelon mukaan myllyjä oli jo 1700. Vesivoimaa hyödynnettiin ensimmäistä kertaa teollisuutta varten vuonna 1616 kun ensimmäinen rautatehdas rakennettiin Karjaanjoen varrelle. Vesisahoja on kuitenkin ollut jo 1500-luvun lopulta lähtien. 1800-luvun puoleenväliin mennessä vesimyllyjen määrä oli noussut jo neljään tuhanteen ja ensimmäinen rautainen vesipyörä otettiin käyttöön vuonna 1837. Tästä kaksitoista vuotta ja vesipyörään ylivertainen turbiini otettiin käyttöön Finlaysonin tehtaalla Tampereella. (Suurpadot-Suomen osasto Ry, 1991)

Suomen teollistuminen alkoi rautaruukeista ja sahateollisuudesta, mikä ei olisi mahdollista ilman vesivoimaa. Siksi ruukit sijoitettiin vesiputousten äärelle ja sahat joen varteen. Rautateollisuus kehittyi ja ruukkien ollessa verrattain suuria asukaskeskittymiä puutavaralle oli luonnollisesti tarvetta, joten sahateollisuutta ruvettiin sijoittamaan ruukkien yhteyteen. 1860-luvun vaihteesta lähtien ryhdyttiin perustamaan puuhiomoita. Puuhiomot valmistivat mekaanista puumassaa, jota käytettiin pahvin ja myöhemmin paperin valmistukseen. Puuhiokkeen tekeminen vaatii paljon energiaa joten hiomot perustettiin suurten koskien äärelle. Paperin valmistaminen vaatii hiokkeen lisäksi toisenkin raaka-aineen, selluloosan. Selluprosessi, vaikka onkin kemiallinen, vaatii energiaa ja paperitehtaat perustettiin samaan aikaan puuhiomoiden ja sellutehtaiden kanssa joen äärelle. (VTT Prosessit, 2004)

## 2.2 Säättövoima

Sähköverkossa on tasapaino tuotetun ja käytetyn energian määrässä, koska sähköä ei voida varastoida verkkoon. Käytetyn energian määrään ei voida vaikuttaa, joten ainoaksi vaihtoehdoksi jää kasvattaa tai vähentää tuotetun sähkön määrää. Sähköverkko tarvitsee siis aina nopeisiin kuormanmuutoksiin reagoivaa säätö- ja varavoimaa. Päivässä muutokset voivat olla hyvinkin suuria kuten kuvassa 2.2, jossa kulutuksen vaihtelu on esitetty 24 tunnin ajalta tammikuussa 2013.



Kuva 2.2: Sähkön kulutuksen vaihtelu Suomessa tammikuun ensimmäisenä päivänä vuonna 2013. (Fingrid, 2013)

Tuotannon ja kulutuksen välisestä tasapainosta Suomessa vastaa kantaverkkoyhtiö Fingrid. Suomen verkko ei ole yksittäisenä saarekkeena vaan kuuluu Pohjoismaiseen sähköverkkoon, joka on synkronisesti yhteen kytketty tehden koko verkolle saman taajuuden. Tuotannon ja kulutuksen tasapainoa kuvaa taajuus, jonka vaihtelu sallitaan välillä 49.9 – 50.1 Hz. Taajuuden ylläpitoon tarvitaan siis edellä mainittua säätö- ja varavoimaa. Tätä kutsutaan taajuusohjatuksi häiriöreserviksi, koska se aktivoituu automaattisesti taajuudenmuutoksista. Pohjoismaisessa sähköverkossa taajuusohjattua

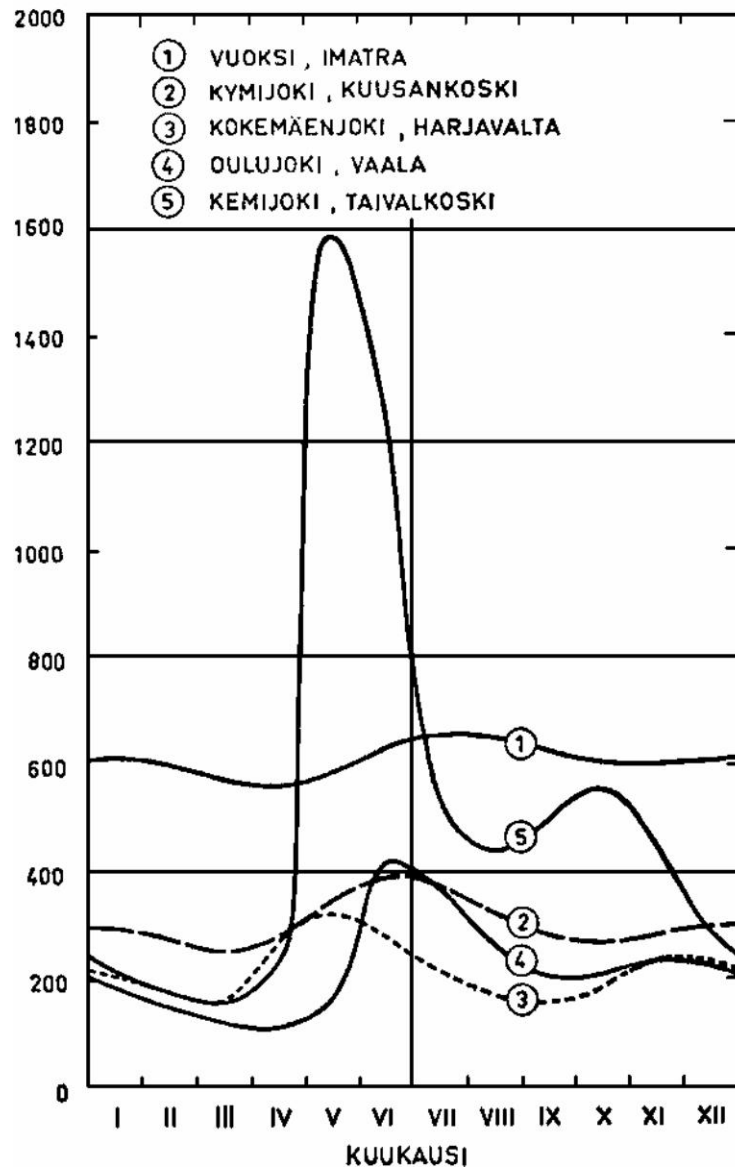
häiriöreserviä on niin paljon, että järjestelmä kestää suuren tuotantoyksikön irtoamisen verkosta ilman että pysyvä taajuuspoikkeama on suurempi kuin 0.5 Hz.

Pohjoismaisessa sähköverkossa kunkin maan kantaverkkoyhtiö hankkii reserviosuutensa parhaimmalla katsomallaan tavalla. Fingrid hankkii osuutensa markkinoilta, johon säätökykyistä kapasiteettia omistavat yhtiöt voivat tarjota resurssinsa. Vesivoima soveltuu erittäin hyvin säätövoimaksi sen ollessa nopeaa, tehokasta ja hyvin säätyvää. Tuntitasolla ja nopeammassa säädössä vesivoima onkin Suomessa ja Pohjoismaissa lähes ainoa vaihtoehto. (Fingrid, 2013) (Oy Vesirakentaja, 2007)

Energiateollisuuden julkaisun (Energiateollisuus, 2012) mukaan Fingrid Oyj ja VTT ovat arvioineet, että Suomen tavoite lisätä uusiutuvaa energiaa aiheuttaa säätövoimaan lisäystarvetta. Tavoite lisätä tuulivoimaa 2500 MW aiheuttaa itsessään 300 – 440 megawatin lisäystarpeen säätövoimaan. Kotimaista vesivoimaa pidetään parhaana säätövoimana ja sen lisärakentamista tukee myös säätökykyisen lauhdutusvoimakapasiteetin väheneminen.

### **2.3 Virtaaman vaihtelu**

Suomessa jokien ja järvien virtaamat voivat vaihdella merkittävästi riippuen vesistöstä. Vuoden aikana sadanta vaihtelee runsaasti kevään, loppusyksyn ja talven ollessa sateisinta aikaa muun osan vuodesta ollessa paljon kuivempaa. Talvella vesi sataa lumena, joka sulaa keväisin aiheuttaen tulvia. Suomen pääjokien purkautumiskäyrät, eli veden virtaaman vaihtelut vuosina 1911 – 1941 ovat esitettyinä kuvassa 2.3.



Kuva 2.3: Suomen pääjokien luonnonmukaiset kuukausittaiset purkautumiskäyrät vuosilta 1911 - 1940. (Hultin & Koskinen, 1975)

Kuten kuvasta näkyy, jokien virtaamisissa on suuria eroja. Vuoksen vesistön suuret vesialtaat tasaavat virtaamaa tehokkaasti, kun taas Kemijoessa esiintyy hyvin suuret vaihtelut.

## 2.4 Kehitysmahdollisuudet

Vesivoimaa on Oy Vesirakentajan (Oy Vesirakentaja, 2007) selvityksen mukaan mahdollista lisätä 2130 MW (Taulukko 2.1), josta suojelemattomien vesistöjen osuus on



663 MW. Kokoluokkiin jaettuna potentiaali jakautuu minivesivoimaan 144 MW, pienvesivoimaan 144 MW ja suurvesivoimaan 375 MW. Tehon mukainen jaottelu on: suurivesivoima nimellisteholtaan yli 10 MW, pienvesivoima 1 - 10 MW ja alle 1 MW:n minivesivoima. Selvitys tehtiin vesivoimalaitosten omistajille suunnatulla kyselyllä ja vastausten määrä kattoi noin 98 % Suomen vesivoimalaitosten tehosta ja energiasta. Kohtuullisesta potentiaalista huolimatta kannattavuudeltaan edullisimmat kohteet on rakennettu tai suojeltu uudelta vesivoimarakentamiselta. Edullisimpia hankkeita ovat tehonnosto voimalaitoksen pääkoneistojen peruskorjauksen yhteydessä ja perkaukset sekä yläveden nosto.

Taulukko 2.1: Suomen vesivoimapotentiaali suojelemattoman ollessa 663 MW ja 2352 GWh/v.

	Teho (MW)	Energia (GWh/v)
Tehonnosto	315	296
Lisäkoneistot	44	29
Perkaukset	5	13
Yläveden nostot	4	14
Ohijuoksutusenergian hyödyntäminen	25	20
Säännöstelykapasiteetin lisääminen	-	7
Suojelemattoman vesistön rakennettavissa oleva kapasiteetti	270	1973
Suojellun vesistön uusi vesivoimapotentiaali	1467	7363
Yhteensä	2130	9715

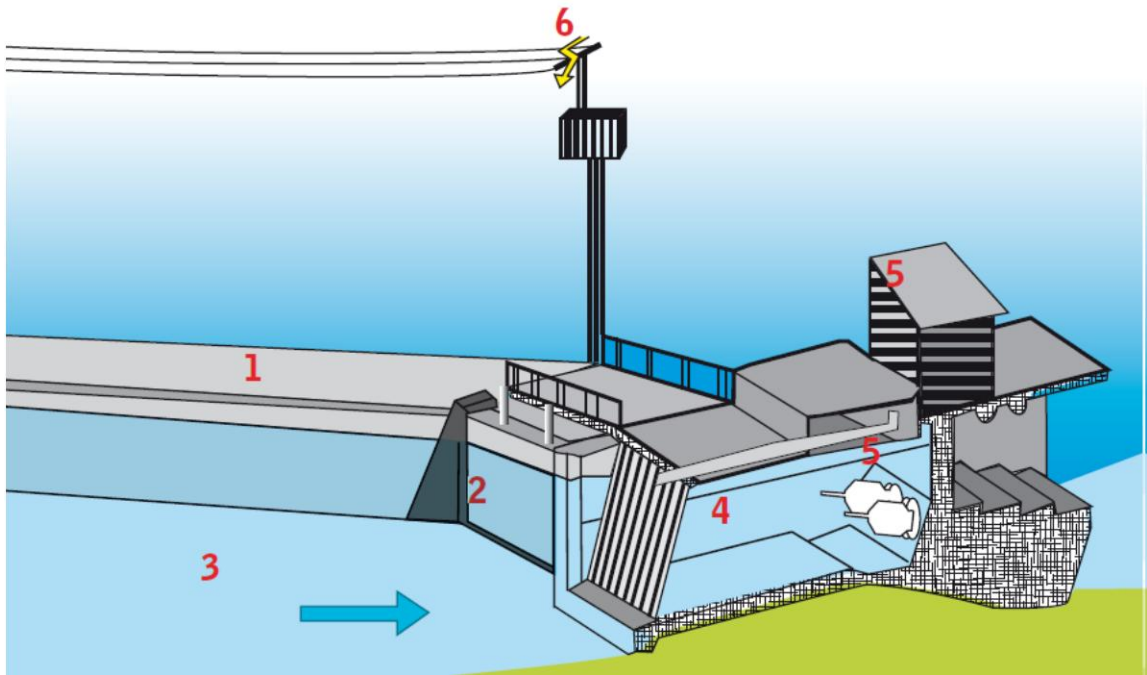
Energiateollisuuden julkaisun mukaan uusiutuvan energian tavoitteen saavuttamiseksi uusiutuvaa energiaa tarvitaan lisätä 500 gigawattituntia vuodessa vuoteen 2020 mennessä. Vuonna 2012 nykyinen vesivoimakapasiteetti oli noin 3190 MW ja sähköntuotanto vuonna 2011 oli 12 300 GWh/v. Vuoteen 2020 mennessä oletettu lisä sähköntuotantoon on 355 GWh/v, joten noin 70 % tavoitteesta on saavutettu. Mutta säätövoiman lisäämiseksi ja tavoitteiden saavuttamiseksi tarvitaan uusia vesivoimalaitoksia.

### 3 VESIVOIMALAITOS

Vesivoimalaitos voidaan jakaa säännöstelyn ja käyttötavan mukaisesti jokivoimalaitokseen, säännöstelyvoimalaitokseen, pumppuvoimalaitokseen tai vuorovesivoimalaitokseen. Jokivoimalaitos on nimensä mukaisesti rakennettu jokeen ja se pystyy hoitamaan vain lyhytaikaissäädön. Säännöstelyvoimalaitos on rakennettu suurehkon vuosisäännöstelyaltaan yhteyteen. Pumppuvoimalaitoksessa turbiinia voidaan käyttää myös pumppuna, jolloin vettä pumpataan ala-altaasta takaisin yläaltaaseen eli padolle. Vuorovesivoimalaitos on jokivoimalaitoksen kaltainen ja sijoitettu voimakkaan vuorovesivaihtelun alueella olevan lahteen rakennetun padon yhteyteen. Pumppu- ja vuorovesivoimalaitoksia ei ole Suomessa yhtäkään käytössä. Jaottelu voidaan tehdä myös rakenteellisen ratkaisun mukaan, putouskorkeuden mukaan tai tehon mukaan. (Ryti, et al., 1975)

Voimalaitokseen kuuluvat putouskorkeuden keskittämisen rakenteet, potentiaalienergian mekaaniseksi energiaksi muuntamiseen tarkoitetut rakenteet ja koneistot, laitteet mekaanisen energian muuntamiseksi sähköksi ja tarvittavat lisärakennukset. Putouskorkeus keskitetään padolla ja siihen kuuluvilla rakenteilla kuten tulva-aukoilla ja ohijuoksutusluukuilla. Patorakenteisiin kuuluu lisäksi käyttökanavat veden johtamista varten, mahdolliset kalatiet ja sillat. Veden energia muutetaan mekaaniseksi turbiinilla ja tähän kuuluvat vesitiet, suoja- ja sulkulaitteet, turbiinin säätäjät ja muut apulaitteet. Mekaaninen energia muunnetaan sähköksi generaattorilla ja sähkölaitteisiin kuuluu lisäksi muuntajat, kytkinlaitteet ja releet. Tarvittaviin lisärakennuksiin kuuluvat mahdolliset asunnot, työrakennukset, varastot sekä korjaamot. (Ryti, et al., 1975)

Yleiskuvassa 3.1 olevat voimalaitosrakenteet ovat: 1. pato, 2. patoon liittyvät rakenneosat, 3. patoallas, 4. vesitiet, 5. koneasema ja 6. muuntamo.



Kuva 3.1: Vesivoimalaitos ja sen rakenteet. (Pienvesivoimayhdistys ry, 2009)

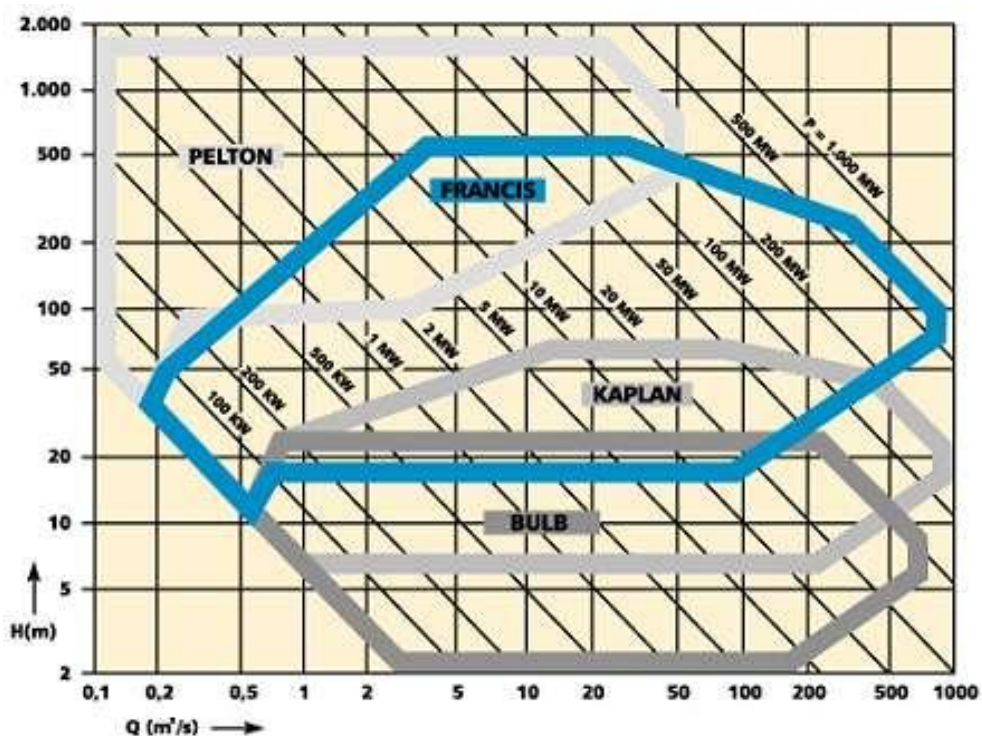
### 3.1 TURBIINIT

Turbiinit jaetaan reaktioturbiineihin (ylipaine) ja aktioturbiineihin (tasapaine). Reaktioturbiinissa osa veden sisältämästä energiasta muutetaan pyörimisliikkeeksi, kun taas aktioturbiinissa vesi suihkutetaan juoksupyörään. Reaktioturbiini eroaa aktioturbiinista siten, että veden tullessa juoksupyörään sillä on liike-energian lisäksi paine-energiaa, kun taas aktioturbiinissa vedellä on vain liike-energia. Turbiinit voidaan jakaa myös sen perusteella virtaako turbiinista tuleva vesi imuputkeen vai suoraan alaveteen – reaktioturbiinissa on imuputki ja aktioturbiinissa vesi valuu alaveteen. (Barn, 1971)

Reaktioturbiineissa vesi jatkaa virtaamista luovutettuaan osan energiasta juoksupyörän pyörimisliikkeeksi, minkä jälkeen se hidastuu imuputkessa. Aktioturbiinissa juoksupyörään suihkutettu vesi menettää osuensa liike-energian ja tippuu poistoaukkoon painovoiman ohjaamana.

Voimalaitoskäyttöön sopivan turbiinin valinta on periaatteessa varsin suoraviivaista kun tiedetään putouskorkeus ja virtaus. Kuva 3.2 esittää eri turbiinityyppien käyttöalueet ja kun tarvittavat arvot tiedetään, voidaan valita sopiva turbiini tarkempaa analyysia varten.

Käytännössä putouskorkeuden ja virtauksen lisäksi tarvitaan tiedot vesistön virtaaman ja korkeuden vaihteluista turbiinin optimoimiseksi. Seuraavaksi työssä esitellään lyhyesti eniten käytössä olevat turbiinit.

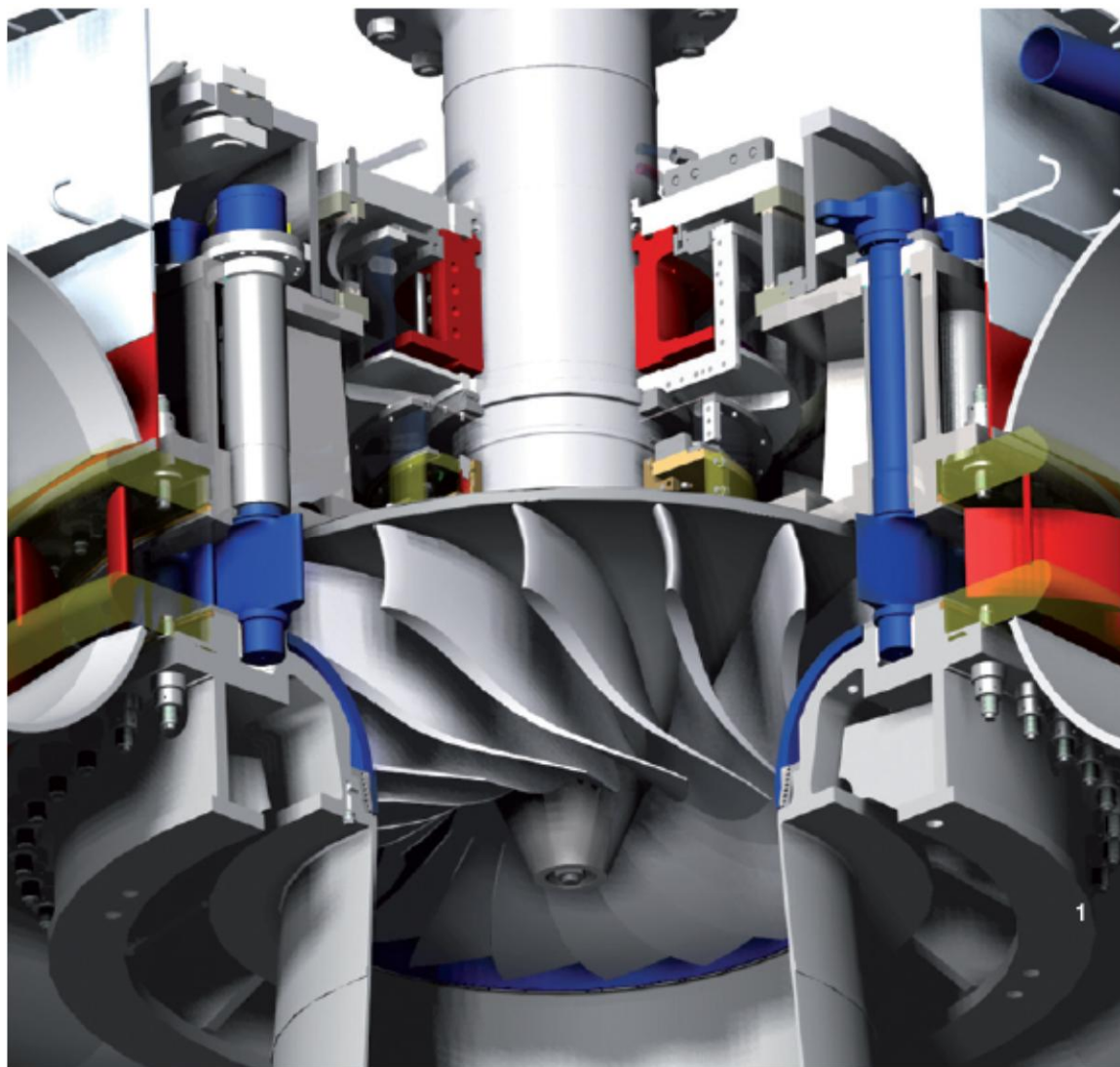


Kuva 3.2: Turbiinin valinta putouskorkeuden ja virtaaman perusteella. Kuvan alkuperäinen lähde Voest Alpine. (Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, 2004)

### 3.1.1 Francis-turbiini

Francis-turbiinin historia juontuu Samuel Dowin patentoimaan vesiturbiiniin, mutta insinööri James Bicheno Francisin tekemät parannukset johtivat hänen nimellään olevaan turbiiniin. Suuret Francis-turbiinit tehdään yleensä pysty akseliseksi ja varustetaan teräslevyistä valmistetulla spiraalipesällä, joka valetaan kokonaan tai osittain betonilla. (Perttula, 2000) Francis-turbiinien ominaisuus on laaja käyttöalue: putouskorkeus 5 – 700 metriä ja tehoalue yltää tuhanteen megawattiin saakka. Francis-turbiinit ovat yksinkertaisia, käyttövarmoja, halpoja ja niitä käytetään Suomen ulkopuolella pumppulaitoksissa sekä turbiinina että pumppuna. (Perttula, 2000)

1900-luvun alkupuolella kun pienvesivoimaloita uusittiin, suurin osa laitoksista varustettiin Tampellan valmistamalla pysty akselillä Francis-turbiinilla. Kuvassa 3.3 Voithin valmistaman Francis-turbiinin 3D-malli.



Kuva 3.3: 3D-malli Voithin valmistamasta Francis-turbiinista. (VOITH, 2013)

Vesi johdetaan yläjuoksulta tulospiraaliin, missä virtaus joutuu lievään pyörreliikkeeseen ja alkaa kiihtyä. Staattorisiivissä virtaus kiihtyy voimakkaaseen pyörimisliikkeeseen ja roottorissa virtaus kiihtyy toisen kerran. Tämän jälkeen roottori poistaa virtauksesta pyörreliikkeen ja muuttaa sen vääntömomentiksi. (Larjola, 2008)

### 3.1.2 Kaplan-turbiini

Kaplan-turbiinissa koneiston rakenne on hyvin samanlainen kuin Francis-turbiinissa johdelaiteineen ja staattorisiipineen, mutta juoksupyörässä virtaus on aksiaalinen. Siten pysty akselisissa malleissa vain juoksupyörä eroaa havaittavasti Francis-turbiinista. Turbiini soveltuu pienestä keskikokoiseen putouskorkeuteen (2 – 70 metriä) ja suurille virtauksille. Juoksupyörä on potkurin muotoinen ja kääntyväsiipinen, mistä syystä Kaplan-turbiini toimii hyvällä hyötysuhteella laajalla vesimäärä- ja putouskorkeusalueella. Tulokanavasta tuleva vesi saatetaan voimakkaaseen pyörimisliikkeeseen staattorisiivissä ja veden nopeus kiihtyy. Lopuksi juoksupyörä muuntaa veden virtauksen mekaaniseksi energiaksi (Larjola, 2008) (Perttula, 2000) (Huhtinen, et al., 2008). Kaplan-turbiinin juoksupyörä valmistajan hallissa kuvassa 3.4.

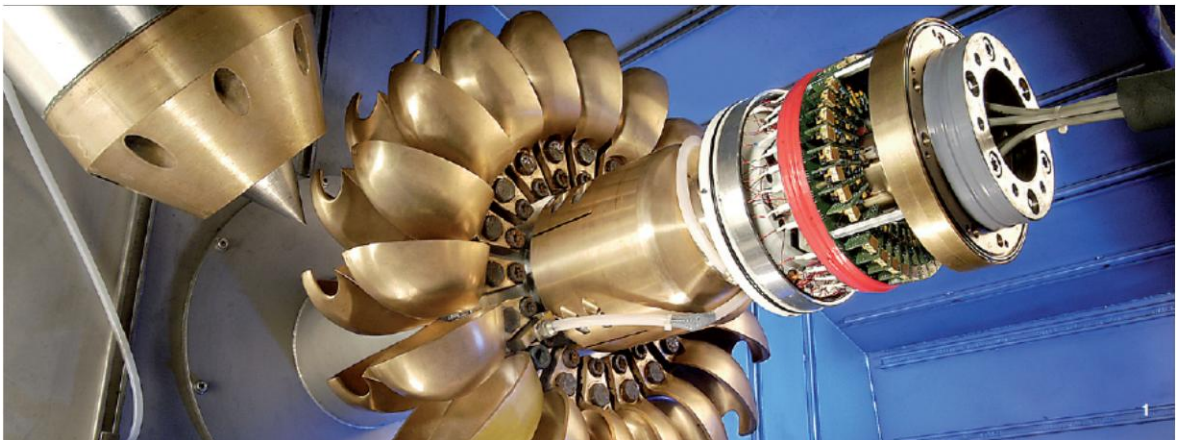


Kuva 3.4: Kaplan-turbiinin juoksupyörä. (VOITH, 2013)

### 3.1.3 Pelton-turbiini

Pelton-turbiinissa vesi johdetaan korkealta yläaltaalta putkea pitkin suihkusuuttimiin. Suihkusuuttimissa kineettiseksi energiaksi muunnettu korkeapaineinen vesi ohjautuu kuppimaisilla siivillä rakennettuun juoksupyörään, jossa virtaus kääntyy lähes tuloisuuntaan. Vaikka osa putouskorkeudesta menetetään veden tippuessa vapaasti alaveteen, suurilla putouskorkeuksilla tämän häviön osuus on vähäinen. Virtausta säädetään suihkusuuttimella, jossa on yleensä neulaventtiili. Sääto tapahtuu ilman häviöitä, mutta turbiinia sillä ei voi pysäyttää nopeasti. Neulaventtiilillä tehty alasajo synnyttää tuloputkeen hydraulisen iskun, mistä syystä pikasulku tehdään roiskelevyllä.

Pelton-turbiini soveltuu korkean putouskorkeuden ja matalan virtaaman vesivoimalaitoksiin. Muun muassa Voith on rakentanut 117 MW:n pelton-turbiinit 1220 metrin putouskorkeudelle. Kuvassa 3.5 Pelton-turbiini yhdellä suuttimella valmiina testaukseen.



Kuva 3.5: Pelton-turbiini testipenkissä. (VOITH, 2013)

Suurella putouskorkeudella veden nopeus nousee yli 100 m/s, jolloin vedessä olevat epäpuhtaudet voivat syövyttää metallia. Silti turbiinin luvataan toimivan runsaasti epäpuhtauksia sisältävässä vedessä. Brittiläinen Gilkes lupaa toimivuuden jopa lietettä sisältävässä vedessä. (Gilkes, 2013)

## 3.2 Generaattori

Generaattoreita kuten sähkömoottoreita on joko tasasähköisenä tai vaihtosähköisenä. Eli ne toimivat joko tasa- tai vaihtovirralla. Vaihtosähkökoneiden toiminta perustuu pyörivään magneettikenttään ja konetta nimitetään epätahti- tai tahtikoneeksi sen mukaan pyöriikö koneen pyöriväosa, eli roottori, tämän kentän kanssa samalla nopeudella vai ei. Kun sähköjohdin liikkuu magneettikentässä, muodostuu sähköä. Liikkuvaan johtimeen indusoituu jännitettä, jonka vahvuus riippuu magneettikentän voimakkuudesta, johtimen pituudesta ja liikenopeudesta. Tätä kutsutaan myös sähkömotoriseksi voimaksi. Vaihtovirtageneraattorissa magneettiset navat ovat roottorissa (kutsutaan myös nimellä ankkuri) ja johtimet staattorissa. Magneettinapojen ollessa roottorissa, kokevat staattorikämmitykset muuttuvan magneettikentän roottorin pyöriessä.

Epätahtikoneet jaetaan epätahtimoottoreihin ja epätahtigeneraattoreihin. Epätahtimoottorit jaetaan kolmeen ryhmään: kolmivaiheiset oikosulkumoottorit, yksivaiheiset oikosulkumoottorit ja liukurengasmootorit. Epätahtigeneraattorit ovat joko verkkomagnetoituja epätahtigeneraattoreita tai kondensaattorimagnetoituja epätahtigeneraattoreita. Epätahtikoneiden roottorit voivat olla oikosulkuroottoreita tai liukurengasroottoreita. Koneiden nimet ovat vastaavasti oikosulkumoottori ja -generaattori tai liukurengasmoottori ja -generaattori. Oikosulkuroottoreiden käämitys on tehty eristämättömistä sauvoista, jotka ovat oikosulkurenkailla liitetty yhteen pakettiin. Liukurengasroottorissa käämityksen vapaat päät on liitetty liukurenkaisiin, joita hankaavat hiiliharjat. (Aura & Tonteri, 1996)

Epätahtigeneraattorit voidaan jakaa magnetoinnin perusteella verkko- tai kondensaattorimagnetoituihin epätahtigeneraattoreihin. Verkosta magnetoinnin ottavat generaattorit eivät pysty syöttämään sähkötehoa jos verkosta häviää jännite. Tällaiset laitteet ovat rakenteeltaan yksinkertaisia, halpoja ja epätahtimoottorista voidaan muuntaa epätahtigeneraattori, joten tällaisia koneita käytetään pienvesivoimalaitoksissa. Epätahtigeneraattoria voidaan käyttää itsenäisesti ilman verkosta saatavaa magnetointia ottamalla magnetoimisvirran kondensaattoreista. Kondensaattorimagnetoitua



epätahtigeneraattoria sanotaan itsemagnetoiduksi, kun taas verkosta magnetoinnin ottavaa sanotaan pakkomagnetoiduksi. (Aura & Tonteri, 1996)

Tahtikoneen staattorin rakenne on samanlainen kuin epätahtikoneessa ja tahtikone rakennetaan samalle napaluvulle kuin epätahtikone, mutta tahtikoneen roottori on rakenteeltaan erilainen. Suurissa vesivoimalaitoksissa generaattoreissa on suuret halkaisijat ja pienet pyörimisnopeudet, mutta ne ovat akselin suunnassa lyhyitä. Konventionaalisten voimalaitosten generaattoreissa on vertailun vuoksi suuret pyörimisnopeudet, pienet halkaisijat ja pituudet akselin suunnassa ovat suuria. (Aura & Tonteri, 1996)

Tahtigeneraattorin pyörimisnopeus  $n$  on alla olevan yhtälön mukainen:

$$n = \frac{f}{p} \quad (3.1)$$

missä

$f$	sähkön taajuus	[Hz]
$p$	generaattorin napapariluku	[-]

Tahtikone, kuten epätahtikone täytyy magnetoida ja tahtikoneeseen on tasavirralla synnyttävä magneettikenttä eli päävuoto. Kun magnetoimisvirta tuodaan pyörivään roottorikämmiin hiiliharjojen ja liukurenkaiden avulla, puhutaan harjallisesta tahtikoneesta. Harjattomassa generaattorissa ei ole nimensä mukaan harjoja, eikä myöskään liukurenkaita. Generaattorin magnetoinnin tekee generaattorin sisällä samalla akselilla sijaitseva vaihtosähkögeneraattori. Magnetointikoneen magnetoimiskäämit ovat staattorissa ja kolmivaihekäämit roottorissa.

Pienvesivoimaloissa ja yleisesti muussakin piensähköntuotannossa tuotantokoneisto on yleisesti taajaman ulkopuolella ilmajohtoisessa verkossa. Maakaapeleihin verrattuna ilmajohtoinen verkko on herkempi häiriöille ja esimerkiksi ukonilman aikaan sähkön katketessa joudutaan voimalaitos ajamaan alas turbiinin ryntäämisen estämiseksi. Sähkökonetta jännitteelliseen verkkoon liittäessä se täytyy tahdistaa verkkoon.

Tahtikoneessa katkaisija liittää koneen verkkoon kun katkaisijan liittimien välinen jännite  $U$  on lähes nolla, mikä tarkoittaa että kytkentävirta on pieni. (Aura & Tonteri, 1996)

Tämän voi tehdä joko automaatiolla tai myös käsin säääten. Lohikosken Myllyllä vieraillessa yrityksen toimitusjohtaja kertoi tarinaa kuinka ennen tahdistus tehtiin. Verkkoon generaattoria liittävä henkilö katsoi vaihtuvista valoista oikean hetken ja painoi kytkintä. Tämä vaatii kytkijältä hermoja ja tarkkaavaisuutta, sillä väärään aikaan kytkettäessä verkko jarruttaa generaattoria turbiinin pyöriessä vakiokierroksella. Nämä erisuuntaiset voimat saattavat vääntää akselin tai jopa katkaista sen.

### **3.3 Automaatio**

Voimalaitokset vaativat jatkuvaa valvontaa ja toimenpiteitä, mitä hallitsemaan tarvitaan ohjausjärjestelmä. Ohjausjärjestelmän tehtävä on ohjata prosessia siten, että toiminnalle asetetut tavoitteet täyttyvät. Pelkän tavoitteiden täyttymisen lisäksi on suotavaa ja vaadittavaakin, että prosessin ohjaus tehdään optimaalisesti. Toiminnan aikana komponentit rasittuvat ja toiminta heikkenee. Tuloksen kannalta pitkään toimiva ja katkoton sähkön tuotanto on parasta liiketoimintaa. Siksi kunnossapitotoimenpiteet ja uudistukset ovat välttämättömiä. Kunnossapidon tarpeisiin on kehitetty mittaus- ja ohjaustekniikkaa, mutta automatisointi on vielä kehitysvaiheessa. Perinteisesti tuotanto eli käyttö ja kunnossapito on erotettu toisistaan, mutta kummankin tavoitteena on tuotannon parantaminen. Tuotantojärjestelmään kuuluvia osajärjestelmiä on hyvin pitkälle automatisoitu, joten ihmisen tekemä työ on vähentynyt ja helpottunutkin. (Joronen, et al., 2007)

Voimalaitosprosessi sisältää useita prosessiin ja prosessin kanssa vuorovaikutuksessa olevia säätöjä, mistä rakentuu monimutkainen kokonaisuus. Voimalaitoksen ylös- ja alasajon tulee olla riittävän nopeaa ja tehoa tulee pystyä muuttamaan suhteellisen nopeasti. Automaation kannalta voimalaitos on suhteellisen nopea prosessi, lisäksi automaatiolta vaaditaan vikasietoisuutta ja prosessia on voitava hallita vähäisellä miehityksellä tai kaukokäytöllä. Voimalaitosautomaatio toteutetaan yleensä hankkimalla pääautomaatiojärjestelmä, jolla toteutetaan suurin osa valvonnasta, ohjauksesta ja säädöstä.

Pääautomaatiojärjestelmään liitetään ainakin pääprosessin mittaukset, ohjaukset sekä säädöt. Lisäksi osaprosessien ja laitteistojen ohjausjärjestelmät liitetään pääautomaatiojärjestelmään, jotta niitä voidaan ohjata päävalvomosta pääautomaatiojärjestelmän kautta. Sivu- ja apuprosessit voidaan myös liittää pääautomaatiojärjestelmään tai niitä hallitaan vaihtoehtoisesti omista järjestelmistään. (Joronen, et al., 2007)

Automaation tehtävä pienvesivoimalaitoksessa on muun muassa säätää turbiinia. Generaattorin kytkeytyessä verkosta taajuussäädön tulee huolehtia siitä että turbiini ei ryntää ja kuorman pudotuksen aikana taajuus ei saa ylittää maksimiarvoa ja taajuus pitää saavuttaa ilman värähtelyä. Generaattori voi toimia myös saarekekäytössä eli syöttämällä virtaa pieneen, valtakunnanverkosta eristettyyn, omaan verkkoon. Saarekekäytössä verkon taajuus riippuu generaattorin pyörimisnopeudesta (yhtälö 3.1). Automaatio myös säätää juoksupyörän siivistöä ja johtopyörän siipiä parhaaseen mahdollisen tehon saamiseksi jos turbiini on täyssäädettävä. Potkuriturbiinit ovat yleensä puolissäätäviä, joten automaatio säätää säädettävät siivet optimaaliseen asentoon.

## 4 LOHIKOSKEN MYLLY

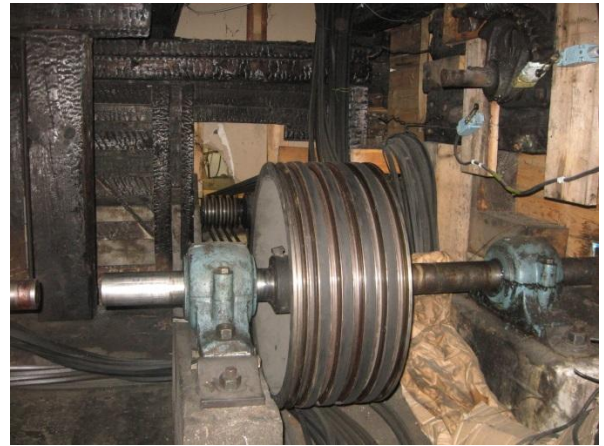
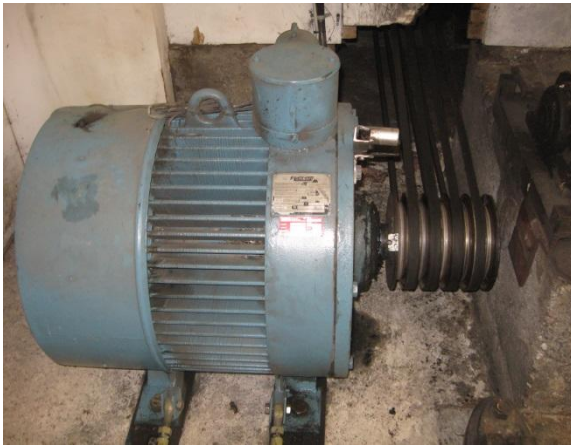
Lohikosken Mylly Oy toimii Lohilahdella tuottaen sähköä pääasiassa Lohikosken Mylly Caravanille. Ylimenevä sähkö myydään Suur-Savon Sähkölle. Nyt paikalla sijaitsee 100-vuotias Tampellan valmistama Francis-turbiini. Vaaka-akselinen turbiini on kytketty kiilahihnalla Strömbergin nimelisteholtaan 60 kilowattiseen epätahtigeneraattoriin. Laitos tuottaa keskimäärin 360 000 kilowattituntia vuodessa ja on toiminut luotettavasti. Esimerkiksi vuonna 2012 turbiini oli pysähdyksissä vain neljä päivää. Voimalaitoksella tapahtui noin kymmenen vuotta sitten tulipalo, jolloin vanha generaattori paloi. Tämän tilalle hankittiin käytetty epätahtimoottori, joka muunnettiin toimimaan generaattorina. Tällä paikalla on pitkä historia myllynä ja sahalaitoksena. Kuulemani mukaan 1500-luvulla tässä samalla paikalla oli Mikkelin läänin suurin tai toiseksi suurin sahalaitos. Ensimmäistä generaattoria hankittaessa valtakunnassa ei ollut edes sähköverkkoa, joten sellainen rakennettiin Lohikoskelle itse. Tällöin generaattori syötti verkkoon tasavirtaa ja sähkö käytettiin valaistukseen. On ymmärrettävää, että uusintaa tehdessä historia ja vanha mylly laitteistoinen halutaan säilyttää. Turbiinikammio ja puinen tuloputki halutaan myös säilyttää. Kuvissa 4.1, 4.2, 4.3 ja 4.4 on näkyvissä myllyrakennuksen yleiskuva, tärkeimmät komponentit ja tämän hetkinen tila.



Kuva 4.1: Myllyrakennus ja kiskot jyvien kuljetusta varten.

(a)

(b)

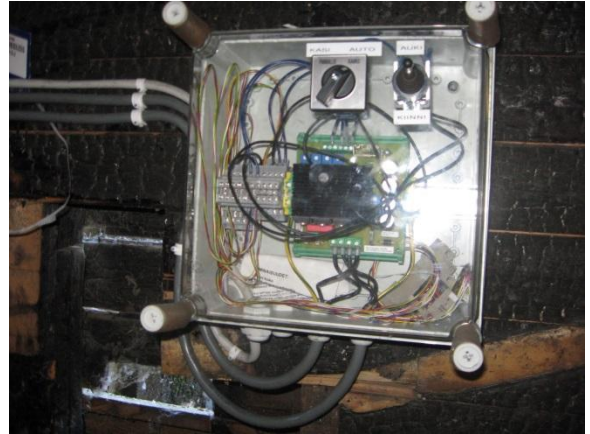


Kuva 4.2: Voimansiirto voimalaitoksessa: (a) Generaattori. (b) Turbiinin akseli, laakeripukit ja kiilapyörä.

(a)



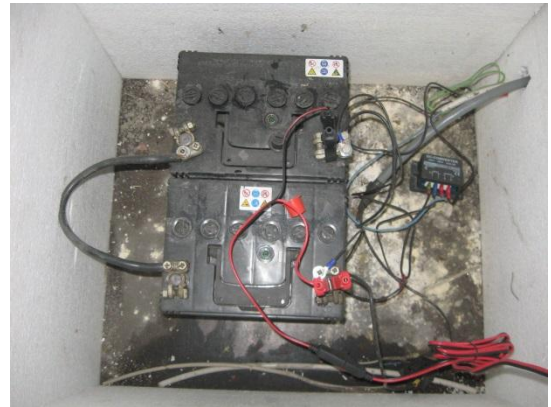
(b)



(c)



(d)



Kuva 4.3: Voimalaitoksen sähköistys. (a) Manuaalinen ja sähköinen turbiinin säätö. (b) Säädön sähkötekniikka. (c) Sähkömittari. (d) Akusto varavirtana turbiinin säätöä varten.

(a)

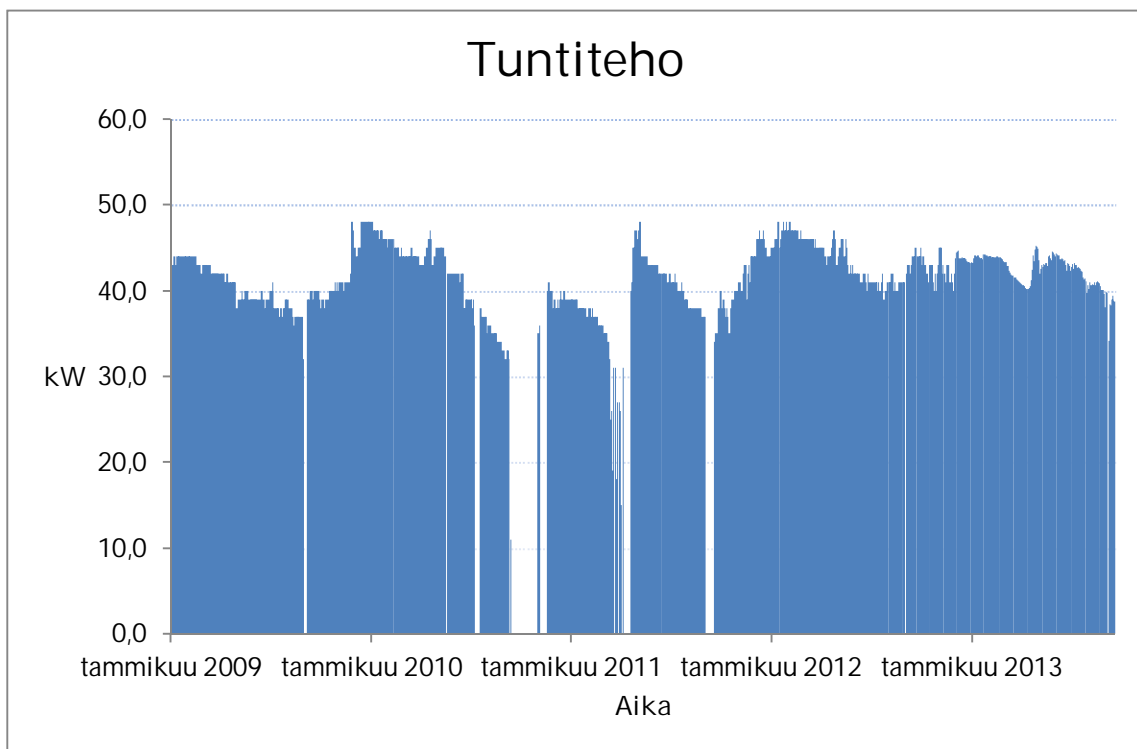


(b)



Kuva 4.4: Voimalaitoksen vesitiet. (a) Tuloputki. (b) Imuputki.

Suur-Savon sähkön toimittamasta tuntitehomittauksesta näkee kuinka paljon laitoksen tuottaman sähkön määrä on muuttunut ajan kuluessa. Kuten kuvasta 4.5 näkyy, laitoksen tehon tuotto noudattaa kaavaa, missä alkuvuodesta tuotto on suurinta, kesällä sähköntuotto vähenee selvästi ja syksyn tullen sähkö tuotetaan taas enemmän. Keväällä lumen ja jään sulaminen lisää vesistöihin valuvan veden määrää huomattavasti ja nostaa veden korkeutta. Kaikkea tätä potentiaalia ei voida kuitenkaan käyttää hyödyksi vaan osa joudutaan ohjuoksuttamaan. Toinen pullonkaula on alakanava, jonka vedenpinnankorkeus nousee kanavan jarruttaessa veden kulkua. Tästä seuraa imuputken vedenpinnan nousu, joka johtaa putouskorkeuden laskuun. Näin ollen täyttä tehoa ei saada vaikka vettä riittäisi.



Kuva 4.5: Lohikosken myllyn tuottama sähkö kilowatteina vuodesta 2009 vuoteen 2013.



## **5 MITOITUSARVOJEN SELVITYS**

Työn tarkoitus on selvittää uuden turbiinin ja generaattorin uusinnan kannattavuus. Valmistajat tarvitsevat laitteiston mitoitusta varten virtaaman vaihtelun eli pysyvyyskäyrän ja vedenkorkeuden vaihtelun. Voimalaitosratkaisua arvioitaessa laitostoimittajilla on tiedot Suomen vesivoimapotentialista. Nämä tiedot perustuvat useimmiten vesihallituksen julkaisemaan Koskiluetteloon, jota kutsutaan myös nimellä Koski-inventointi. Lohijärvi on koski-inventoinnissa ja saatavilla ovat tiedot putouskorkeudesta, valuma-alueesta ja järvisyydestä. Voimalaitoksella työskentelevien henkilöiden mukaan putouskorkeus eroaa huomattavasti Koski-inventoinnin arvosta ja kun virtaama tietoja ei ole ne täytyy selvittää. Ympäristökeskuksella ei ole mitattuja tietoja, joten työ alkoi selvittämällä miten arvot voidaan mitata.

### **5.1 Mittaaminen**

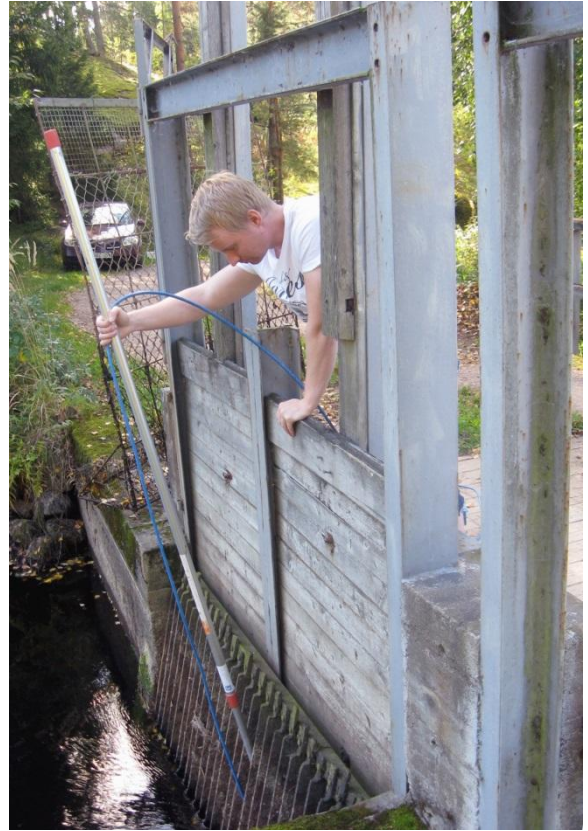
Vedenkorkeutta ja virtaamaa ei ole koskaan mitattu, mutta Ympäristökeskus toimitti simuloitua arvoa Lohijärvestä ja mitatut Pihlajavedestä. Voimalaitoksen ympäristöstä kävin syyskuun alussa mittaamassa vedenpinnan korkeuseron, virtaaman ja tuloputken pituuden. Korkeuseron ja tilavuusvirran mittauksessa käytin Leican TPS1200 robottitakymetriä ja tilavuusvirran mittaamiseen Labkotec Oy:n Nivus PCM 4 mittaria POA sensorilla.

Etäisyyden ja korkeuseron mittaaminen robottitakymetrillä on hyvin suoraviivaista sen näyttäessä pisteistä koordinaatit, etäisyydet ja korkeuserot. Veden korkeuseron saa yksinkertaisesti mittaamalla ylä- ja alaveden korkeusmitan sekä vähentämällä arvon toisesta. Eli korkeusero vähennetään toisesta korkeuserosta. Tuloputken pituutta tarvitaan fluidin virtausnopeuden muutoksen laskentaan sen saavuttaessa turbiinin. Taaskin mittaus oli hyvin yksinkertaista: mitta putken loppupäästä ja siitä vähennetään laitteen etäisyys putken alkupäästä. Kuvassa 5.1 näkyy mittalaitteiden asennus ja toiminta.

(a)



(b)



(c)

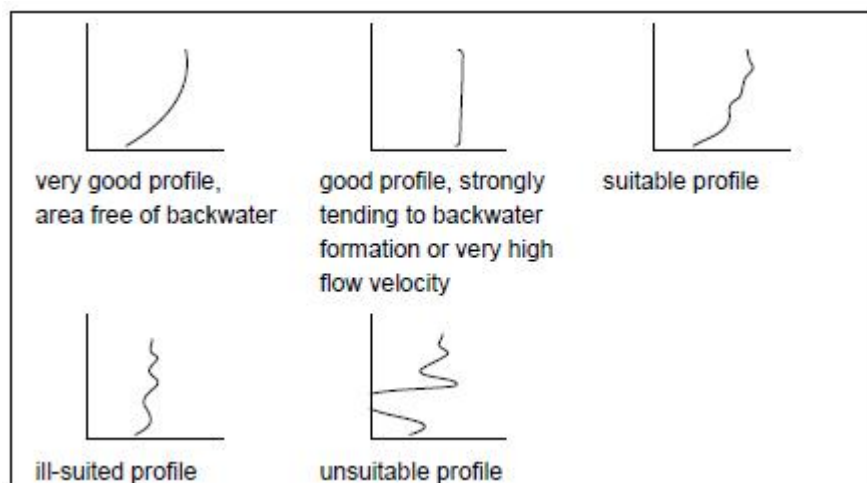


Kuva 5.1: Mittauslaitteiden asennus. (a) Takymetri mittausvalmiina. (b) Anturin asennus väljän välistä. (c) Nivus PCM 4 mittalaite mittaamassa.

## 5.2 Virtaama ja virtausnopeus

Virtaaman, vedenkorkeuden muutoksen ja virtausnopeuden pystyi helposti mittaamaan Nivus PCM 4:lla. Akun kiinnityksen jälkeen anturi kiinni laitteeseen, anturi kiinni teleskooppiin, anturi virtaukseen ja PCM 4:n virrat päälle. PCM 4 kysyy käynnistäessä peruskysymysten jälkeen mitä mitataan (puhdas vesi, likainen vesi vai jätevesi), kanavan geometria ja mitä yksiköitä käytetään (SI vai anglosaksiset). Kanavan geometria voidaan määrittellä hyvin monipuolisesti ja kunhan poikkipinta-ala ja muoto ovat selvillä, laite laskee mittausdatan. Jos mittausaika on lyhyt, laite kannattaa määrittää tallentamaan mittaus lyhyessä syklistä, jotta dataa tulee riittävästi analysointia varten. Oletuksena laite tallentaa kahden minuutin välein sen hetkisen arvon, mikä lyhyessä mittauksessa ei ole riittävä.

Mittauksen aikana voi tarkastella virtauksen profiilia kuvan 5.2 mukaan. Riippuen virtausolosuhteista virtausnopeus voi vaihdella hyvinkin paljon, mikä vaikeuttaa luotettavan mittauksen tekemistä. PCM 4 näyttää profiilin, joka on hyvä jos käyrässä ei ole paljon vaihtelua ja se on suhteellisen suora. Mutta jos virtauksessa on paljon heittoa eli käyrä mutkittelee eikä pysy stabiilina, jokin häiritsee virtausta tai virtaus ei ole rauhoittunut.



Kuva 5.2: Virtausprofiilien laatuja PCM 4:lla. Kolme ylintä profiilia ovat hyvät ja kaksi alinta ovat huonot.

(Nivus, 2011)

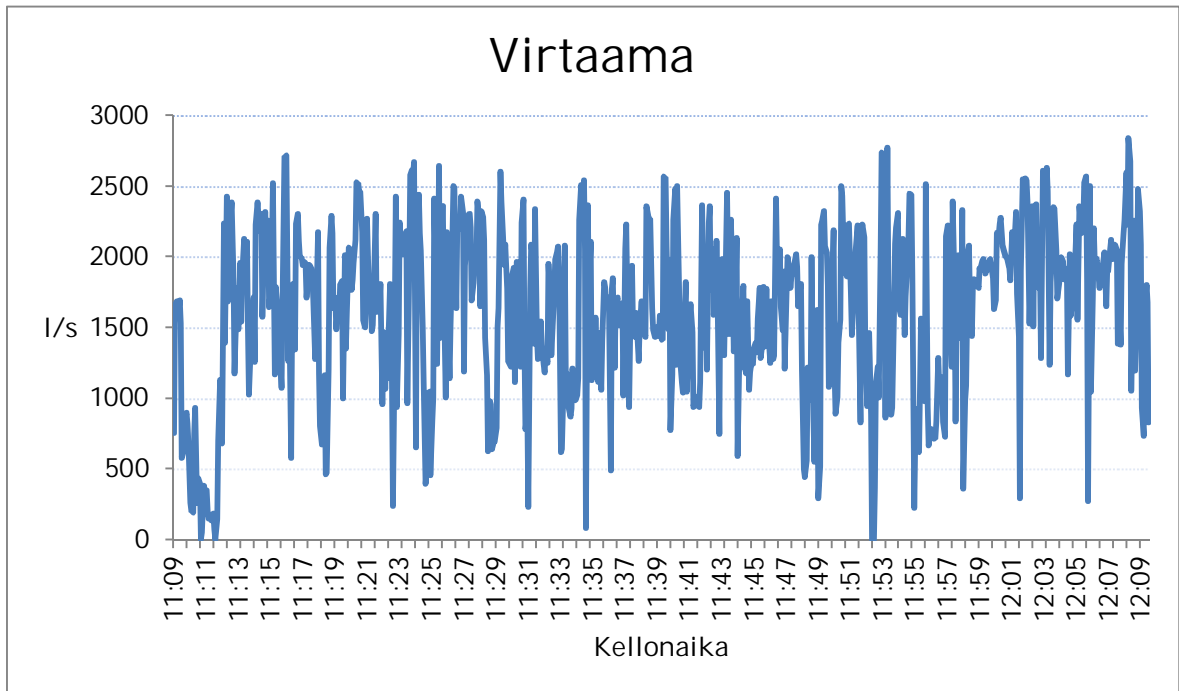
Kanavan muodosta riippuu mikä on hyvä paikka anturin sijoittamiselle. Häiriintynyt ja turbulenttinen virtaus tekee vaikeaksi, ellei mahdottomaksi luotettavan mittaamisen. Nivus kertoo ohjeissaan yksityiskohtaisesti kuinka anturi tulisi sijoittaa (Nivus, 2012). Tässä mittauksessa anturi tuli asettaa voimakkaasti häiriintyneeseen virtaukseen ja kanavan pohjalla oleva irtoaines saattoi haitata mittausta. Yläjuoksulta laskeva vesi kulkeutuu padolle suorakulmion muotoiseen tilaan väljän kautta, jonka jälkeen se ohjautuu halkaisijaltaan 1.2 metriseen tuloputkeen. Ainut paikka anturille oli tähän suorakulmion muotoiseen tilaan heti väljän jälkeen.

### 5.2.1 Mittauksen tulos

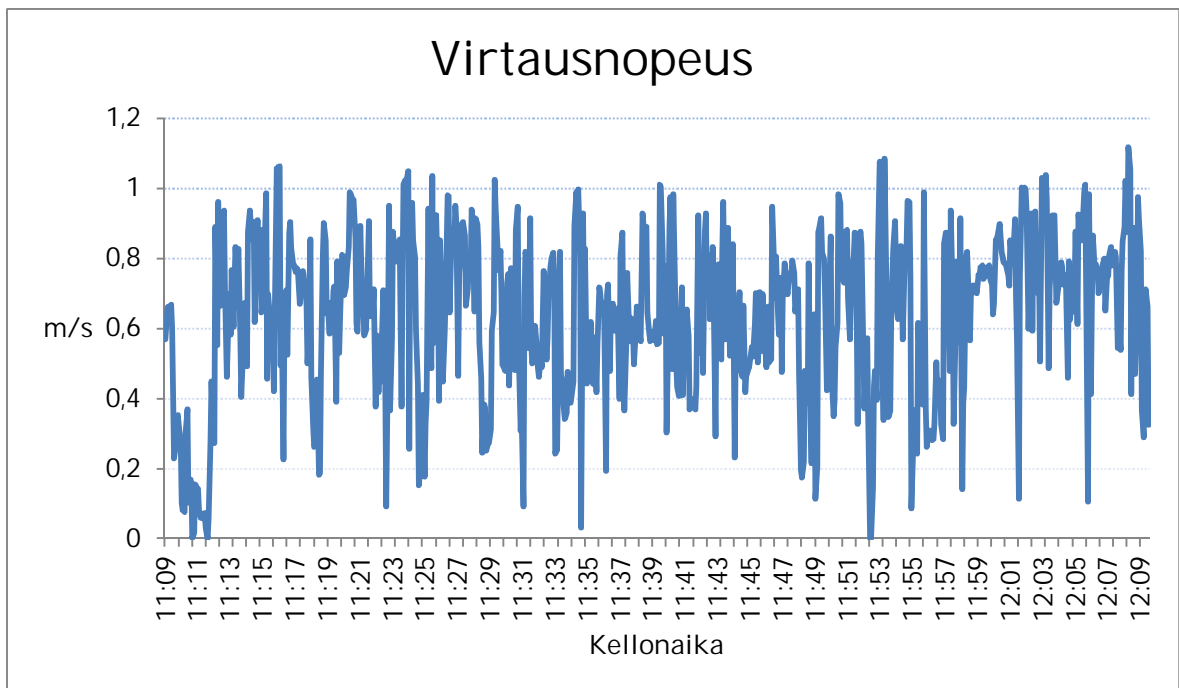
Jo mittausta aloittaessa kävi selväksi, että saadut arvot tulevat olemaan kaikkea muuta kuin stabiileja. Anturia teleskoopilla laittaessa virtauksen häiriöllisyys tuntui selvästi. Virtauksen ahtautuminen kapeaan suorakulmaiseen kanavaan aiheutti voimakasta turbulencia. Virtauksen häiriöllisyys näkyy hyvin mittauksessa ja hajontaa on runsaasti. Kuvissa 5.3 ja 5.4 ovat mitattu virtaama ja virtausnopeus. Käyrät ovat hyvin samanlaiset ja niistä näkee kuinka paljon mitatut arvot vaihtelevat. Jotta virtaaman pystyy mittaamaan, mittalaite tarvitsee tiedon veden korkeudesta. Nivus kertoo dokumentissaan, kuinka virtaama lasketaan (yhtälö (5.1)). Kun tiedetään geometria, saadaan pinta-ala, jonka läpi virtaus kulkee. Tässä tapauksessa siis tiedettiin jo suorakulmion pituus ja korkeus saadaan mittalaitteen antamasta vedenkorkeudesta. Veden korkeuden vaihtelu mittaushetkellä on siis hyvin pientä, kuten kuvasta 5.5 voidaan nähdä.

$$Q = v_{average}A \quad (5.1)$$

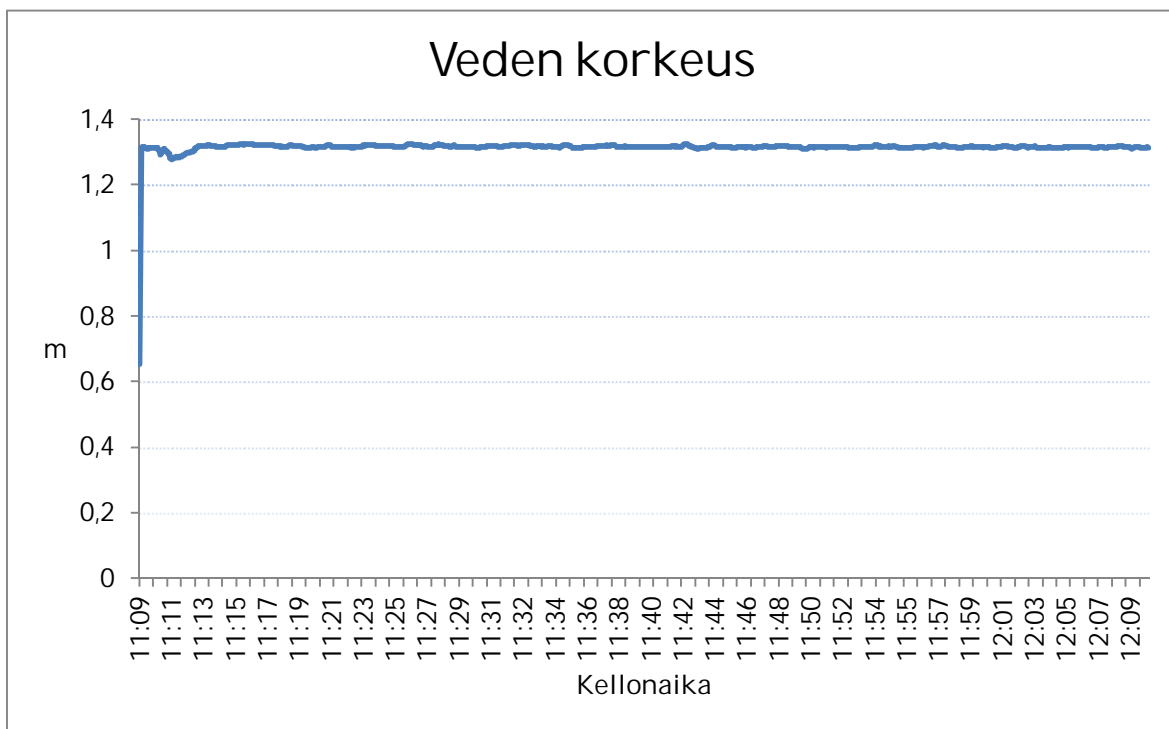
Kuvaajista nähdään, että mittauksen ensimmäiset 4 tai 3 minuuttia on häiriötä ja sitä ei voida käyttää.



Kuva 5.3: Päivän 11.9.2013 mittauksen tulos virtaaman osalta.



Kuva 5.4: Mitattu virtausnopeus.



Kuva 5.5: Mitattu vedenkorkeus.

### 5.2.2 Suodatetut ja keskiarvoistetut arvot

Jotta mitattuja arvoja voidaan käyttää, niitä täytyy käsitellä. Voimakkaasti häiriöllinen virtaus vaikuttaa mittausdataan ja laitteisto tuo itsessään kohinaa. Mittauksessa oleva häiriö voi olla kohinaa, joka on komponenttien spontaania flukтуаatiota tai sähkömagneettista häiriötä. Sähkömagneettisen häiriön voi aiheuttaa ukkonen, atmosfäärinen kohina, auringon magneettiset myrskyt, sähköverkko, radio taikka esimerkiksi sähkökytkimien impulssit. Signaalin, eli mitatun datan ja kohinan suhteen voimakkuutta kuvaa termi signaalikohinasuhde. Signaalikohinasuhde  $S/N$  tai  $SNR$  on esitetty yhtälössä (5.2). (Lindh, 2012)

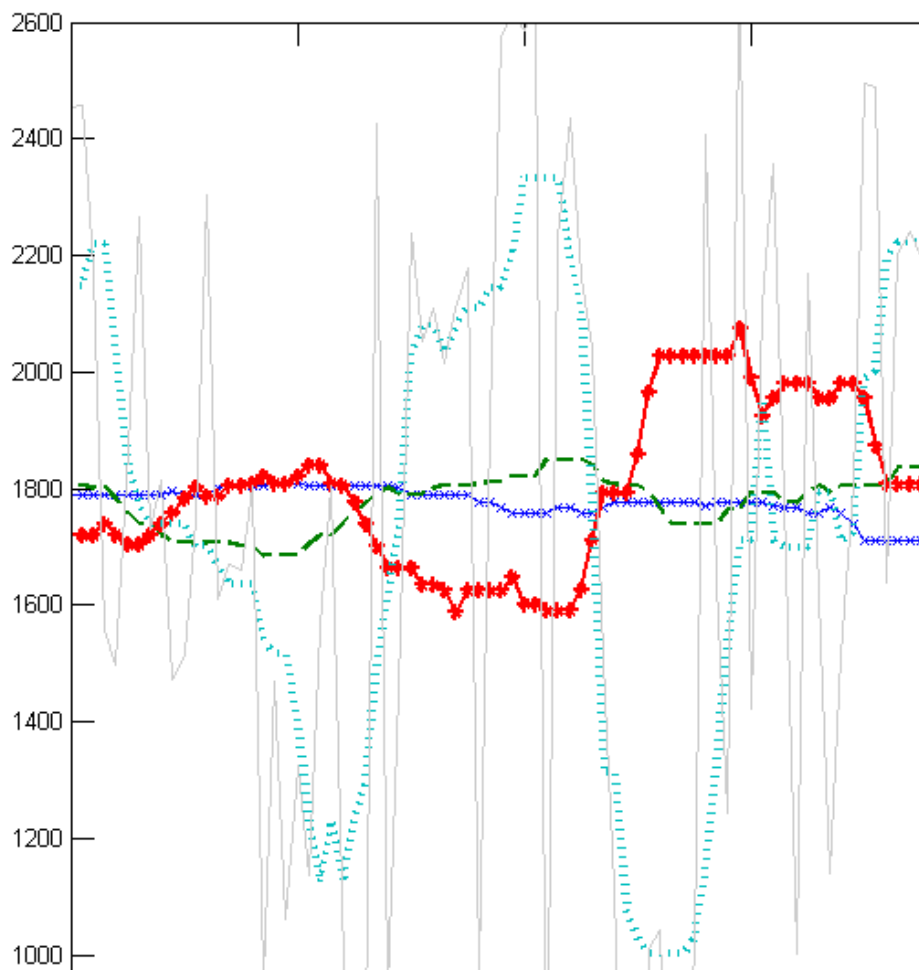
$$S/N = SNR = \frac{A_S^2}{A_N^2} = \frac{P_S}{P_N} \quad (5.2)$$

missä

$A$	RMS amplitudi	[-]
$P$	keskimääräinen teho	[-]
$N$	kohina	

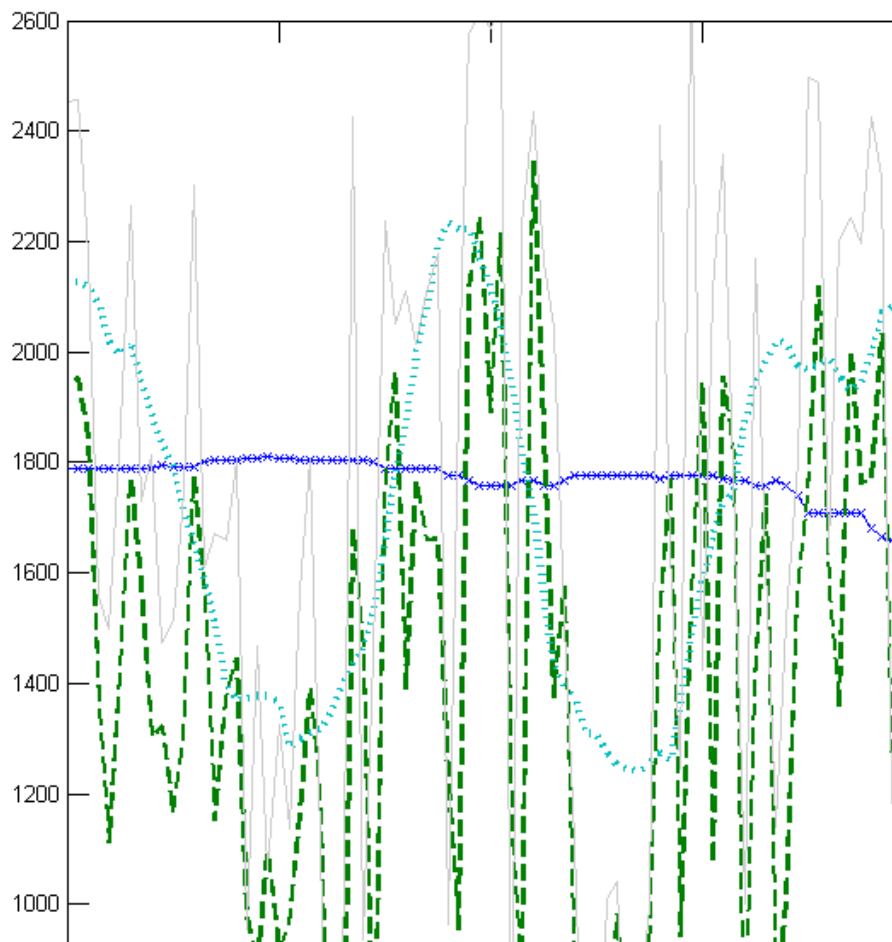
## S signaali

Tässä mittauksessa kohinan ei oleteta aiheutuvan mistään muusta kuin itse laitteesta. Toisaalta kohinan lähteellä ei ole väliä, koska tarkkuus johon pyritään, ei riipu kohinan määrästä. Lisäksi häiriölähteitä, muita kuin edellä mainitut, ei voi poistaa vaan vaikutuksia pyritään estämään esimerkiksi maadoituksella, erotuksella tai optisella siirrolla. Itse laitteeseen ei voi tehdä muutoksia eikä kaapelointiinkaan, joten tyydytään mitatun signaalin suodattamiseen. Lindhin luentomateriaalissa häiriöiden torjuntaan esitetään eri suodatustapoja kuten keskiarvotus, mediaanisuodatus, kaistan rajoitus, alipäästö, ylipäästö, kaistanpäästö, kaistanestosuodatus tai liukuvan keskiarvon suodatin. Matlab tarjoaa signaalin suodatukseen valmiina eri suotimia, joista muutaman vaikutus on näkyvillä kuvissa 5.6 ja 5.7.



Kuva 5.6: Voimakkaasti rajattu kuva 1D-mediaani suodatuksesta eri otosarvoilla aikaskaalan ollessa 25 minuuttia.

Kuvassa 5.6 Matlab-ohjelman medfilt1-suodatus eri otosarvoilla. Sininen on 150 näytteen suodatus, vihreä 100 näytteen suodatus, punainen 50 näytteen suodatus, syaani 10 näytteen suodatus ja mittausdata harmaana. 150 näytettä näyttäisi toimivan hyvin ja lopputuloksena käyrä noudattaa hyvin mittauksen trendiä maksimi- ja minimiarvojen suodattuessa hyvin pois. Ainoastaan alussa ja lopussa käyrä pyrkii tippumaan, mutta niihin mittaus loppuukin. Kuvassa 5.7 sinisellä medfilt1 150 näytteellä, sosfilt vihreänä, syaanina Savitsky-Golay suodatus, harmaana alkuperäinen data ja kuvassa näkymättömissä punaisena fftfilt suodatuksella.

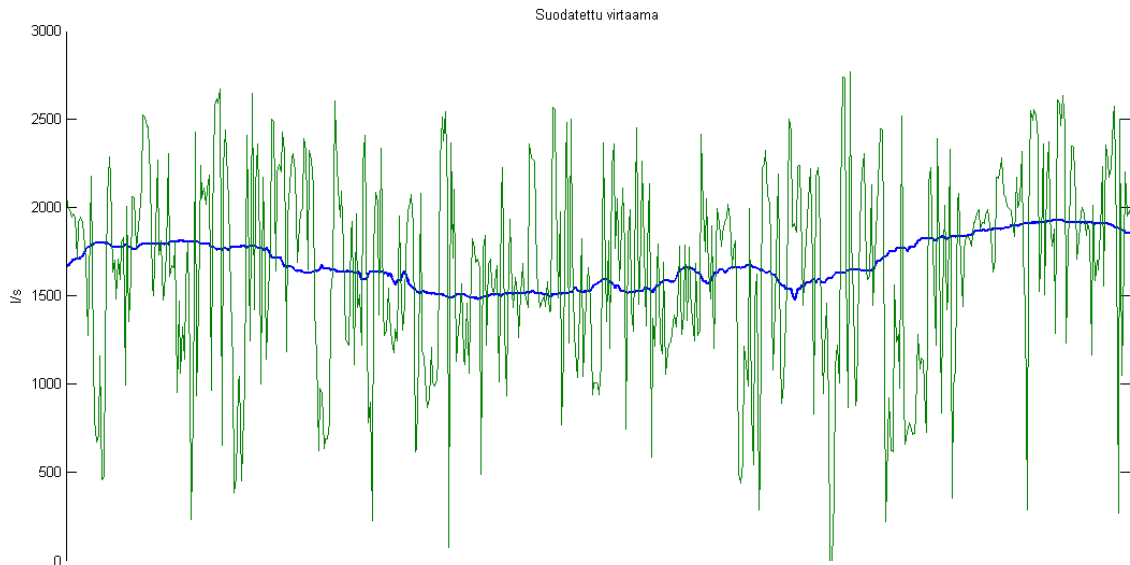


Kuva 5.7: Mittausdatan suodatus eri suotimin aikaskaalan ollessa 25 minuuttia.

Kuvasta 5.7 nähdään, että medfilt1-suodatus toimii parhaiten 150 näytteellä, joten sillä data keskiarvostettiin. Medfilt1 suodatus on 1D mediaani suodatus, sgolayfilt käyttää Savitzky-Golay FIR suodatusta, sosfilt käyttää toisen kertaluvun IIR digitaalista suodatusta ja fftfilt



on Fast-Fourier perustainen muunnos FIR suodatuksessa käyttäen *overlap-add* menetelmää. Virtaus suodatettiin ja leikattiin, jonka jälkeen virtaaman keskiarvoksi tuli 1646 litraa sekunnissa ja mediaaniksi 1512 litraa sekunnissa. Koska myös virtausnopeuden mittausta oli voimakkaasti häiriöllinen, sekin käsiteltiin samoin. Suodatettu ja leikattu virtaus on näkyvillä kuvassa 5.8

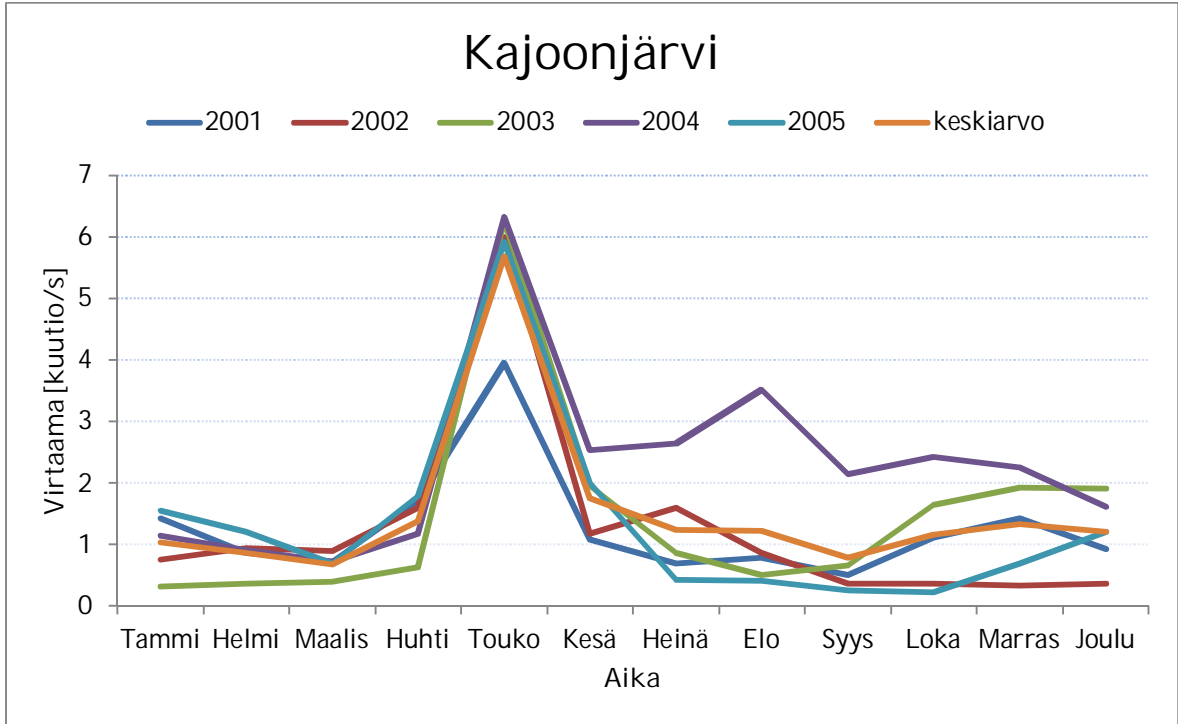


Kuva 5.8: Virtaama suodatuksen ja leikkaamisen jälkeen.

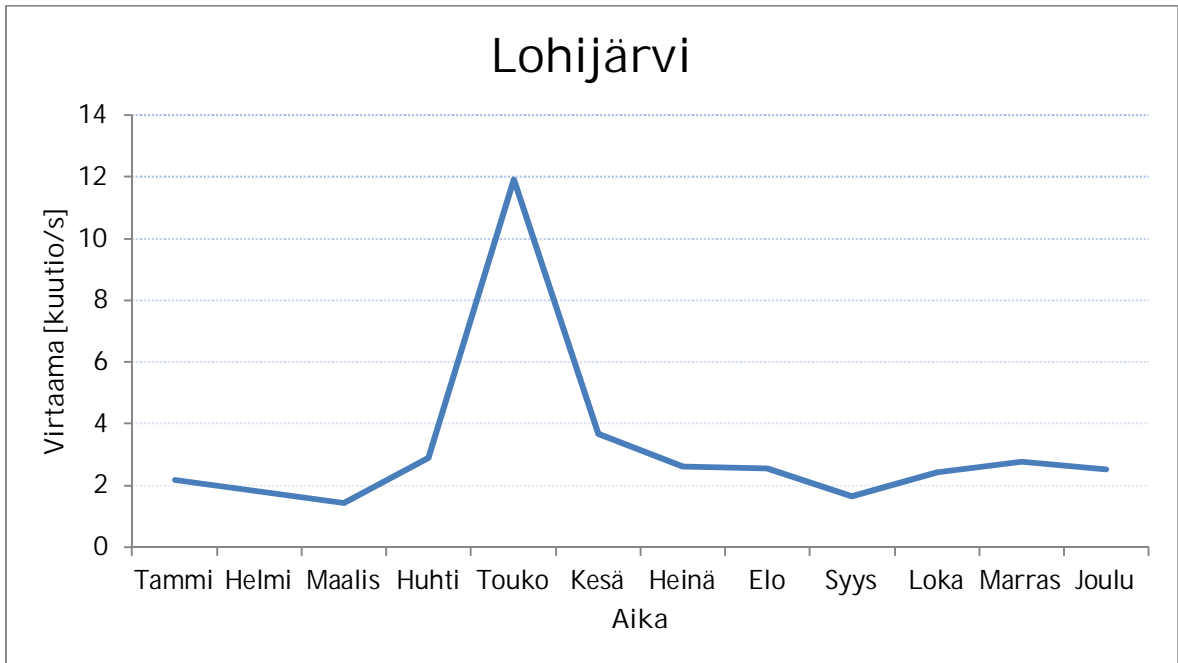
### 5.3 Pysyvyyskäyrä

Koska virtaamaa ei ole mitattu se selvitetiin suhteuttamalla laskevan vesistön, Lohijärven, mitattuja arvoja samanlaisen vesistön mitattuihin arvoihin. Vertailuun haettiin siis valuma-alueeltaan ja järvisyydeltään samankaltaista järveä. Lohijärven valuma-alue on  $140 \text{ km}^2$  ja järvisyys 14 %. Alle sadan kilometrin säteellä ei löytynyt yhtään sopivaa: jos valuma-alue oli samaa luokkaa tai kertaluokkaa suurempi, niin järvisyys oli 10 prosenttiyksikköä liian suuri tai pieni. Kajaanjärvi läheltä Juukaa täyttää vaatimukset: valuma-alue  $125 \text{ km}^2$  ja järvisyys 13.5 % (Korhonen, 2007). Syyskuun mitattu virtaama siis mitoitettiin Kajaanjärven 5 vuoden keskiarvon mukaan. Lopputuloksena Lohijärven virtaama on kuvassa 5.10 ja Kajaanjärven virtaamat keskiarvon kanssa kuvassa 5.9. Suurin epävarmuuden aihe liittyy toukokuun virtaamapiikkiin, joka on vesistökohtainen eikä ole

varmuutta esiintyykö tämä kevään sulamisvesien aiheuttama piikki Lohijärvässä tähän aikaan ja näin suurena.



Kuva 5.9: Kajoonjärven virtaama kuukausittain vuosina 2001 - 2005 sekä keskiarvo.



Kuva 5.10: Lohijärven kuukausittainen virtaama suhteutettuna Kajoonjärven kuukausittaisen virtaaman keskiarvoon.

## 6 TEOREETTINEN MALLI

Turbiinin tuottama teho on suoraan verrannollinen putouskorkeuteen ja virtamaan. Turbiinin ominaisuuksista riippuu miten nämä kaksi ominaisuutta otetaan huomioon. Pelton-turbiinissa veden putouskorkeuden aiheuttama hydrostaattinen paine muutetaan liike-energiaksi suuttimissa. Jotta riittävä liike-energia saadaan, täytyy putouskorkeuden olla suuri, mutta maltillinen virtaama riittää. Putouskorkeuden laskiessa Francis-turbiini tulee käyttökelpoiseksi. (Douglas, et al., 1995)

Kaplan-turbiinissa veden potentiaalienergia muutetaan kineettiseksi energiaksi kiihdyttämällä virtaus kahdesti: ensin staattorissa ja sen jälkeen roottorissa. Roottori poistaa virtauksesta pyörreliikkeen ja muuntaa sen vääntömomentiksi. Oikein toimivan turbiinin staattorissa eli johtosiivissä absoluuttinen nopeus suurenee, kun taas roottorissa absoluuttinen nopeus pienenee ja suhteellinen nopeus suurenee.

### 6.1 Kanavan virtaushäviöiden laskenta

Ennen kuin vesi saapuu turbiinille, se on kulkeutunut vesistöstä padolle ja avointa tai suljettua vesitietä pitkin spiraaliin tai putkeen. Virtaus kohtaa matkalla useita erilaisia häviöitä kuten muun muassa välppähäviö, virtauksen supistuma, venttiilien muotovastus. Osa näistä aiheuttaa vain pientä tai minimaalista häviötä, eikä niitä työssä lasketa. Tämän työn ulkopuolelle jää kavitoinnin ja imuputken tarkastelu. Arttu Reunanen on diplomityössään ”Vesivoimalaitoksen imuputken optimointi suunnittelupisteen ulkopuolella” esitellyt ja käsitellyt aihetta kattavasti (Reunanen, 1998).

#### 6.1.1 Virtauksen supistuma

Virtauksen kulkiessa kanavasta tuloputkeen geometria muuttuu suorakaiteesta ympyrään ja virtaus kuristuu. Tietoa ei ole kuinka puinen tuloputki on kiinnitetty sillan betoniseen seinään. Kiinnityksestä riippuen häviökerroin  $\zeta$  voi olla välillä 0 – 25. Taulukossa 6.1 on esitetty eri häviökertoimia. Mitä terävämpi on sisääntulon reuna, sitä suurempi on häviökerroin. Putkimutkat, venttiilit ja kaikenlaiset muotopoikkeamat aiheuttavat myös

häviöitä. Virtauksen virtaviivakentän voimakas muuttuminen ja häiriintyminen aiheuttavat rajakerroksen irtoamisen kappaleesta ja silloin sen taakse syntyy paikallaan pyörivä pyörteinen vanavesi. Tämä taas muuttaa päävirtausta lämmöksi, joten kaikkia häiriöitä tulisi välttää. (Aalto Yliopisto, 2011) (Douglas, et al., 1995)

Taulukko 6.1: Putkiliitoksen häviökertoimia. (Douglas, et al., 1995)

Kiinnitys	$\zeta$
Sulkuventtiili (auki – 75 prosenttisesti kiinni)	0.25 - 25
Istukkaventtiili	10
Palloventtiili, auki	0.1
Pumpun imuputken takaiskuventtiili	1.5
180 asteen putkimutka	2.2
90 asteen putkimutka	0.9
45 asteen putkimutka	0.4
Laajeneva 90 asteen putkimutka	0.6
T-risteys	1.8
Terävä sisääntulo	0.5
Pyöristetty sisääntulo	lähestyy 0.0
Terävä ulostulo	0.5

Epäjatkuvuuskohdassa esiintyvä putouskorkeuden vähenemä eli kitkahäviö  $h_f$ :

$$h_f = \zeta \alpha \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (6.1)$$

missä

$\alpha$	virtausprofiilin muodosta riippuva korjauskerroin	[-]
$\bar{v}$	aikakeskiarvotettu virtaus	[m/s]
$\zeta$	paikallisvastus	[-]

Korjauskerroin on laminaariselle virtaukselle 2 ja turbulenttiselle tyypillisesti alle 1.05, mutta usein se jätetään huomiotta ja asetetaan arvoksi 1.

Häviöt eli toisin sanoen kertavastukset aiheuttavat virtaukseen painehäviöitä. Tämä taas hidastaa virtausta ja voidaan käsitellä tehollisen putouskorkeuden vähentymisellä. Käsitellään virtausta sillalta tuloputkeen putken kuristumana. Kun putkessa on äkillinen kuristuma, aiheutuu painehäviöitä, mikä johtuu kuroutumaa seuraavan virtauksen laajeneman häviöistä. Paikallisvastukset arvioidaan yhtälöillä (6.2) ja (6.3) ja paikallisvastuksen vaikutus pudotuskorkeuden vähenemään on esitetty kuvassa 6.1.

$$\zeta = 0,4 \left( 1,25 - \frac{A_b}{A_a} \right), \text{ kun } A_b/A_a \leq 0,715 \quad (6.2)$$

missä

$A_b$	pienemmän putken pinta-ala	$[\text{m}^2]$
$A_a$	suuremman putken pinta-ala	$[\text{m}^2]$

$$\zeta = 0,75 \left( 1,00 - \frac{A_b}{A_a} \right), \text{ kun } A_b/A_a \geq 0,715 \quad (6.3)$$



Kuva 6.1: Supistuman vaikutus putouskorkeuden menetykseen. X-akselilla supistuma ja y-akselilla putouskorkeuden menetys. Eli mitä enemmän pinta-alat eroaa toisistaan, sitä suurempi supistuma.

## 6.1.2 Putkivirtaus

Virtauksen ohitettua sisääntulon, se jatkaa kulkuaan puisessa putkessa. Häiriöiden jälkeen virtaus asettuu kuljettuaan putkea pitkin tarpeeksi pitkän matkan (esimerkiksi 4 kertaa halkaisijan verran, jos sisääntulo aiheuttaa virtaukseen häiriötä). Mutta tässä yhteydessä se on vahvasti turbulენტista riippumatta mitä kohtaa putkesta tarkastellaan. Kuitenkin, riippumatta virtauksen häiriöllisyydestä tai häiriöttömyydestä, tarvitaan laskea kuinka paljon tuloputki vaikuttaa virtaukseen ja sitä kautta vedestä saatavaan energiaan. Asian yksinkertaistamiseksi fluidi jaetaan laminaariseen ja turbulენტiseen virtaukseen, siirtymä- eli transitoalueen jäädessä kokonaan huomiotta.

Jaettaessa virtaus pieniin osiin, fluidielementteihin, voidaan tarkastella sen tyyppiä. Virtaus on laminaarista, jos kukin fluidielementti etenee suoraviivaisesti ja mikäli fluidielementit pyörteilevät, on virtaus turbulენტtia. Tämä voidaan nähdä silmämääräisesti mikäli päästään katselemaan fluidia, mutta usein ei voida ja lisäksi laskemista varten tarvitaan lukuarvo. Englantilainen Osborne Reynolds osoitti kokeellisesti eron laminaarin ja turbulენტin virtauksen välillä ja näiden kokeiden perusteella otti käyttöön dimensiottoman luvun. Yhtälössä (6.4) esitetään tämä luku, jota myöhemmin alettiin kutsua Reynoldsin luvuksi  $Re$ . (Aalto Yliopisto, 2011)

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (6.4)$$

missä

$D$	karakteristinen mitta	[m]
$\mu$	dynaaminen viskositeetti	[kg/ms]

Lähteestä riippuen kriittinen Reynoldsin luku vaihtelee tuhannen ja 2300 välissä. Virtauksen ollessa laminaarista putouskorkeuden häviö  $h_f$  lasketaan yhtälöstä (6.5) ja ollessa turbulენტista yhtälöstä (6.6) (Douglas, et al., 1995).

$$h_f = \frac{128\mu L q_v}{\pi \rho g d^4} \quad (6.5)$$

missä

$L$	tuloputken pituus	[m]
$d$	tuloputken halkaisija	[m]

$$h_f = \frac{f l}{d} \cdot \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (6.6)$$

missä

$f$	kitkakerroin	[-]
$v$	virtausnopeus	[m/s]

Kitkakerroin  $f$  saadaan käyttämällä tunnettua liitteessä 2 olevaa Moodyn käyrää, jolloin tarvitaan tietää putken karheus, putken halkaisija ja Reynoldsin luku. Moodyn käyrästä käytetäänkin yleisesti putkivirtausten laskennassa. Kitkakertoimen laskentaan on esitetty erilaisia yhtälöitä, joista Colebrookin yhtälö (6.7) ja Haalandin yhtälö (6.8) ovat esitettynä alla. (White, 2003, pp. 365-366)

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2.0 \log \left( \frac{\epsilon/d}{3.7} + \frac{2.51}{Re_d f^{1/2}} \right) \quad (6.7)$$

$$f \approx -1.8 \log \left[ \frac{6.9}{Re_d} + \left( \frac{\epsilon/d}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad (6.8)$$

missä

$\epsilon$	pinnan karheus	[mm]
------------	----------------	------

## 6.2 Turbiinin laskenta ja mitoitus

Turbiinit, pumput, puhaltimet ja kompressorit ovat rotodynaamisia koneita, joilla muunnetaan energiaa fluidiin tai fluidista pyörivällä siivillä koostuvalla juoksupyörällä eli impellerillä. Ideaalisessa koneessa työ fluidiin tai fluidista tapahtuu häviöttömästi, mutta todellisuudessa tapahtuu aina häviöitä. Mahdollisia häviön syitä ovat liian suuret välykset, jolloin osa fluidista vuotaa välyksistä ulos, juoksupyörän geometriasta johtuvat virtauksen irtoaminen, pyörteily tai juoksupyörän ulkopintojen häviöt. Myös paineen muutokset/häviöt väärässä kohtaa spiraalia, johtosiivistöä tai juoksupyörää vaikuttavat negatiivisesti koneen toimintaan. Turbiinit ovat kuin kineettisiä pumppuja, mutta niillä ei tehdä energiaa fluidiin vaan fluidin energia muunnetaan mekaaniseksi energiaksi. (Douglas, et al., 1995) (Jaatinen-Värri, 2013)

Tässä teoriaosuudessa keskitytään vain hydraulisiin koneisiin, joissa aine ei ole kokoonpuristuvaa. Lämpötilan vaikutusta ei oteta huomioon ja laskennan yksinkertaistamiseksi siipiprofilia ei myöskään oteta huomioon. Juoksupyörän siivet eli siivistö vaikuttaa virtauksen sekundäärivirtaan ja häiritsee virtausta siipien yli. Tätä häiriötä aiheuttavaa siivistövaikutusta<sup>1</sup> ei lasketa vaan siivet käsitellään 1D-teorian mukaan yksittäisinä kappaleina. Siipien vaikutusta approksimoidaan kuitenkin siipiluvun kertoimella. Seuraavalla kappaleella pohjustetaan teoriaa pyörivistä energianmuuntokoneista, minkä jälkeen siirrytään käsittelemään turbiinin laskentaa.

### 6.2.1 1D-teoria

Todellinen fluidin liike juoksupyörässä on kolmiulotteista, eli fluidi on kolmen koordinaatin funktio. Esimerkiksi sylinterikoordinaatistossa fluidi muodostuu siis  $\theta, r$  ja  $z$ :n funktioksi. Virtausnopeus vaihtelee säteittäisesti, siipien välissä juoksupyörän pyörimisliikkeen mukaisesti ja akselin suuntaisesti. Nopeusjakauma on siksi todella monimutkainen ja riippuu siipien lukumäärän, muodon ja paksuuden mukaan. Myös

---

<sup>1</sup> Kirjallisuudessa käytetään termiä 'cascade effect' ja aihe on oma alansa nimeltään 'cascade theory'.



siipien korkeus sekä juoksupyörän halkaisija vaikuttaa nopeusjakaumaan. (Douglas, et al., 1995)

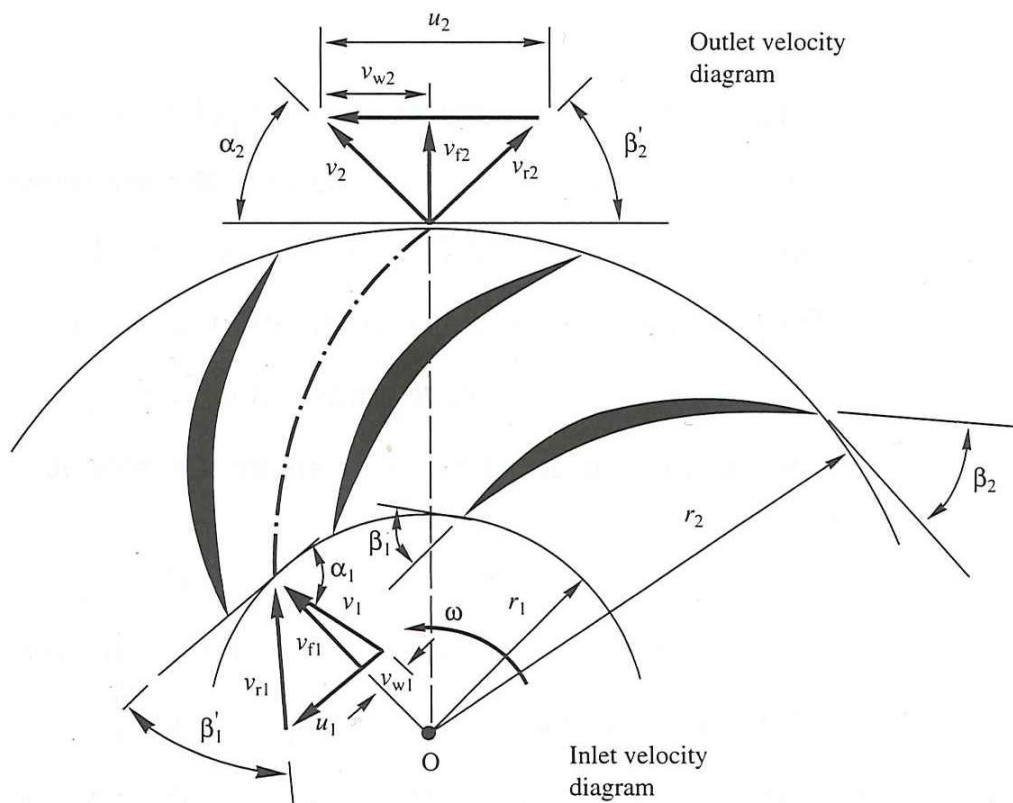
Yksiulotteinen teoria yksinkertaistaa ongelmaa seuraavilla oletuksilla:

- Siivet ovat äärettömän ohuita ja paineen vaihtelu siipien läpi korvataan kuvitteellisilla fluidiin (*body forces acting on the fluid*) vaikuttavilla väännön aiheuttavilla voimilla.
- Siipien lukumäärä on ääretön, jolloin nopeuden vaihtelut siipikanavassa vähenevät nolliin, eli  $\frac{\partial v}{\partial \theta} = 0$
- Siipikanavan nopeusvaihtelut korkeussuunnassa ovat nolli, eli  $\frac{\partial v}{\partial z} = 0$

Näin todellinen ongelma, joka on esitetty alla olevana yhtälönä, supistuu huomattavasti yksinkertaisemmaksi:

$$v = f(r, \theta, z) \rightarrow v_{\infty} = f(r) \quad (6.9)$$

Analyysi kaventuu oletusten ansiosta pelkästään impellerin sisään- ja ulostuloon ilman tarkastelua niiden välissä olevaan taserajaan - tilaan, jossa energiamuunto tapahtuu. Tila käsitellään taserajana, jossa sisään tuleva virtaus käsitellään sisääntulon nopeuskolmiona ja ulos menevän ulostulon nopeuskolmiona. Käsitellään teoriaa radiaalikompressorin juoksupyörän avulla. Kulmanopeudella  $\omega$  pyörivä juoksupyörä nopeuskolmioineen on kuvassa 6.2.



Kuva 6.2: 1D virtaus kulmanopeudella  $\omega$  pyörivän keskikapopumpun impellerin läpi. (Douglas, et al., 1995)

Kuvan 6.2 mukaisilla merkinnöillä sisääntulossa:  $r_1$  säteiseen impelleriin tullessa fluidilla on absoluuttinopeus  $v_1$  ja kulma  $\alpha_1$ . Poistuessaan impelleristä, jonka ulkosäde on  $r_2$ , fluidin absoluuttinopeus on  $v_2$  ja poistumiskulma  $\alpha_2$ . Sisääntulon nopeuskolmio aloitetaan piirtämällä absoluuttinopeuden  $v_1$  vektori kulmaan  $\alpha_1$ . Suhteellinen nopeus  $v_{r1}$  saadaan vähentämällä absoluuttinopeudesta kehänopeus  $u_1$ . Absoluuttinen nopeus  $v_1$  jakautuu kahteen komponenttiin: radiaalisuunnan  $v_{f1}$ , jota kutsutaan myös nimellä virtauksen nopeus<sup>2</sup> ja tangentialisuunnan  $v_{w1}$ , jota kutsutaan myös nimellä pyörrenopeus<sup>3</sup>. Ulostulon nopeuskolmion koostetaan aivan samoin. Kappaleessa 6.2.2 nopeuskolmiot selostetaan tarkemmin Kaplan-turbiinin näkökulmasta.

Energian muunto impellerin ja fluidin välillä johdetaan seuraavasti: Newtonin toisen lain mukaan vääntö on pyörimismäärän muutosnopeus eli kulmamomentin toinen derivaatta.

<sup>2</sup> Termi tulee englannin kielestä termistä velocity of flow, joka voidaan kääntää myös termiksi virran nopeus.

<sup>3</sup> Pyörrenopeus on vapaasti käännetty englannin kielen termistä velocity of whirl.

Pyörimismäärän muutos on massavirran, tangentiaalisen nopeuden ja säteen tulo. Pyörimismäärän muutos sisään- ja ulostulossa on:

$$sisään = q_m v_{w1} r_1 \quad (6.10)$$

missä

$q_m$  massavirta [kg/s]

$$ulos = q_m v_{w2} r_2 \quad (6.11)$$

Näiden erotus on nettovääntömomentti:

$$M = q_m v_{w2} r_2 - q_m v_{w1} r_1 \quad (6.12)$$

missä

$M$  vääntömomentti [Nm]

Akseliteho on vääntömomentin ja kulmanopeuden tulo:

$$P = q_m (v_{w2} r_2 - v_{w1} r_1) \omega \quad (6.13)$$

missä

$\omega$  kulmanopeus [rad/s]

$P$  teho [J/s, W]

Otetaan huomioon, että  $\omega = u/r$ , joten  $\omega r_2 = u_2$  ja  $\omega r_1 = u_1$ . Sijoituksella:

$$P = q_m (v_{w2} u_2 - v_{w1} u_1) \quad (6.14)$$

Jakamalla massavirralla saadaan ominaisteho eli teho jaettuna massavirralla:

$$P_{\text{spec}} = \frac{P}{q_m} = gE \quad (6.15)$$

missä

$P_{\text{spec}}$	ominaisteho	[J/kg]
$E$	Eulerin korkeus	[m]

Ominaisenergiasta saadaan lopulta Eulerin korkeus<sup>4</sup>  $E$ :

$$E = \frac{u_2 v_{w2} - u_1 v_{w1}}{g} \quad (6.16)$$

Turbiineissa  $u_1 w_1 > u_2 w_2$ , joten  $E$  olisi negatiivinen. Siksi turbiinien kohdalla käytetään muotoa:

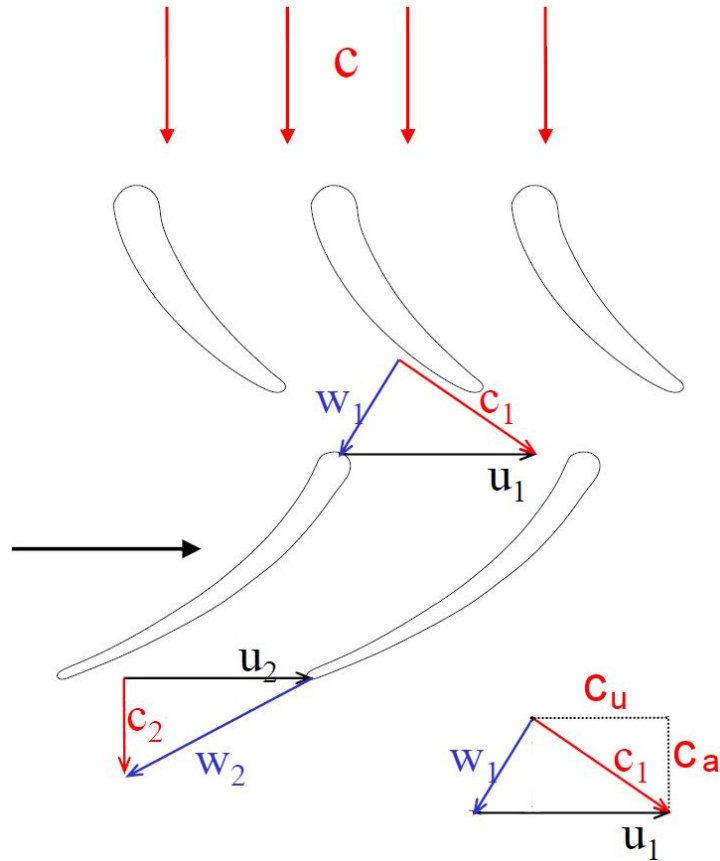
$$E = \frac{u_1 v_{w1} - u_2 v_{w2}}{g} \quad (6.17)$$

## 6.2.2 Nopeuskolmiot Kaplan-turbiinissa

Kappaleessa 6.2.2 esiteltiin nopeuskolmiot rotodynaamisille koneille ja tässä kappaleessa kerrotaan nopeuskolmiot Kaplan-turbiinissa. Edellisen kappaleen nopeuskolmiot ovat hieman uudelleen muotoiltuna alla olevassa kuvassa:

---

<sup>4</sup> Kuten head eli putouskorkeus  $H$  tulee englannin kielisestä lähteestä, Euler's head  $E$  tarkoittaa pumpuissa pumpun kehittämää nostokorkeutta ja turbiineissa turbiinin hyödyksi käyttämää putouskorkeutta.



Kuva 6.3: Nopeuskolmiot. Oikealla alhaalla roottorin tulokolmio, jossa absoluuttinnopeus on jaettu komponentteihin. (Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, 2006)

Kuvassa 6.3 absoluuttinen nopeus  $c$  jakautuu kahteen komponenttiin: aksiaalisuunnan  $c_a$  ja tangentialisuunnan  $c_u$ . Suhteellinen nopeus  $w$  on absoluuttinen nopeus  $c$  vähennettynä kehänopeudella  $u$  ja kehänopeus on kulmanopeuden ja juoksupyörän säteen tulo. Molemmat nähtävissä alla:

$$\vec{w} = \vec{c} - \vec{u} \quad (6.18)$$

$$u = \omega R \quad (6.19)$$

missä

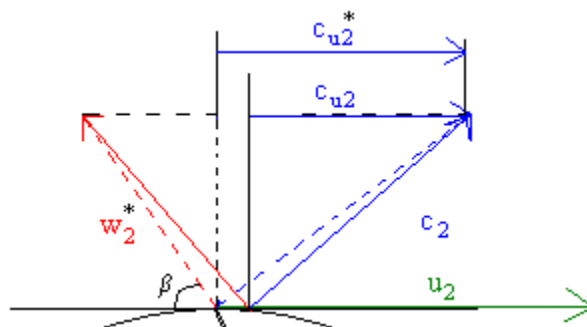
$R$  juoksupyörän säde [m]

Absoluuttinen nopeus ja nopeus  $c_u$  ovat ratkaistuna alla:

$$c_a^2 + c_u^2 = c^2 \quad (6.20)$$

$$c_u = \sqrt{c^2 - c_a^2} \quad (6.21)$$

Uloslähtevän virtauksen nopeuskolmio lasketaan samoin kuin sisääntulevan virtauksenkin. Todellisuudessa siipikanavassa esiintyy pyörteisyyttä, mistä syystä neste poistuu juoksupyörän kehältä pienemmässä kulmassa, kuin siiven tangentti määrää. Pyörteisyys otetaan huomioon siipiluvunkertoimella (slip factor). Alla olevassa kuvassa katkoviivalla on teoreettinen tapaus ja yhtenäisellä viivalla todellinen tapaus. Kuvassa  $c$  on absoluuttinopeus,  $w$  on suhteellinen nopeus,  $c_u$  on tangentialisuunnan nopeuskomponentti ja yläindeksi \* tarkoittaa teoreettista tapausta.



Kuva 6.4: Todellisuudessa neste poistuu kehältä pienemmässä kulmassa, kuin siiven tangentti määrää. (Jaatinen-Värri, 2013)

Tangentialisuunnan nopeuskomponentti muuttuu kun siipiluvun kerroin otetaan huomioon. Koska kehänopeus  $u$  pysyy samana, nopeuskolmion kulmat ja muut nopeudet muuttuvat samalla. Yhtälössä 6.22 on uusi tangentialisuunnan nopeuskomponentti ja yhtälössä 6.23 on siipiluvun kerroin.

$$c_u = k c_u^* \quad k < 1 \quad (6.22)$$

missä

$c_u^*$	teoreettinen nopeus	[m/s]
$c_u$	todellinen nopeus	[m/s]
$k$	siipiluvun kerroin	[-]

$$k = 1 - \frac{\pi \sin \beta_2}{z} \quad (6.23)$$

missä

$z$	siipien lukumäärä	[-]
$\beta_2$	siipikulma jättöreunalla	[°]

### 6.2.3 Mitoitus

Turbiinia mitoittaessa tarvitaan tietää vedestä saatava teho  $P$ , putouskorkeus  $H$ , virtaama  $q_v$ , arvioitu vakiopyörimisnopeus  $n$ . Mitoituksessa käytetään suurinta mahdollista virtausnopeutta, mikä lasketaan maan putoamiskiihtyvyyden ja putouskorkeuden mukaan. Mitoituksessa käytetään niin sanottuja vähennettyjä arvoja, jotka ovat suhteessa korkeimpaan mahdolliseen nopeuteen, mikä voidaan saavuttaa jos kaikki energia muuntuu kineettiseksi energiaksi. Vähennetty kulmanopeus on absoluuttisen nopeuden (yhtälö (6.24) ja kulmanopeuden jako (6.26). Tässä työssä turbiini mitoitetaan Norjan Teknillisen NTNU yliopiston kurssin Turbokoneet ohjeiden mukaan (Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, 2006).

Suurin mahdollinen virtauksen nopeus riippuu putoamiskiihtyvyydestä ja putouskorkeudesta:

$$v_{kin.maks} = \sqrt{(2gH)} \quad (6.24)$$

Kulmanopeus lasketaan halutun pyörimisnopeuden perusteella:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (6.25)$$

missä

$n$	turbiinin pyörimisnopeus	[1/min]
-----	--------------------------	---------

Redusoitu kulmanopeus edellisten perusteella on esitetty alla olevassa yhtälössä:

$$\underline{\omega} = \frac{\omega}{\sqrt{2gH}} \quad (6.26)$$

Redusoitu tilavuusvirta menee kuten edellisekin, eli arvo jaetaan maksimaalisella nopeudella:

$$\underline{q_v} = \frac{q_v}{\sqrt{2gH}} \quad (6.27)$$

Nopeuskerroin on dimensioton luku, mikä koostuu redusoidusta kulmanopeudesta ja tilavuusvirrasta:

$$*\Omega = \underline{\omega} \sqrt{\underline{q_v}} \quad (6.28)$$

Redusoitu radiaalinopeus tarvitaan juoksupyörän halkaisijan laskemiseen. Tämä nopeus on näkyvillä alla olevassa yhtälössä ja yhtälössä 6.30 on juoksupyörän halkaisija.

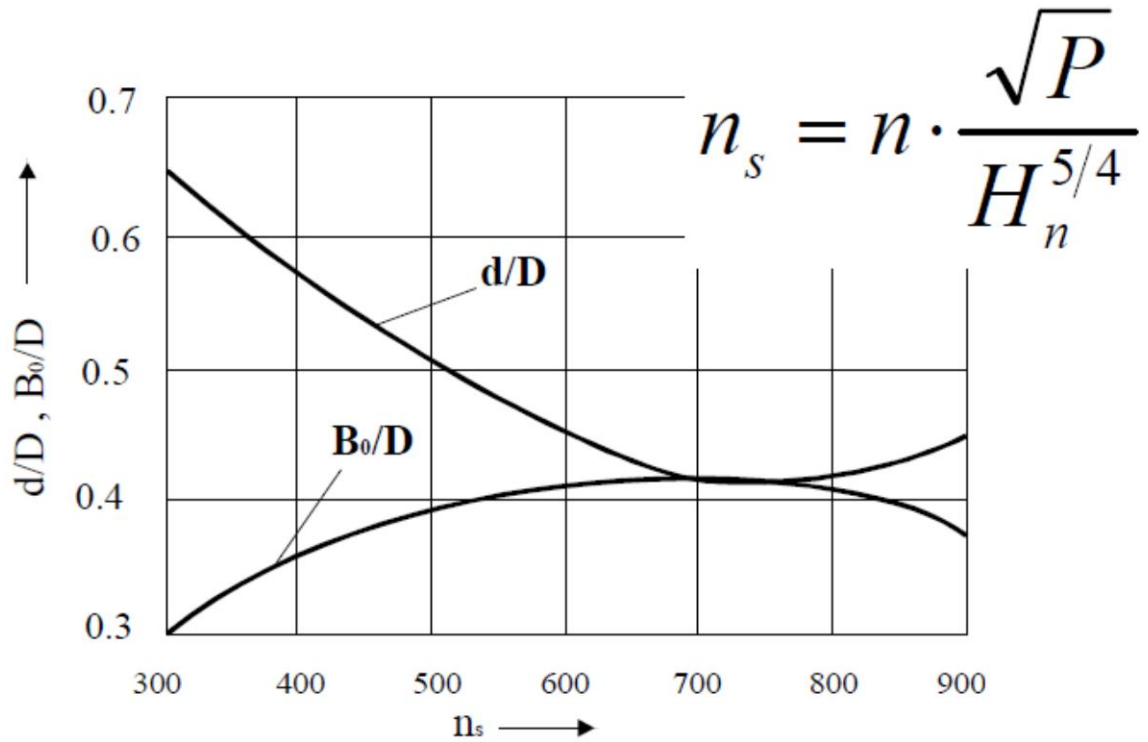
$$\underline{v_f} = 0,12 + 0,18 * \Omega \quad (6.29)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \underline{q_v}}{\pi \underline{v_f}}} \quad (6.30)$$

Juoksupyörän navan halkaisijan suhde siipien kärjen halkaisijaan saadaan ominaispyörimisluvulla  $n_s$  alla olevasta kuvasta. Geometrisesti samanmuotoisia, yhdenmuotoisia, laitteita yhdistää ”samankaltaisuuden laki”, mikä voidaan esittää dimensiottomilla numeroilla. Erilaisten laitetyyppien tehoa voidaan vertailla keskenään



vertailemalla niiden dimensiottomia lukuja keskenään. Dimensiottomista luvuista piirretään käyrä ja näitä vertailemalla voidaan hyvin vertailla eri laitteita keskenään. Tämä vertailu on kätevintä esittää yhdellä numerolla, ominaispyörimisnopeudella  $n_s$ . Alla olevan kuvan yhtälössä teho  $P$  annetaan hevosvoimina.



Kuva 6.5: Kaplan-turbiinin juoksupyörän halkaisijan suhde  $d/D$  ja johtosiivistön korkeuden suhde  $B_0/D$ .

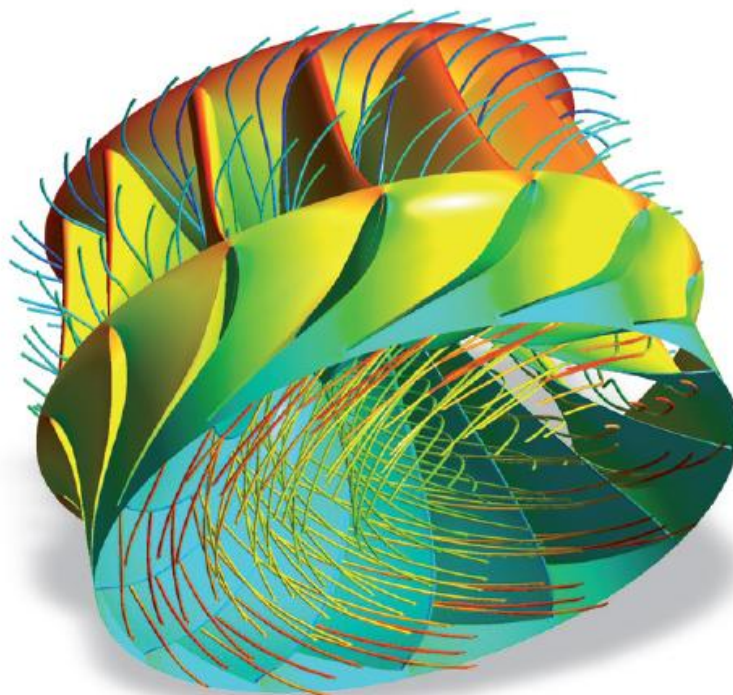
Kun nopeuskolmioista on ratkaistu nopeudet, voidaan laskea hydraulinen hyötysuhde. Hydraulinen hyötysuhde on hyödynnetty putouskorkeus jaettuna putouskorkeudella. Tämä on nähtävillä yhtälössä 6.31.

$$\eta_{hydr} = \frac{uc_{u1}}{gH} \quad (6.31)$$

### 6.3 Parantaminen

Tässä työssä laskettu turbiini on vain karkea luonnos tai kehys, minkä sisällä oikea turbiini voitaisiin suunnitella. Suuria epävarmuuksia ovat virtauksen kulmat, nopeudet ja häviöt,

sillä niitä ei tällä tasolla voi laskea tai arvioida kunnolla. Kunnolliseen suunnitteluun tarvitaan CFD-laskentaa. CFD eli Computational Fluid Dynamics on numeerista virtauslaskentaa, jossa 3D-mallista on tehty hilaverkko ja jokaiselle hilakopille kirjoitetaan säilyvyysyhtälö. Numeerisen virtauslaskennan perustavoite on virtausta kuvaavien säilyvyysyhtälöiden numeerinen ratkaisu eli suure virtaa taserajan (kopin) sisään, muuttuu ja virtaa taserajasta ulos. Yleisimpiä säilyvyysyhtälöitä ovat massan, liikemäärän, energian ja yhdisteen säilyvyysyhtälöt.



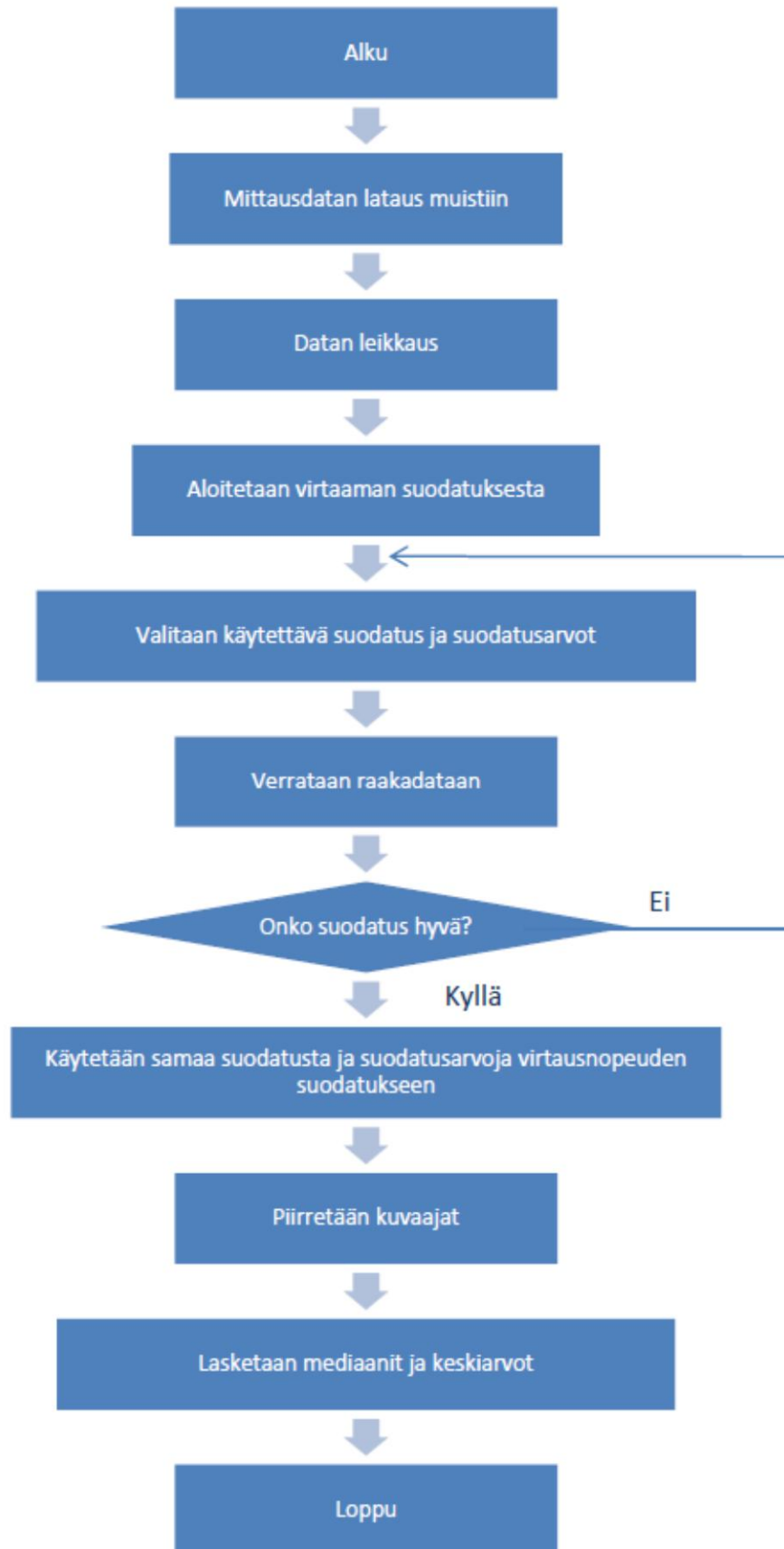
Kuva 6.6: Francis-turbiinin CFD-malli virtaviivoineen. (VOITH, 2013)

## **7 LASKENTAOHJELMAT**

Valmistajilta saatavat tarjoukset pohjautuvat kohteen veden korkeuden vaihteluun ja virtaaman vaihteluun. Kentällä suoritettujen mittauksen pohjalta saatu data suodatettiin. Lisäksi edellä mainitun teorian lisäksi laskettiin miten karkeasti mitoitettu Kaplan-turbiini toimisi. Samalla ohjelmalla voi laskea eri turbiini-tyyppien toimintaa. Kaikki laskenta suoritettiin Mathworksin Matlab ohjelmalla.

### **7.1 Mittaus**

Maastossa käydyn mittauksen tuoma tulos analysoidaan Mittaus.m ohjelmalla. Mittauksessa saatu tekstitiedosto avattiin Matlabiin käyttämällä ohjelman ”Import Data” työkalua. Koska virtaama, virtausnopeus ja sen hetkinen pinnan korkeus ovat eri sarakkeissaan, ne eroteltiin ja tallennettiin omiksi tiedostoiksiin. Nämä ladattiin muistiin ja leikattiin ylimääräisiksi todetut osat pois, koska raaka-arvoissa oli harjoittelussa tulleita arvoja sekä mittauksista lopetettaessa tulleita käyttökelvottomia arvoja.



Kuva 7.1: Mittaus.m ohjelman vuokaavio.

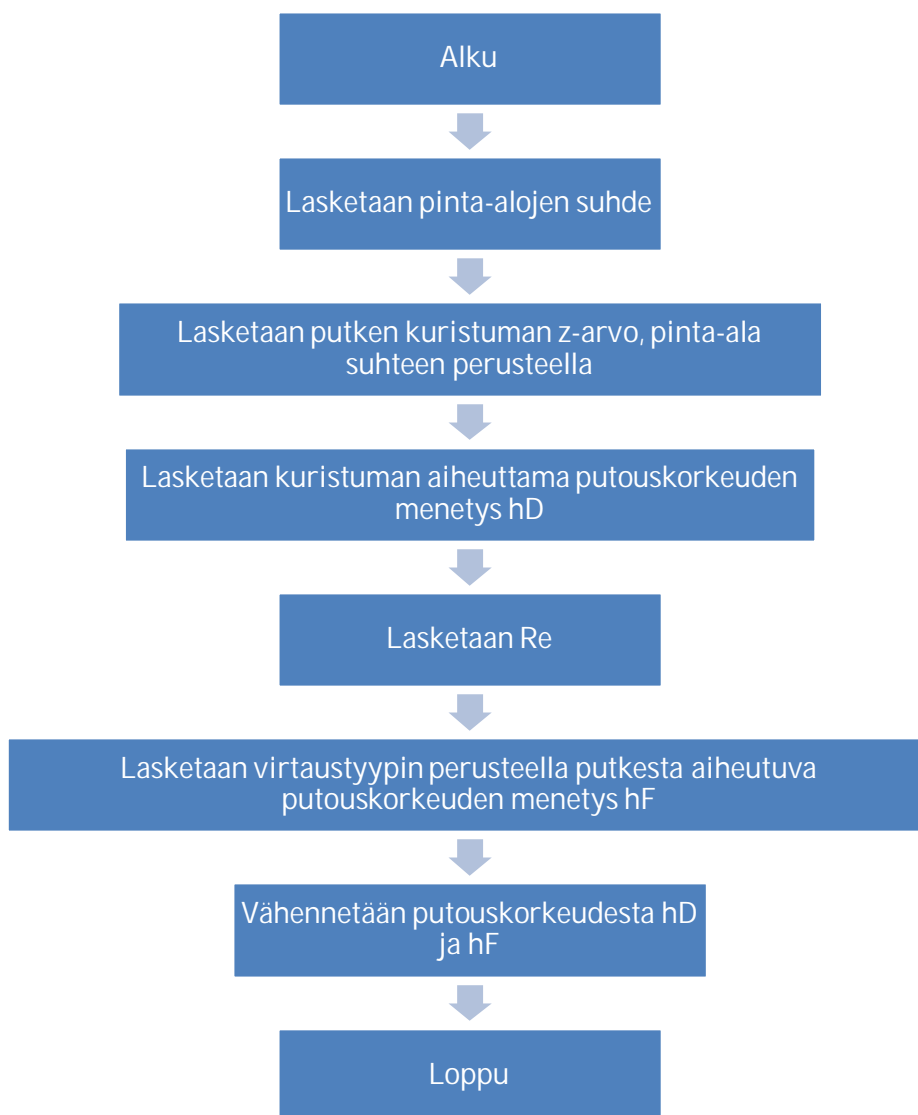
## 7.2 Kanava ja tuloputki

Kanavan ja tuloputken vaikutuksen laskemiseksi Kanava.m tiedoston alkuun asetetaan alkuarvot, jotka voitaisiin myös lukea esimerkiksi Excel-tiedostosta käyttämällä Matlabin omia rutiineita xls tiedoston käsittelyyn.

Alkuarvoina tarvitaan:

- Padon, eli sillan mitat ja veden korkeus
- Luonnon vakioista putoamiskiihtyvyys
- Veden lämpötila, josta saadaan tiheys
- Mitattu putouskorkeus eli yläveden ja alaveden pinnankorkeuksien erotus
- Keskiarvostettu tilavuusvirta eli virtaama, joka on laskettu tiedostossa Mittaus.m
- Tuloputken pituus ja halkasija
- Virtausnopeus geometriassa väljän jälkeen

Laskenta haarautuu pinta-alasuhteen ja Reynoldsin luvun perusteella. Lopuksi saadaan vaikutus putouskorkeuden vähenemiseen.



Kuva 7.2: Kanava.m ohjelman vuokaavio.

### 7.3 Turbiini

Tämä ohjelma sisältää turbiinin ”pohja” luokan, eli arvot, jotka ovat yhteneväisiä kaikissa eri turbiineissa. Tästä luokasta periyttämällä tehdään varsinaisen turbiini-tyyppin oma luokka laskentarutiineineen. Tarkoitus pitää erilaisten tyyppien ja geometrioiden laskenta samanlaisena.

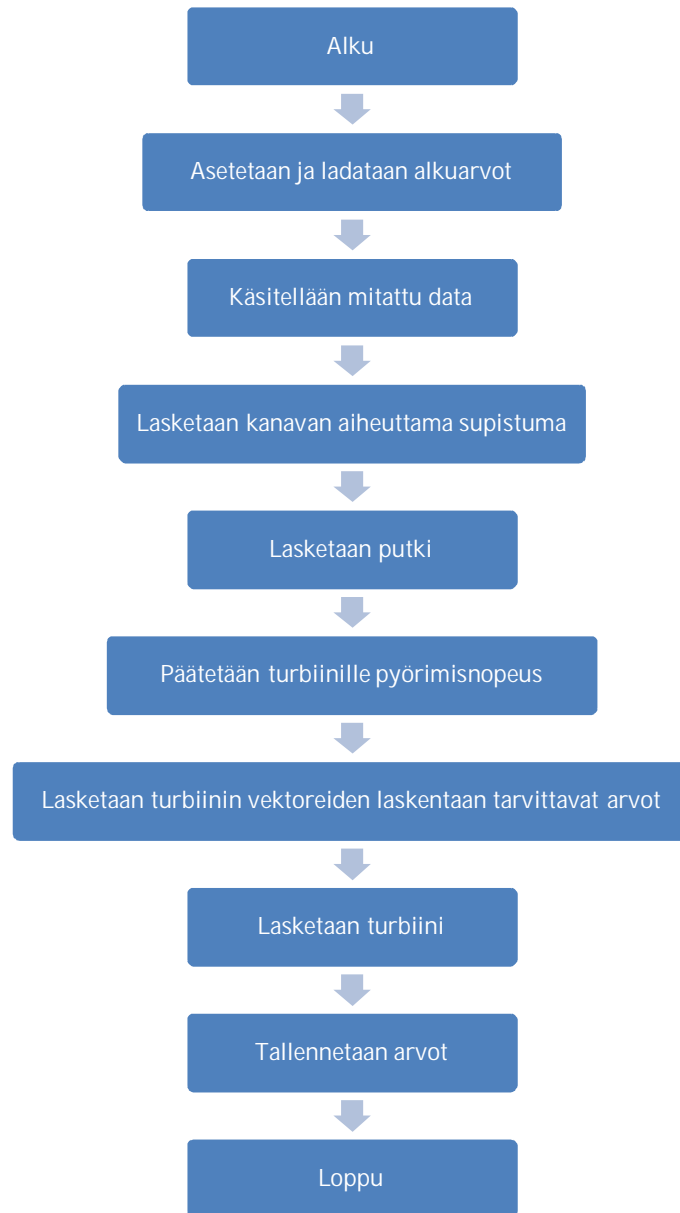
## **7.4 Kaplan-turbiini**

Kaplan\_Turb.m tiedostossa sijaitsee Kaplan-turbiinin laskennassa käytetty periytetty luokka. Luokka sisältää tämän tyyppin laskennassa käytetyt ominaismuuttujat ja funktiot niiden laskentaan. Luokan sisäinen funktio laskee nopeuskolmion vektorit eli suhteelliset, absoluuttiset, radiaaliset, tangentiaaliset virtaukset ja virtauksen pyörteilyn. Lisäksi funktio laskee hydraulisen hyötysuhteen.

## **7.5 Laskenta**

Tämä on päälaskenta tiedosto Laskenta.m, jossa kaikki edellä tehty yhdistyy. Asetetaan tai ladataan alkuarvot, joita käytetään mittauksen käsittelyyn, kanavan ja tuloputken laskentaan. Lasketaan juoksupyörän halkaisija annetusta pyörimisnopeudesta, lasketaan hyötysuhde sekä lasketaan toimiiko turbiini annetuilla arvoilla.

Kuvassa 7.3 on ohjelman yksinkertaistettu lohkokaavio.

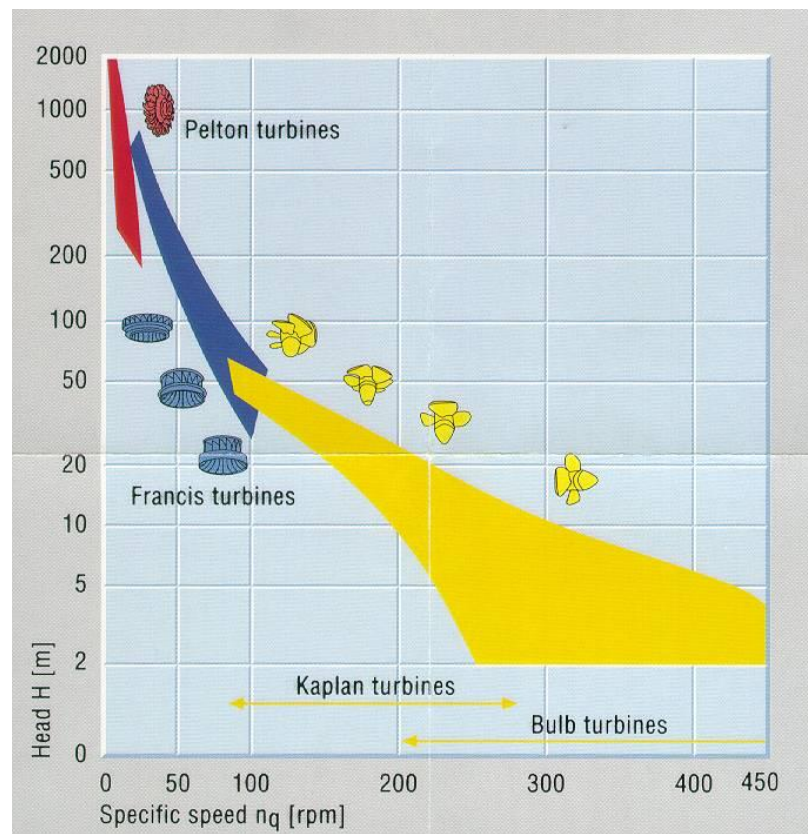


Kuva 7.3: Laskenta.m ohjelman suorituksen lohkokaavio.



## 8 TEOREETTISEN LASKENNAN TULOKSET

Koska Kaplan-turbiini on täyssäädettävä, eli johtopyörän ja myös juoksupyörän siivet ovat erikseen säädettävissä, turbiinin säätöyksikkö säätää kulmat parhaan hyötysuhteen saamiseksi. Kappaleessa 6 esitettyä teoriaa sovelletaan tässä kappaleessa ja lähtöarvoina käytetään Lohikosken putouskorkeutta ja virtaamaa.



Kuva 8.1: Ominaispyörimisnopeuden valinta.

Turbiinin täytyy pyöriä samalla pyörimisnopeudella generaattorin kanssa, joten valitaan kuvasta 6.4 sopiva  $n_q$ , lasketaan  $n$  ja tarkastetaan sopiiko se yhteen generaattorin synkronointinopeuden kanssa. 50 Hz generaattorin synkronointinopeudet napapariluvun mukaan:

Taulukko 8.1: 50 Hz generaattorin synkronointinopeus napapariluvun mukaan.

Napapariluku	Synkronointinopeus
1	3000
2	1500
3	1000
4	750
5	600

Kun synkronointinopeus ja kierrosnopeus ovat sovitettu toisiinsa, voidaan laskea juoksupyörän halkaisija. Putouskorkeus vähenee häviöiden ansiosta 0.60 metriä, joten putouskorkeutena käytetään 5.4 metriä ja virtaamana kahta kuutiota. Kun juoksupyörän pyörimisnopeudeksi valitaan 600 kierrosta minuutissa, juoksupyörän halkaisijaksi tulee 645 millimetriä ja navan halkaisijaksi tulee 265 millimetriä turbiinin ominaispyörimisnopeuksilla  $n_s = 800$  (kuva 6.5) ja  $n_q = 220$  rpm (kuva 8.1).

## 9 UUSINTA

Vesivoimalan uusinnassa etsittiin eri vaihtoehtoja toiminnan parantamiseen ja pohdittiin miten tämä toteutuisi. Laitteiston uusinnassa komponentit voisi tilata eri toimittajilta, mutta niiden yhdistäminen yhdeksi kokonaisuudeksi vaatisi ammattitaitoa ja suurta räätälöintiä. Lisäksi takuu- ja vastuukysymykset tulisivat esille ennen pitkää. Jos jokin osa rikkoontuisi, vastuuta ei voisi suoraan osoittaa turbiinotoimittajaa, generaattoritoimittajaa, automaatiotoimittajaa eikä kokonaisuuden kasannutta kohtaan. Huolto monimutkaistuisi ja mahdollisen konerikon yhteydessä korjauksen järjestely sitoisi henkilötunteja. Laitteisto päätettiin siis tilata yhdeltä laitteistotoimittajalta. Jokaisella näistä on erilainen tarjous ja laitteistot eroavatkin toisistaan selvästi, mikä on hyvä asia, sillä päätöstä tehdessä on enemmän vaihtoehtoja joista valita. Uusintaan osallistui kolme yritystä, joiden tarjoukset ovat seuraavissa kappaleissa.

### 9.1 Waterpumps WP Oy

Helsinkiläinen Waterpumps WP Oy ehdottaa ratkaisuksi säätyvällä johtopyörällä, kiinteällä johtolaitteella ja hydraulisella toimilaitteella olevaa turbiini-generaattoria. Tämän säätöalue on 0.7 - 2.0 kuutiota sekunnissa, generaattori on kestopäällytetty ja hinta on 160 000 euroa. Läppäventtiili toimilaitteineen kustantaa 40 000 euroa, sähkö- ja automaatiokeskus valvomo-ohjelmistoineen ja hälytysjärjestelmineen maksaa 60 000 euroa. Toimitusaika on noin 12 kuukautta tilauksesta.

### 9.2 VEO

Vaasalainen VEO Oy tarjoaa yhteistyöpartnerinsa Hydrohromin suunnittelemaa ja valmistamaa pysty akselista täyssäädettävää Kaplania tyyppimerkiltään HH 1000 VT. Generaattori liitetään akselikytkimen kautta suoraan turbiini akseliin. Tämän tšekkiläisen turbiinin netto putouskorkeus  $h_{net}$  on 6.0 metriä, maksimivirtaama  $Q_{Tmax}$  on 2.5 kuutiota sekunnissa ja teho 117 kilowattia. Turbiinin juoksupyörän halkaisija on 1000 millimetriä ja siipien lukumäärä 4. Johtopyörän säätö tapahtuu turbiinin runkoon asennetulla hydraulisylinterillä, juoksupyörää säädetään myös hydraulisesti. Juoksupyörä on valettu

tarkkuusvalumenetelmällä tietokonepohjaisesta mallista ja hienotyöstetty CNC-koneistuksessa. Imuputki valmistetaan hitsaamalla teräslevyistä ja se liitetään suoraan juoksupyörän kammioon. Liitteessä on nähtävillä myös Hydrorohmin 600 ja 1000 turbiinin hyötysuhdekäyrät. SK tarkoittaa täyssähköistä ja SSK puolissäädettävää, niin kutsuttua semikaplania. Generaattorin teho on 110 kilowattia.

VEO:n toinen vaihtoehto banki-turbiini, johon generaattori on kytketty hihnavedolla. Turbiinin säätöä tapahtuu muuttamalla segmentin asentoa. Turbiini on yksinkertainen, toiminta varma. Turbiinia toimitetaan kahdella eri roottorin halkaisijalla (340 mm ja 600 mm) ja neljällä eri leveydellä.

Kolmas vaihtoehto on S-putkiturbiini, jolla kerrotaan olevan hyvä hyötysuhde ja sen sanotaan olevan lähes huoltovapaa. Valitettavasti tarjouksesta puuttuu hinnat, joten takaisinmaksuaikaa ei tässä työssä voida arvioida. Pyynnöistä huolimatta VEO ei kyennyt toimittamaan tarjoushintoja diplomityön teon aikaan, mutta luultavasti ne saadaan siihen mennessä kun uusinnasta tehdään päätöksiä.

### **9.3 OY M&S POWER LTD**

Helsinkiläinen Oy M&S Power Ltd suunnittelee ja toteuttaa pienvesivoimaloita. Sähkötoteutuksen tekee Oy M&S ja putkiturbiinin valmistaa Saahkarin Kone Ky. Vesiturbiiniksi ehdotetaan aseteltavasiipistä potkuriputkiturbiinia, joka toimii alueella 1.4 - 2.2 m<sup>3</sup>/s tehon vaihdellessa 70 – 110 kilowatissa. Toisin kuin Kaplan-turbiinissa, putkiturbiinin siipien säätö tapahtuu turbiinin ollessa pysähdyksissä. Generaattoriksi tässä tarjouksessa tarjotaan Mecc Alte 84 kilowatin harjatonta tahtigeneraattoria. Voimalaitoksen turbiini, generaattori, säätö-, suojaus- ja ohjauslaitteet sijoitetaan merikonttiin, joka asennetaan vanhan koneaseman taakse imuputken jälkeisen alakanavan päälle.

## **9.4 Waterpumps WP Oy vanha tarjous**

Lohikosken Myllyllä on vesivoimalan uusintaa harkittu aiemminkin, mistä syystä Waterpumps Oy:n vanhaa tarjousta on hyvä verrata nykyisiin tarjouksiin myös hinnan sekä ratkaisun osalta. Vanhassa tarjouksessa mitoitusvirtaamaksi otettiin 2 kuutiota sekunnissa ja putouskorkeutena pidettiin koski-inventoinnin ilmoittamaa 4.7 metriä. Alustavassa selvityksessä nettotehona pidetään 75 kilowattia, mutta tarjouksessa tyydytään kahteen 21 kilowatin turbiini-generaattori yhdistelmään, mikä on vähemmän kuin nykyinen voimalaitos tuottaa. Turbiiniksi ehdotetaan potkuriturbiinia ja generaattoriksi epätahtigeneraattoria koneistokokonaisuuden ollessa täysin automaattinen. Tarjouksen hinta on 430 000 markkaa, mihin ei sisälly sähköasennusta. Sähköasennus kustantaa erikseen 44 500 markkaa. Markkahinnat muutettiin suoraan euroksi euron käyttöönottopäivän kurssilla, koska tämän tarjouksen ollessa vertailukohteena ei ole tarvetta ottaa valuutan arvon muutosta huomioon.

## **9.5 Muut vaihtoehdot**

Jos halutaan tinkiä hinnasta, eikä uusia koko laitteistoa voidaan esimerkiksi kunnostaa turbiini, uusia sähköistys ja lisätä automaatiota, vaihtaa generaattori suurempaan käytettyyn, vaihtaa hihna toiseen vähentäen siten ehkä häviöitä taikka kunnostaa turbiini ja vaihtaa generaattori samalla suurempaan.

Turbiinin kunnan tietävät vain lohikosken myllyllä aktiivisesti tuotantoon osallistuvat henkilöt. Kunnostus voi maksaa hyvinkin paljon riippuen tietysti turbiinin kunnosta. Mutta sitä tekemään täytyisi löytää tekijä ja kustannuksia ei voi arvioida ilman kunnostuksen suorittajan arviota. Lisäksi riippuen kunnostuksen lopputuloksesta, laitteistolla ei ehkä saa enempää tuottoa, joten kunnostus voi olla vain rahan hukka.

Sähköistysten uusiminen ja automaation lisääminen ei myöskään lisää tuottoa, mutta varsinkin automaation lisäämisellä voimalaitoskäynnit voisivat vähentyä reilusti. Oikein toimiva automaatio alaa laitoksen alas häiriön sattuessa ja käynnistää sen taas kun häiriö on ohi. Tämä olisi mukavuutta ja helppoutta lisäävä vaihtoehto.

Kuten jos paikalla oleva epätahtikone, vaihtoehtona on hankkia käytetty isompi generaattori. Mikäli vanha generaattori on pullonkaula, generaattorin uusinnan jälkeen laitos tuottaa enemmän. Kuuleman mukaan vanhoja epätahtikoneita on saatavilla. Turbiinilta generaattorille voimaa välittävä hihna vaikuttaa hyötysuhteeseen ja sen uusinnalla voi ehkä parantaa hyötysuhdetta. Toisaalta mahdollisuudet ovat myös että hyötysuhde ei muutu tai se huononee. Rahaa säästävä vaihtoehto on myös kunnostaa nykyinen turbiini ja vaihtaa generaattori suurempaan käytettyyn.

Voimalaitoksen alakanavan ruoppaaminen parantaisi veden virtausta ja vähentäisi veden pinnan nousua imuputkessa, jolloin teho saataisiin enemmän vaikka mitään muuta ei tehtäisikään. Laitteiston uusimisen kanssa tämä tietenkin vaikuttaisi positiivisesti parantaen vedestä saatavaa tehoa.

## **10 KANNATTAVUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT**

Hankkeen kannattavuus käsitellään tässä työssä vain investoinnin ja sähkönhinnan perusteella. Tässä kappaleessa käsitellään sähkön hintaan ja investointiin vaikuttavia tekijöitä. Laitteiston hinta on vain osa koko investoinnista. Karkeasti voidaan sanoa, että rakennuskustannukset ovat 30 – 40 %, koneisto 30 – 40 %, sähkö- ja automaatio 20 – 30 %. Lisäksi esisuunnittelun, toteutusvalvonnan ja konsultoinnin arvioidaan olevan 10 – 20 % kustannuksista. Rakennuskustannukset ja -ratkaisut ovat merkittävä osa kokonaisinvestoinnista, koska yleinen suunnittelu vaikuttaa merkittävästi millaiseen ratkaisuun päädytään. Suoraan on hyvin vaikea tai mahdotonta ruveta hinnoittelemaan rakentamista, sillä kustannuksiin vaikuttaa kuka tekee suunnittelun, kuka rakentaa, mistä materiaalit hankitaan ja mitä säilytetään vanhasta rakennuksesta.

### **10.1 Tuet**

Työ- ja elinkeinoministeriön mukaan yrityksille, kunnille ja muille yhteisöille voidaan myöntää energiatukea ilmasto- ja ympäristömyönteisiin investointi- ja selvityshankkeisiin. Hankkeen tulee edistää uusiutuvan energian tuotantoa tai käyttöä, edistää energiansäästöä tai energiantuotannon tai käytön tehostamista tai vähentää energiantuotannon tai käytön ympäristöhaittoja. Lyhyesti: energiatuen tarkoitus on edistää uuden energiateknologian käyttöönottoa. Tuen myöntämisessä sovelletaan valtionavustuslakia (688/2001) ja asetuksessa (1063/2012) määritellään tuen hakemisesta, hyväksyttävistä kustannuksista ja tuen maksamisesta. Tukipäätökset käsitellään ELY-keskuksissa, mutta investointikustannuksiltaan yli 5 miljoonan euron hankkeet sekä uutta teknologiaa sisältävät hankkeet käsitellään työ- ja elinkeinoministeriön energiaosastolla. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2013)

Uusiutuvan energian osalta tuettavia investointeja ovat muun muassa pienet lämpökeskukset, pienet sähköntuotantohankkeet, polttoaineen tuotantohankkeet ja uuden teknologian demonstraatiohankkeet. Energiatuen osuus kustannuksista voi olla valtioneuvoston asetuksen (1063/2012) mukaan uusiutuviin energialähteisiin ja energiatehokkuuteen liittyviin investointeihin uudella teknologialla 40 % ja tavanomaisella

teknologialla 30 %. Pienvesivoimalan ohjeellinen tukiprosentti vuodelle 2013 on työ- ja elinkeinoministeriön mukaan 15 – 20 %.

Tuen saamisen edellytyksenä on hakemuksen toimittaminen paikalliseen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukseen, jonka alueella investointi tai selvityshanke sijaitsee. Mutta jos hanke toteutetaan useammalla paikkakunnalla, hakemus toimitetaan hakijan kotipaikan ELY-keskukseen. Tärkeintä on muistaa, että tukea tulee hakea ennen hankkeen aloittamista.

Tuulivoimalla tai vesivoimalla tuotettua sähköä tuetaan energialainsäädännön hallituksen esityksen (120/2006) mukaisella verotuella kun voimalaitoksen nimellisteho on enintään yksi megavoltttiampeeri. Tuen perusmäärä on 0,42 s/kWh ja se maksetaan jälkikäteen sähkön tuottajalle. Tukea on vuosittain myönnetty vajaa 45 miljoonaa euroa vuosina 2004 - 2005.

## **10.2 Maksut**

Sähköverovelvollisuus eli sähkön valmisteveroa ja huoltovarmuusmaksua on laissa (1260/1996) velvoitettu suorittamaan sähköntuottaja, mutta jos sähköä tuotetaan enintään 50 kilovoltttiampeeria tai tuotetaan yli 50 kVa, mutta alle 2000 kVa eikä sitä siirretä verkkoon. Valmistevero on porrastettu kahteen veroluokkaan: veroluokkaan kaksi kuuluvat teollisuus ja ammattimainen kasvihuoneviljely, kun taas kaikki muut, pienvesivoima mukaan luettuna, kuuluvat luokkaan yksi. Tulli vastaa valmisteverotuksen toimittamisesta ja valvonnasta. Tullin taulukon mukaan veroluokka ykkösen sähkön energiavero on 1,69 senttiä/kWh ja huoltovarmuusmaksu on 0,013 senttiä/kWh vuoden 2013 alusta alkaen.

## **10.3 Ilmaston muutoksen vaikutus vesivoimaan**

Kannattavuuteen vaikuttaa tietenkin kuinka paljon voidaan turbiinin läpi ajaa vettä. Hyvinä vuosina vettä tulee runsaasti, joten sitä on tarjolla. Vettä täytyy sataa kuitenkin oikeaan aikaan, muuten siitä ei ole hyötyä jos se joudutaan ohijuoksettamaan. Jos vettä tulee kesäisin enemmän, se saadaan suoraan käyttöön, kun taas talvella kasvava sadanta lisää



kevättulvaa ja siten ohijuokсутusta. Ilmastomallien perusteella sademäärä lisääntyy tulevaisuudessa ja sillä on suora vaikutus vesivoimalaitoksen tulokseen.

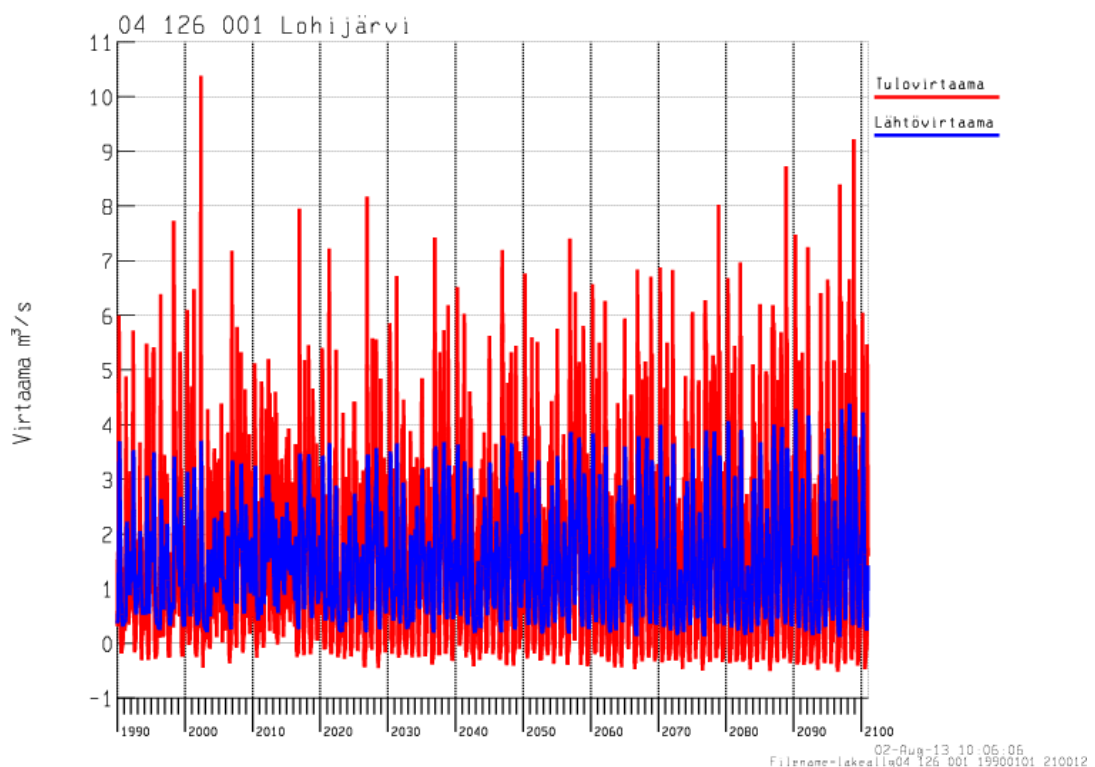
Jokien virtaamien ja järvien vedenkorkeuksien vaihtelu tulee merkittävästi muuttumaan tulevaisuudessa. Etelä- ja Keski-Suomessa lumen sulamistulvien suuruus pienenee merkittävästi johtuen lauhemmista talvista. Aikaistuvan kevään ja kasvavan haihdunnan vuoksi kesän vedenkorkeudet alenevat useissa järvissä. Aleneman määrään vaikuttaa järvikohtainen järvihaihdunnan voimakkuus. Alkusyksy tulee olemaan kuivaa, mutta syksyn sateiden lisääntyessä loppusyksyn virtaamat tulevat kasvamaan. Talvisin suurempi osuus sateista tulee vetenä ja lunta sulaa talven aikana enemmän, joten vedenkorkeudet ja virtaamat kasvavat selvästi. Talven virtaamien ja vedenkorkeuksien muutokset ovat Etelä- ja Keski-Suomessa suurimpia, kun taas Pohjois-Suomessa talvi säilyy lumisena pitempään. Lähivuosisikymmeninä muutokset ovat selkeitä Etelä- ja Keski-Suomessa, kun Pohjois-Suomessa ne ovat melko pieniä. (Veijalainen, et al., 2012)

Monien järvien säännöstelyluvut tulevat olemaan aikaansa jäljessä ilmaston muuttuessa. Säännöstelyluvut, jotka ovat kalenteriin sidottuja, ovat liian joustamattomia niiden perustuessa menneisiin hydrologisiin olosuhteisiin. Lupien lähtökohtana oli kevään lumien sulamistulvan pienentäminen ja vesivarastojen syksyinen täyttäminen talvea varten. Veijalaisen et al. raportissa todetaan, että tarkastelluissa vesistöissä vuosina 2040 – 2069 vesivoiman tuotanto lisääntyy keskimäärin 8 %. Ohijuokсутusten määrä kuitenkin kasvaa, koska virtaamien muutokset ei jakaannu tasaisesti ympäri vuoden. Liian korkeista tai matalista vedenkorkeuksista aiheutuvat ongelmat lisääntyvät etenkin Saimaalla, Päijänteellä ja Oulujärvellä. Ilmaston muutoksesta johtuva talvialeneman pieneneminen saattaa kuitenkin vaikuttaa positiivisesti rantavyöhykkeeseen, pohjaeläimistöön ja syyskutuisiin kaloihin. (Veijalainen, et al., 2012)

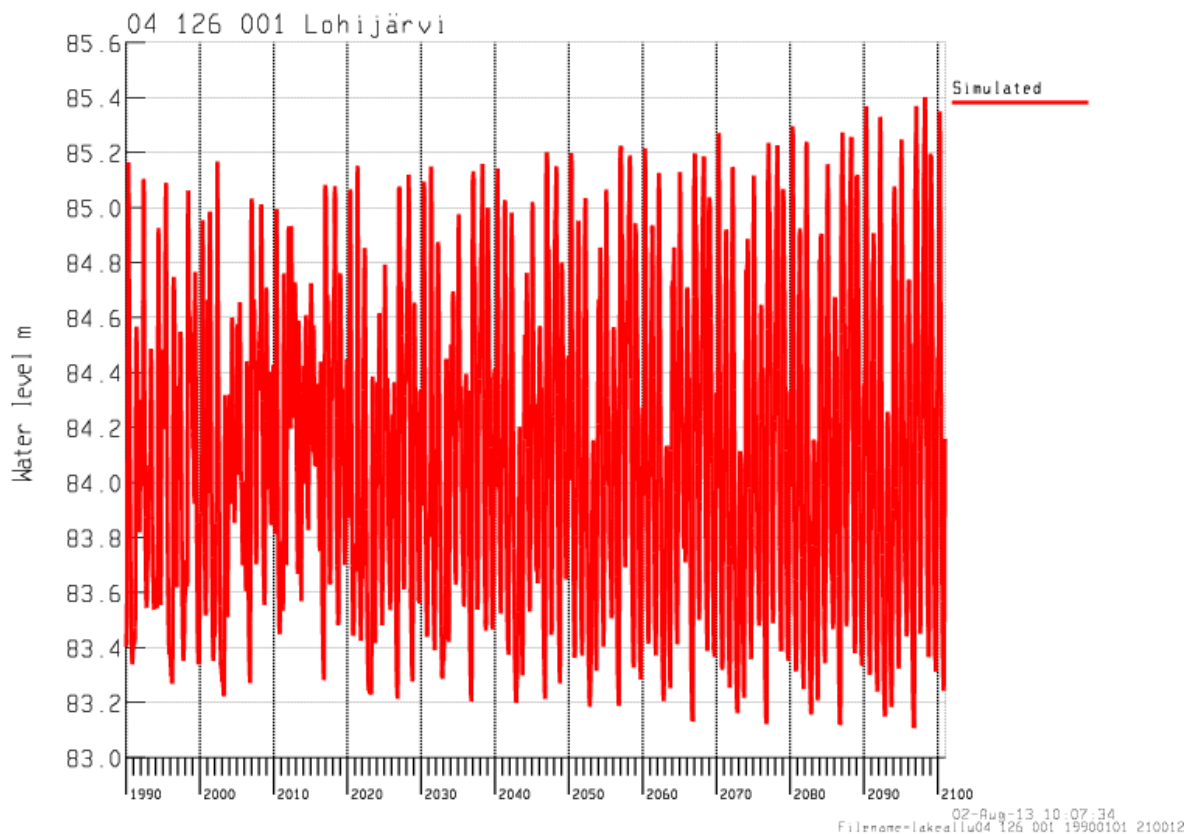
Tulvat kasvavat syksyisin ja talvisin vesistöissä, joissa nykyäänkin nämä tulvat ovat suuria, kun taas kevään sulamistulvat pienenevät johtuen lumen vähenemisestä. Liitteessä 10 esitetään vesistökohtaisesti ilmastonmuutoksen vaikutukset ja sopeutumismahdollisuudet. Ilmastonmuutoksen vaikutukset Vuoksen vesistön, jonka osa Lohijärvi on, järvien vedenkorkeuksiin vaihtelee eri puolilla vesistöä. Latvajärvissä talven ja alkukevään

vedenkorkeudet nousevat ja touko - kesäkuussa vedenkorkeudet laskevat. Kesällä veden korkeudet joko laskevat tai pysyvät nykyisellä tasollaan. Nykytilanteessa latvajärvien vedenkorkeudet ovat alhaisimmillaan talvella ja alkukevällä. Kevättulvat tullevat pienemmän ja syksyn tulvat kasvamaan. Suurilla järvillä talven ja alkukevään vedenkorkeudet nousevat, mutta kesän ja alkusyksyn vedenkorkeudet laskevat. Talvitulvat lisääntyvät ja tulevat nousemaan nykyisiä kevättulvia suuremmiksi. (Veijalainen, et al., 2012)

Lohijärvestä ei ole hydrologia havaintoja, joten lasketut virtaamat ja vedenkorkeudet perustuvat alueen keskimääräiseen valumaan. Mallissa olevat virtaamat perustuvat ympärillä olevien alueiden käyttäytymiseen, joten niissä on paljon epävarmuutta. Lisäksi Lohijärven mallin parametrit ovat hyvin paljon erilaiset kuin naapurialueilla, mistä syystä valuntaprosessi näyttäytyisi käyttäytyvän hitaammin kuin naapurialueilla. Vedenkorkeuden vaihtelu alueen pienissä järvissä on sovitettu niin että varastoitumisesta aiheutuva viipymä hidastaa veden kulkemista niin että alapuolisen vesistön tulovirtaama vastaa havaintoja. Vedenkorkeuden vaihtelu on siis hyvin epävarma. Alla on ympäristökeskukselta saadut simuloitunut arvot virtaamasta ja vedenkorkeudesta.



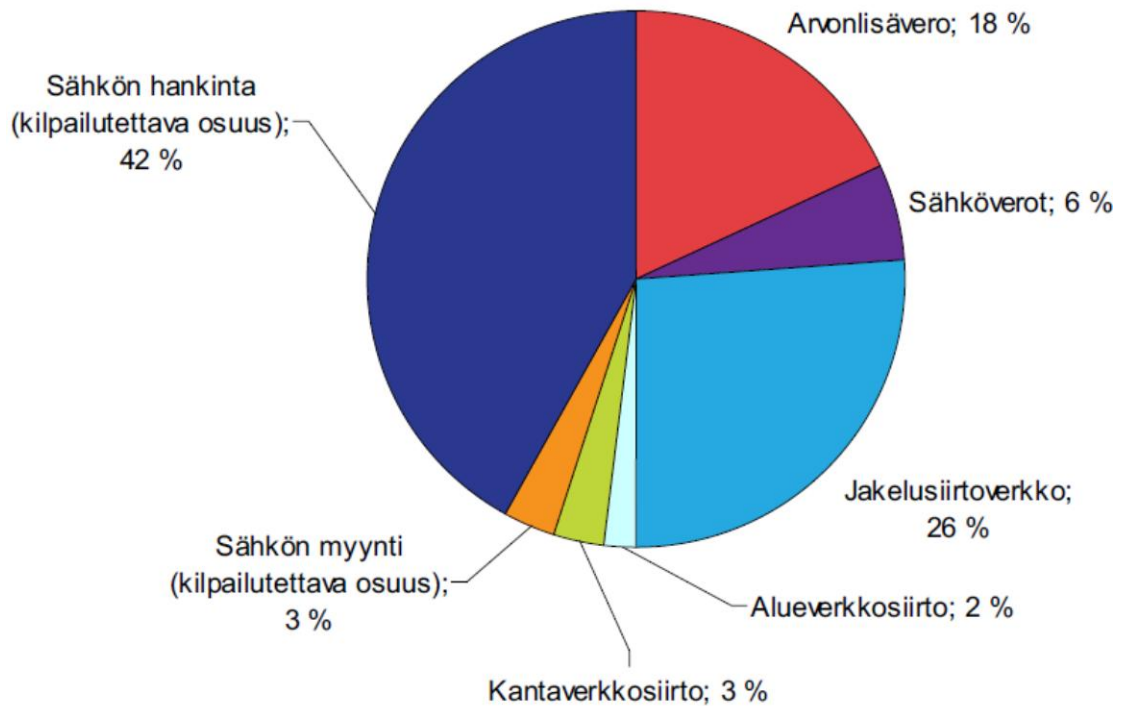
Kuva 10.1: Lohijärven simuloitunut virtaamat vuosina 1990 - 2100.



Kuva 10.2: Lohijärven simuloitu vedenkorkeus vuosina 1990 - 2100.

## 10.4 Sähkömarkkinat

Sähkön tuotannossa tuotto riippuu sähköhinnasta ja sähkönhinta riippuu markkinoista. Asiakkaalle, eli sähkökäyttäjälle, hinta muodostuu sähköenergian hankinnan kustannuksista, sähkön siirron kustannuksista ja veroista. Kun pienteollisuusyritys on asiakkaana, sähkön hankinnan osuus on 42 % koko sähkön hinnasta. Loput hintaan vaikuttavat tekijät voi katsoa alla olevasta kuvasta. Hankintahinta muodostuu sähköenergianhinnasta ja sähkön myyntityön kustannuksista. Siirtohintaa koostuu sähkön siirron kustannuksista kanta-, alue- ja jakeluverkossa. Kokonaiskustannuksista sähköenergian osuus on runsas kolmannes, siirron osuus vajaa kolmannes ja loput koostuu veroista. (Partanen, et al., 2011)



Kuva 10.3: Pienteollisuusyrityksen sähkön hinnan muodostus 1.9.2006. (Yritysten energiaopas, 2009)

Sähkön siirrosta vastaa kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj, jonka vastuulla on sähkövoimajärjestelmän toimintavarmuus. Koska sähkönkulutus on paikkaan sidottua eikä sähkönsiirtoverkkoa voi muuttaa, sähkön siirto on monopolitoimintaa. Sähkön alue- ja jakeluverkkotoiminnasta vastaavat verkkoluvan saaneet verkkoyhtiöt, joiden tehtäviin kuuluu verkoston ylläpito, käyttö ja kehittäminen. Sähkön siirrossa ja jakelussa käytetään pistehinnoittelua, mikä tarkoittaa että saman jakeluverkon alueella samantyyppiset käyttäjät maksavat sähkön siirrosta saman hinnan riippumatta käyttöpaikan sijainnista. Käyttämänsä sähkön käyttäjä voi hankkia vapaasti Suomen alueelta. Sähkönjakeluverkkoliiketoiminnalle sallitaan kohtuullinen tuotto – liiketoiminta on säädeltyä monopoliliiketoimintaa. ”Siirtohinnoittelun kohtuullisuutta valvoo Energiamarkkinavirasto.” (Partanen, et al., 2011)

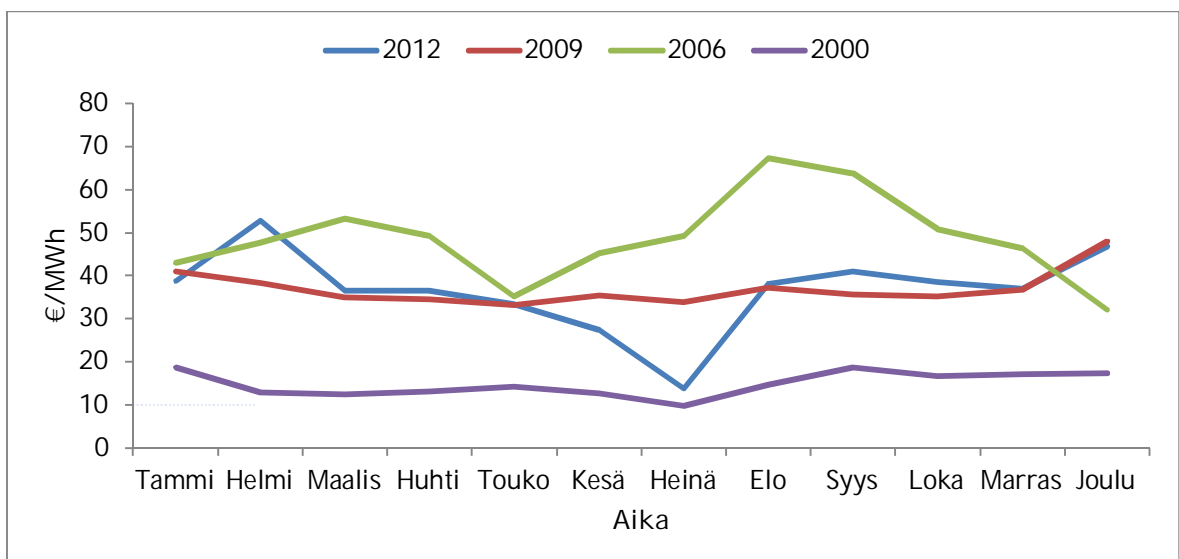
Sähkön tukkukauppaa käydään sähköpörssissä ja pörssin ulkopuolella tapahtuvana sähkön ostona ja myyntinä – OTC-markkinoilla (Over the Counter). Eli sähköä voidaan myydä pörssiin sekä kahdenvälisin sopimuksin suurasiakkaille ja vähittäismyyjille. Vähittäismyyjinä voivat toimia paikalliset ja alueelliset sähköyhtiöt tai niiden yhteenliittymät. Sähköpörssissä sähkön hinta määräytyy kysynnän ja tarjonnan määräämän

markkinahinnan mukaan. Pohjoismaissa sähköpörssi on nimeltään Nord Pool, joka jakaantuu fyysisistä markkinoista vastaavaan Nord Pool Spot AS:ään ja finanssimarkkinoista vastaavaan Nord Pool ASA:an. (Yritysten energiaopas, 2009)

Sähkön fyysiset pörssimarkkinat jakaantuvat kahteen eri markkinaan: Elspot-markkina ja Elbas-markkina. Elspot-markkinoilla käydään kauppaa fyysisestä sähkötoimituksesta seuraavalle päivälle. Elbas-markkinat on vuorokauden sisäinen jälkimarkkina Elspot-kaupalle.

Elspot-markkinoilla kaupankäyntiin osallistuvat yritykset lähettävät nimettömät osto- ja myyntitarjouksensa päivittäin kello kolmeentoista mennessä Nord Pool Spot:iin. Sähköpörssi yhdistää tarjoukset tunneittain ostokäyräksi ja myyntikäyräksi, jonka leikkauspisteessä, tasapainopisteessä, olevaa hintaa kutsutaan systeemihinnaksi. (Yritysten energiaopas, 2009)

Kuvassa 10.4 nähdään kuinka voimakkaasti sähkönhinta on vaihdellut Suomessa eri vuosina ja eri kuukausina. Talvisin sähkön kysyntä kasvaa ja tuotantokapasiteettia otetaan enemmän käyttöön. Jos kysynnän ja tarjonnan välillä esiintyy radikaaleja muutoksia, tukkuhinnassa voi näkyä suuria piikkejä.



Kuva 10.4: Suomen alueen kuukausittainen sähkön hinta sähköpörssissä. Hinnat €/MWh. (Nordpool Spot, 2013)

Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla sähkön hintakehitys on voimakkaasti riippuvainen Norjan vesivaroista, koska suuri osa sähköstä tuotetaan vesivoimalla. Sähköpörssissä on käytössä aluehintamekanismi, jolloin sähköpörssi laskee systeemi-hinnan koko alueelle ja aluehinnat, joihin vaikuttaa siirtoverkon rajoitukset. Euroopan Unionin tarkoituksena on luoda yhtenäinen eurooppalainen sisämarkkina ja pörssi sähkölle, mutta esteenä on riittämätön sähkönsiirtoverkko. (Partanen, et al., 2011)

Pienvesivoiman tuotannossa tuottaja ei voi vaikuttaa itsenäisillä sähkömarkkinoilla muodostuvan sähkön tukkuhintaan. Sähkön hinnan vaihtelu aiheuttaa suuria riskejä, sillä investointi on kallista tuotettuun sähkön määrään verrattuna.

Sähköntuottajan kannalta hinta riippuu kenelle sähkön myy ja hinta on täysin sopimuskohtaista.

## 11 TARJOUSTEN VERTAILU

Kappaleessa 5.3 arvioidun pysyvyyskäyrän perusteella keskivirtaamaksi arvioidaan  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , putouskorkeuden arvioidaan asettuvan suurimmaksi osaksi vuotta korkeuksien 6 ja 6.5 metriä välille, joten se olkoon 6.3 metriä. Oletetaan lisäksi koko laitteiston hyötysuhteeksi 80 %, jolloin tuotettu sähköteho on liki 99 kilowattia. Kun käytetään 7600 tunnin huipunkäyttöaika, vuosituotannoksi tulee noin 715 150 kWh. Tämä on suuri parannus nykyiseen 360 000 kilowattitunnin tuotantoon.

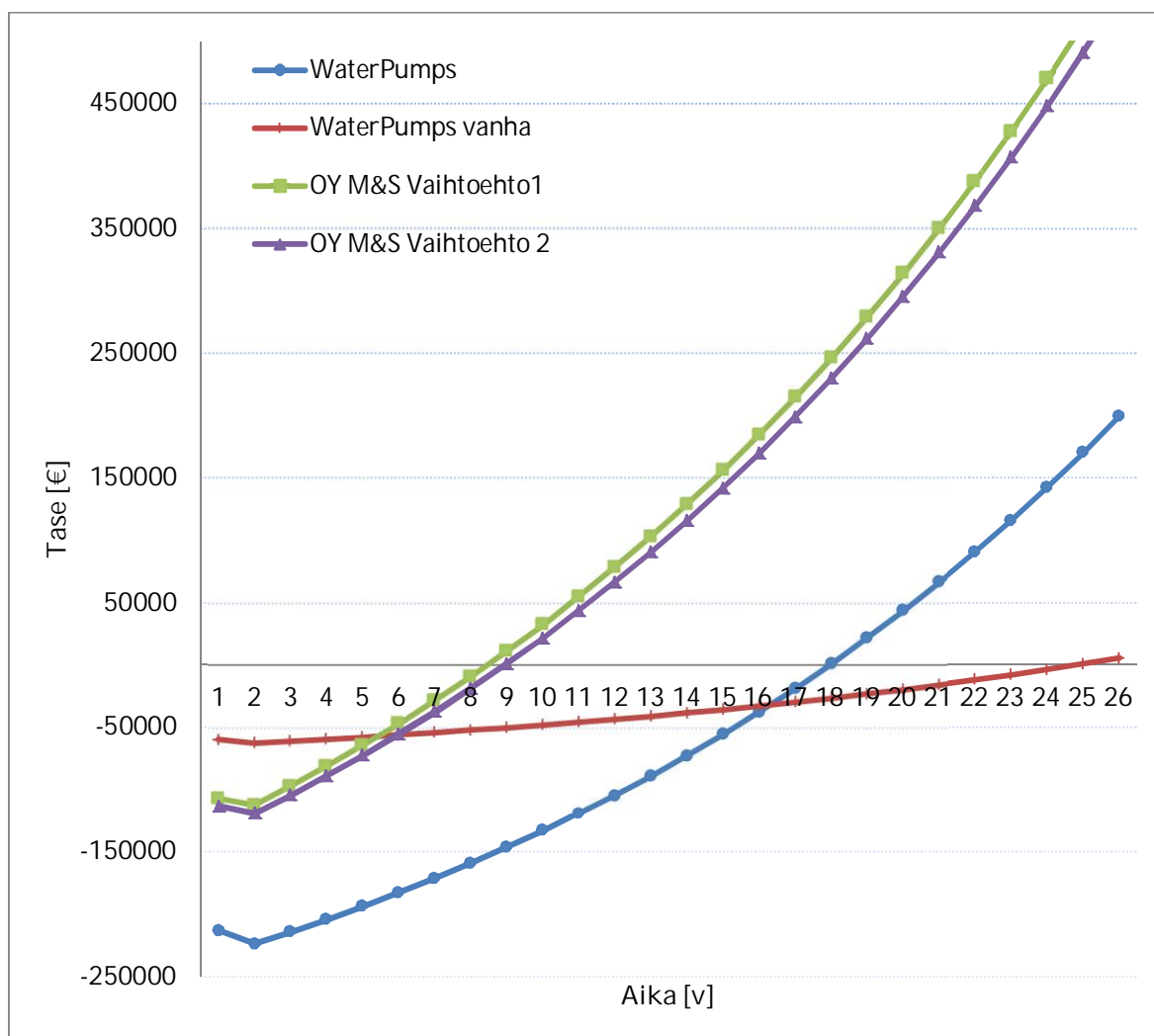
Vaikka sähköä käytetään omaan käyttöön, on vaikea arvioida tyypillistä kulutusta ilman mittauksia, joten oletetaan kaiken sähkön myytävän verkkoon. Sähkö siirretään Suur-Savon Sähkön verkkoon, jolloin siirtomaksu on Järvi-Suomen Energialla 1 s/kWh. Energiatueksi oletetaan 18 % ja loput investoinnista oletetaan kustannettavan lainalla, jonka laskentakorkona käytetään kiinteää 5 prosenttia. Kiinteisiin kustannuksiin sisältyy 131,4 €/kk perusmaksu ja ylläpitomaksu, joka on 100 kV liittymäkoolle 471,20 € kuukaudessa. Muuttuviin kustannuksiin kuuluu jo edellä mainittu siirtomaksu, sähkön valmistevero ja voimalaitoksen huoltokustannukset. Huoltokustannusten oletetaan olevan 1 sentti kilowattitunnilta. Sähkön hintana käytetään 7 senttiä/kWh. WaterPumps Oy:n vanhassa tarjouksessa tarjotaan kahta 21 kilowatin turbiini generaattori yhdistelmää, joten se ei ole kilpailukykyinen verrattuna uusiin tarjouksiin, joissa konetehto on mitoitettu kahden kuution keskivirtaamaan. Alla olevassa kalkyyli-aulukossa uudet tarjoukset on laskettu 99 kilowatin konetehon perusteella ja vanha tarjous 42 kilowatin perusteella. Tarjousten annuiteettitaulukot löytyvät liitteestä 3.

Taulukko 11.1: Kahden eri konevaihtoehdon kalkyyli.

Laitetehto [kW]:	99	42
Tuotto [€v]:	55763,12	23684,64
Muuttuvat kustannukset [€v]:	27828,95	11819,98
Käyttökate [€v]:	27934,16	11864,66
Kiinteät kustannukset [€v]:	7231,2	7231,2
Tulos [€v]	20702,96	4633,464

Laitostoimittajilta saadut tarjouksista laskettiin takaisinmaksuajat, joiden käyrät ovat nähtävillä kuvassa 11.1. Takaisinmaksun vertailukäyrä on kokonaan nähtävillä liitteessä 5.

Kuten kuvasta 11.1 nähdään WaterPumps maksaa itsensä takaisin 18 vuoden päästä, OY M&S:n vaihtoehto 1 maksaa itsensä takaisin 8 vuoden jälkeen ja toinen vaihtoehto 9 vuoden päästä investoinnista. Vertailukohtaksi otettu WaterPumpsin vanhan tarjouksen takaisinmaksuaika on noin 29 vuotta. Rakentamisen aikataulua ei tietenkään voi tietää, mutta rakentamisen voidaan olettaa kestävän jonkin aikaa, joten ensimmäiseltä vuodelta ei oleteta saavan tuottoa.

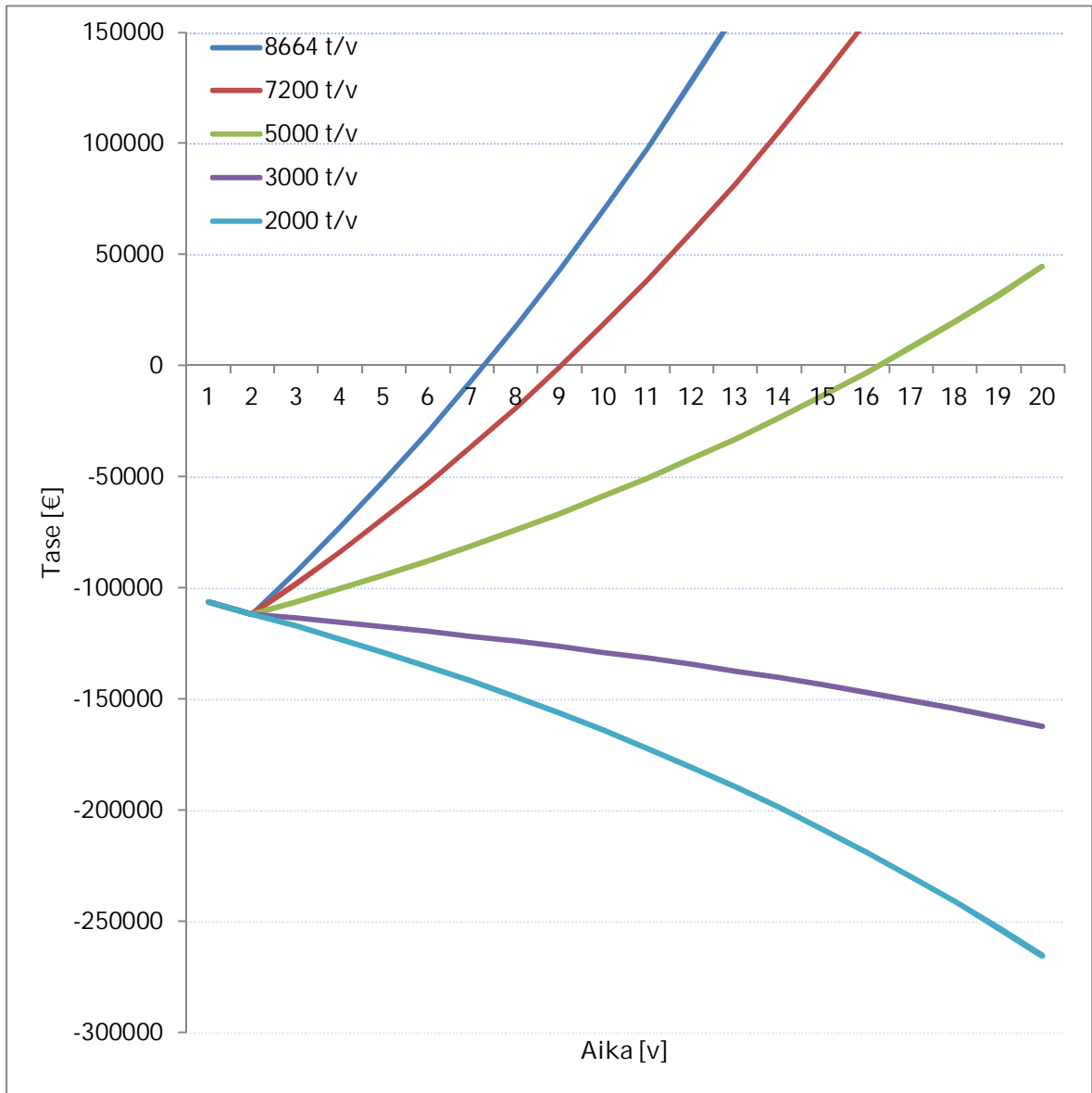


Kuva 11.1: Eri vaihtoehtojen takaisinmaksuajat.

Tulokseen vaikuttaa tietenkin voimalaitoksen käyttökerroin, eli kuinka paljon laitos tekee sähköä sen kapasiteetista. Jos on huono vesivuosi eikä sada paljoa, niin virtaama on pieni ja vedenkorkeus on matalalla. Hyvänä vesivuotena, riippuen sadannasta ja sen ajoittumisesta virtaama on suuri ja vedenkorkeus koholla. Kuvassa 11.2 on vertailtu eri



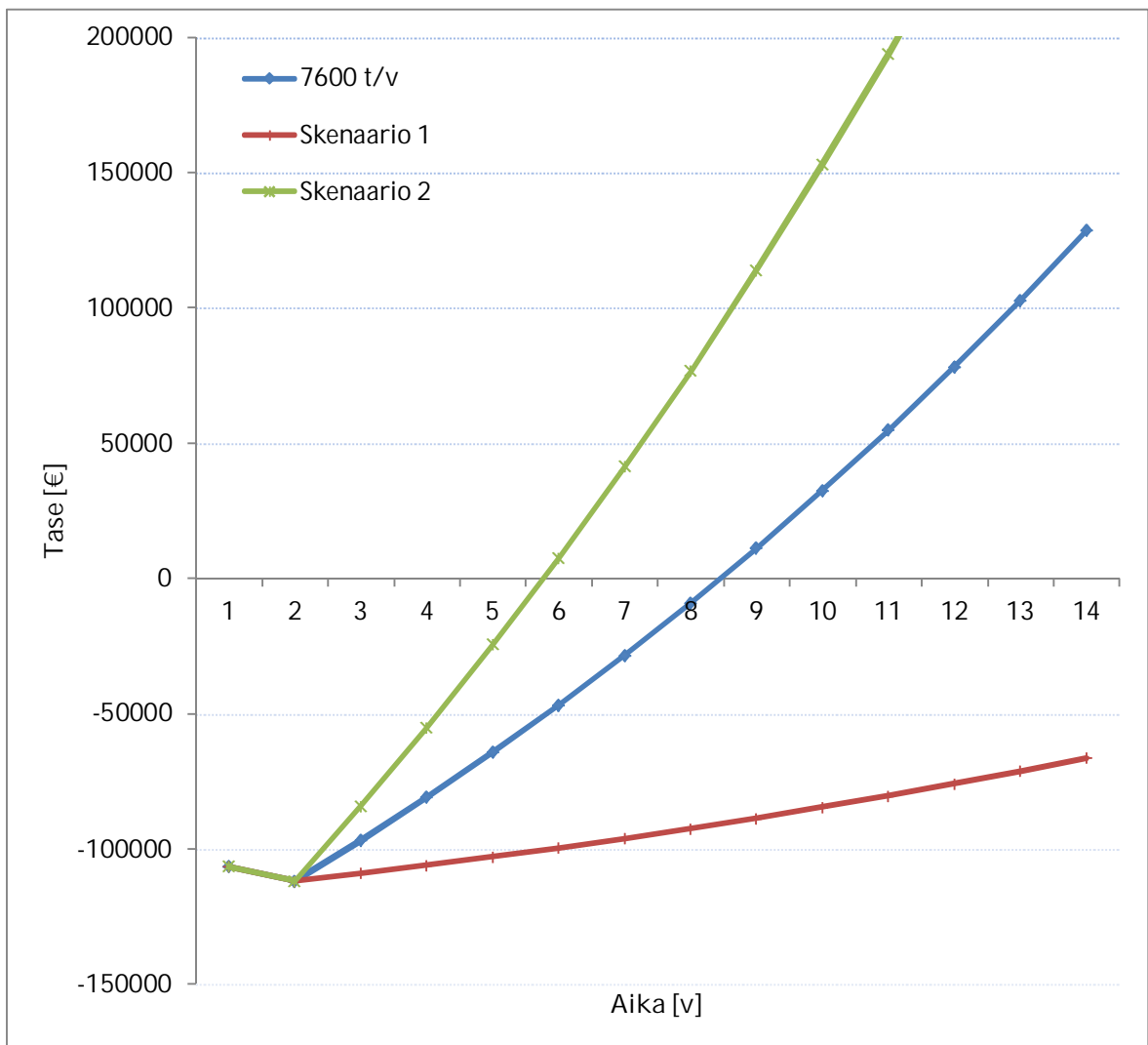
huipunkäyttöaikojen vaikutusta takaisinmaksuaikaan ja kuvassa 11.3 on nähtävillä herkkyystarkastelu eri skenaarioilla. Molemmissa on otettu tarkasteltavaksi kohteeksi OY M&S:n tarjous vaihtoehto 1.



Kuva 11.2: Eri huipunkäyttöaikojen vaikutus takaisinmaksuaikaan OY M&S:n vaihtoehdolla 1.

Kun laitos on tuottamassa vuodessa 8664 tuntina tehoa, kuten vuonna 2012 voimalaitos tuotti, takaisinmaksuaika on hieman alle 7 vuotta. 7200 tunnilla hieman alle 9 vuoteen ja 5000 tunnilla hieman alle 16 vuoteen investointi on maksanut itsensä takaisin. Jos taas käyttötunnit ovat vähemmän kuin noin 3490 tuntia, investointia ei pysty maksamaan takaisin.

Jos sattuu vuosi, jolloin sadanta on huonoa ja laitteistossa ongelmia mikä tarkoittaa keskitehon laskua tuntuvasti ja runsaasti alasajoja. Skenaariossa 1 keskiteho laskee 70 kilowattiin ja laitos on käytössä vain 6000 tuntia. Hyvänä vuonna alasajoja ei ole ja sadanta on todella runsasta. Skenaariossa 2 keskiteho nousee 125 kilowattiin ja laitos on käytössä 8688 tuntia. Kuten kuvasta 11.3 nähdään, jo tässä kokoluokassa ääripäiden ero on todella suuri. Skenaario 1 ei ole mahdollinen, sillä sen 25 vuoden takaisinmaksuaikana pitäisi kaikki 25 vuotta olla surkeita. Skenaario 2 ei myöskään ole realistinen, sillä siinä keskivirtaaman pitäisi pysyvästi nousta 25 % suuremmaksi.



Kuva 11.3: Herkkyystarkastelu.

## 12 YHTEENVETO

Vaikka aiemmin pienvesivoimalan uusintaa ei ole pidetty taloudellisesti järkevänä, sitä ei ole kuitenkaan unohdettu. Vanhastaan ensimmäisenä varsinaisena mekaanista energiaa tuottavana koneena pienvesivoima on tekemässä uutta nousuaan. Pienvesivoimaa tuetaan ja sen imagovaikutus on näin vihreän energian lisäämisen aikaan suuri. Usein uusimiseen vaikuttavat tekijät eivät rajoitu vain taloudellisiin tekijöihin vaan myllypaikalla on suuri merkitys alueen asukkaille ja paikan omistajille.

Jos hankkeeseen vaikuttaa vain hinta, niin halvin tarjous on tietenkin voittava. Toisaalta hankkeen kokonaishintaa ei tiedetä, koska laitteistoinvestointi on vain osa kustannuksista. Mutta jokainen tarjous pitää käsitellä omanaan ja muistaa että rakennuskustannuksia ei ole arvioitu.

Sähkön hinnalla on paine kasvaa tulevaisuudessa muun muassa päästökaupan vuoksi, joten tuoton pitäisi olla nouseva tulevaisuudessa. Sadannan pitäisi lisääntyä tulevaisuudessa ja sadannan jakauman pitäisi olla positiivinen vesivoiman kannalta. Joten tästäkin syystä tuoton oletetaan lisääntyvän. Rakennuskustannusten oletetaan myös nousevan ja raaka-aineiden hinnat tullenevat myöskin nousemaan. Tämän hetkinen taantuma loppuu joskus, mutta miten se vaikuttaa kustannuksiin, on vielä epäselvää.

Laitteiston uusinta tulee nostamaan tuottoa ainakin 50 prosenttia, joten uusinta on järkevintä tehdä. Mikäli omaa käyttöä pystytään lisäämään, hankkeen kannattavuus kasvaa huomattavasti ja jos itse voidaan käyttää tuotettu sähkö, on uusinta huomattavan järkevä. Lisäksi laitteisto on uusittava jossain vaiheessa tulevaisuutta turbiinin suuren iän vuoksi.

Kun otetaan huomioon, että parantaminen koostuu muustakin kuin laitteiston uusinnasta niin hanke tuo jatkuvuutta Lohikosken Myllyn toiminnalle. Osakkaat saattavat jopa aktivoitua paremmin ja tuoda omaa osaamistaan esille kun toiminnalle on selvät suuntaviivat ja myllyä kehitetään.

## LÄHDELUETTELO

Aalto Yliopisto, 2011. *Kemian laitetekniikka I Osa 2 Virtaustekniikka*.

Aura, L. & Tonteri, A. J., 1996. *Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet*. Werner Söderström Osakeyhtiö.

Barna, P. S., 1971. *Fluid Mechanics for engineers*. Butterworth & Co. (Publishers) Ltd.

Douglas, J. F., Gasiorek, J. M. & Swaffield, J. A., 1995. *Fluid Mechanics*. Addison Wesley Longman Limited.

Energiateollisuus, 2012. *Uusiutuvat energialähteet, edistyminen vs. tavoitteet vuoteen 2010 - Energiateollisuuden näkökulma*.

Energiateollisuus, 2013. *Vesivoima / Energiateollisuus*. [viitattu 4.7.2013]

Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet/vesivoima>

Fingrid, 2013. *Kulutuksen ja tuotannon tasapainon eli taajuuden ylläpito*. [viitattu 7.10.2013]

Saatavissa:

<http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimaj%C3%A4rjestelm%C3%A4nhallinta/kulutuksen%20ja%20tuotannon%20tasapainon%20yll%C3%A4pito/Sivut/default.aspx>

Fingrid, 2013. *Sähkömarkkinat. Sähkön kulutus ja tuotanto*. [viitattu 26.11.2013]

Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/kulutus-ja-tuotanto/Sivut/default.aspx?beginDate=20130101&endDate=20130101&showChart=1&showTable=0>

<http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/kulutus-ja-tuotanto/Sivut/default.aspx?beginDate=20130101&endDate=20130101&showChart=1&showTable=0>

Gilkes, 2013. *Hydropower Pelton Turbines*. [viitattu 1.12.2013]

Saatavissa: <http://www.gilkes.com/Pelton-Turbines>

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S., 2008. *Voimalaitostekniikka*. Opetushallitus.

Hultin, S. O. & Koskinen, M. O., 1975. *Suomen energiahuolto. Tekniikan käsikirja, osa 4*. Jyväskylä: K.J. Gummerus Oy.

Jaatinen-Värri, A., 2013. *Pumput, puhaltimet ja kompressorit*. Lappeenta University of Technology.

Joronen, T., Kovács, J. & Majanne, Y., 2007. *Voimalaitosautomaatio*. Helsinki: Suomen Automaatioseura ry.

Kauppa- ja teollisuusministeriö energiaosasto, 2005. *VESIVOIMATUOTANNON MÄÄRÄ JA LISÄÄMISMAHDOLLISUUDET SUOMESSA*. Helsinki.

Kinttula, M., 2008. *PIENVESIVOIMAN ELVYTYS, KÄYTTÖÖNOTTO JA KANNATTAVUUS*. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto.

Korhonen, J., 2007. *Hydrologinen vuosikirja 2001-2005*. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.

Larjola, J., 2008. *Uusiutuva energia. Luento 3: Vesivoima II - Vesiturbiinityypit ja niiden toiminta*, Lappeenranta: Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto.

Lindh, T., 2012. *Häiriöt ja kohina. Mittaus- ja automaatiotekniikan perusteet, L6 ja L7*. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto.

Nivus, 2011. *Instruction Manual for portable Flow Measurement Device PCM 4*.

Nivus, 2012. *Installation Instruction for Correlation and Doppler Sensors*. Eppingen: Nivus.

Nordpool Spot, 2013. *Elspot prices*. [viitattu 22.11.2013]

Saatavissa: <http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/ALL1/Hourly/>

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, 2004. Choice of turbine. *TEP4195 Turbomaskiner*.

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, 2006. Kaplan turbine. *TEP4195 Turbomaskiner*.

Oy Vesirakentaja, 2007. *Voimaa vedestä 2007 Selvitys vesivoiman lisäämismahdollisuuksista*. Energiateollisuus.

Partanen, J. ym., 2011. *Sähkömarkkinat - opetusmoniste*. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto..

Perttula, J., 2000. *Energiatekniikka*. Porvoo: Werner Söderström Osakeyhtiö.

Pienvesivoimayhdistys ry, 2009. *Pienvesivoimaopas*. Pienvesivoimayhdistys ry.

Reunanen, A., 1998. *Vesivoimalaitoksen imuputken optimointi suunnittelupisteen ulkopuolella*. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.

Ryti, H. ym., 1975. *Tekniikan käsikirja 4*. Jyväskylä: K.J. Gummerus osakeyhtiö Jyväskylä.

Suurpadot-Suomen osasto Ry, 1991. *Voimaa koskesta. Suomen vesivoiman rakentamisen vaiheita*. Imatra: Suurpadot-Suomen osasto Ry.

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2013. *Energiatuki*. [viitattu 29.11.2013]

Saatavissa: <http://www.tem.fi/energia/energiatuki>

Veijalainen, N. ym., 2012. *Suomen vesivarat ja ilmastonmuutos - vaikutukset ja muutoksiin sopeutuminen. WaterAdapt-projektin loppuraportti...*: Suomen ympäristökeskus (SYKE).

White, F. M., 2003. *Fluid Mechanics*. New York: McGraw-Hill.

VOITH, 2013. *Pelton turbines*. [viitattu 1.12.2013]

Saatavissa: [http://www.voith.com/en/2013-05-27\\_voith\\_pelton\\_turbines.pdf](http://www.voith.com/en/2013-05-27_voith_pelton_turbines.pdf)

VOITH, 2013. *VOITH Francis turbines*. [viitattu 1.12.2013]

Saatavissa: [http://www.voith.com/en/2013-05-27\\_voith\\_francis\\_turbines.pdf](http://www.voith.com/en/2013-05-27_voith_francis_turbines.pdf)

VOITH, 2013. *Voith Kaplan turbines*. [viitattu 1.12.2013]

Saatavissa: [http://www.voith.com/en/2013-05-27\\_voith\\_kaplan\\_turbines.pdf](http://www.voith.com/en/2013-05-27_voith_kaplan_turbines.pdf)

VTT Prosessit, 2004. *Energia Suomessa*. Helsinki: Edita Prima Oy.

Yritysten energiaopas, 2009. *Pohjoismaiset sähkömarkkinat*. [viitattu 22.11.2013]

Saatavissa:

[http://ek2.ek.fi/yritysten\\_energiaopas/fi/sahkon\\_hankinta/pohjoismaiset\\_sahkomarkkinat.php](http://ek2.ek.fi/yritysten_energiaopas/fi/sahkon_hankinta/pohjoismaiset_sahkomarkkinat.php)

Yritysten energiaopas, 2009. *Sähköpörssin fyysiset markkinat*. [viitattu 23.11.2013]

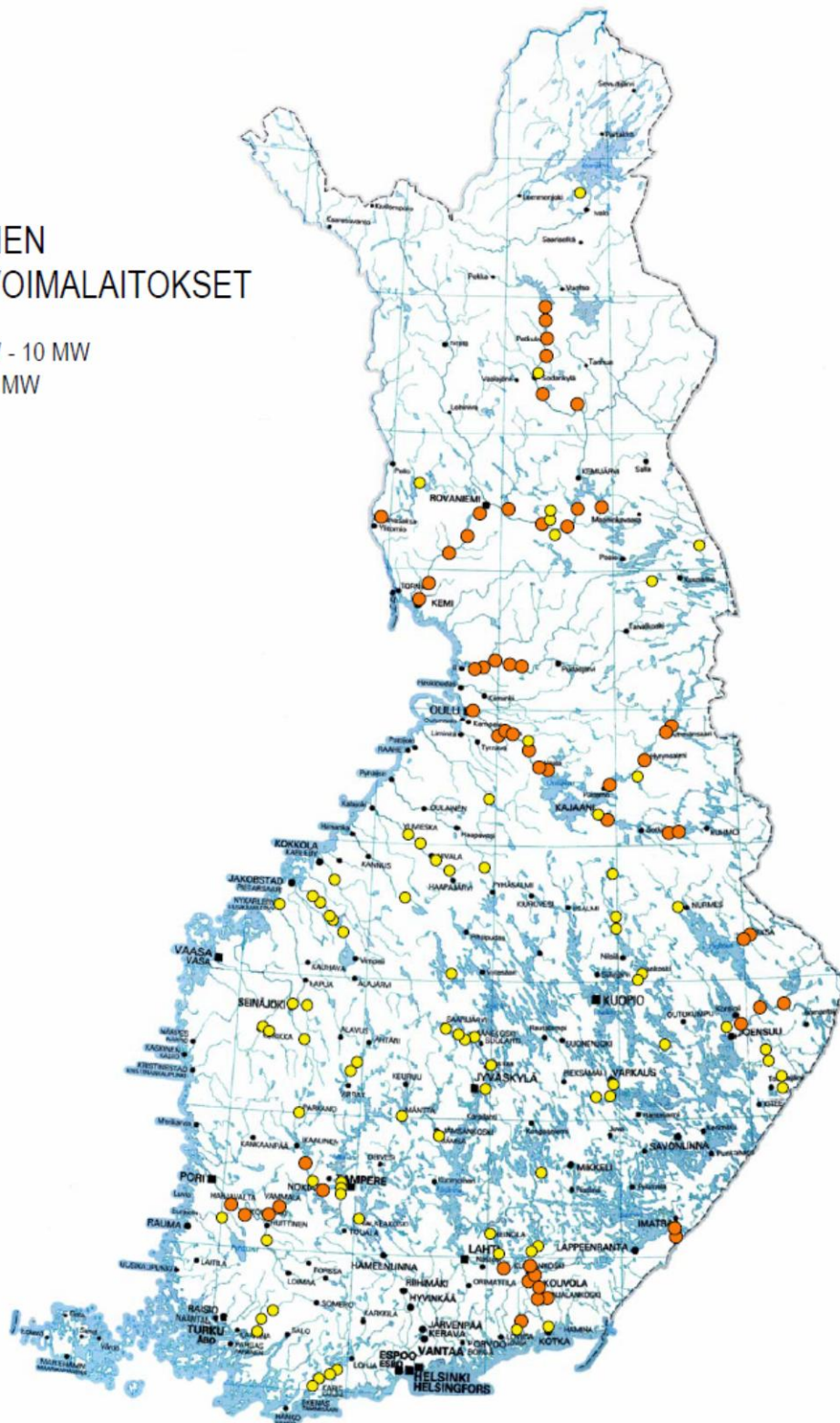
Saatavissa:

[http://ek2.ek.fi/yritysten\\_energiaopas/fi/sahkon\\_hankinta/sahkoporssin\\_fyysiset\\_markkinat.php](http://ek2.ek.fi/yritysten_energiaopas/fi/sahkon_hankinta/sahkoporssin_fyysiset_markkinat.php)

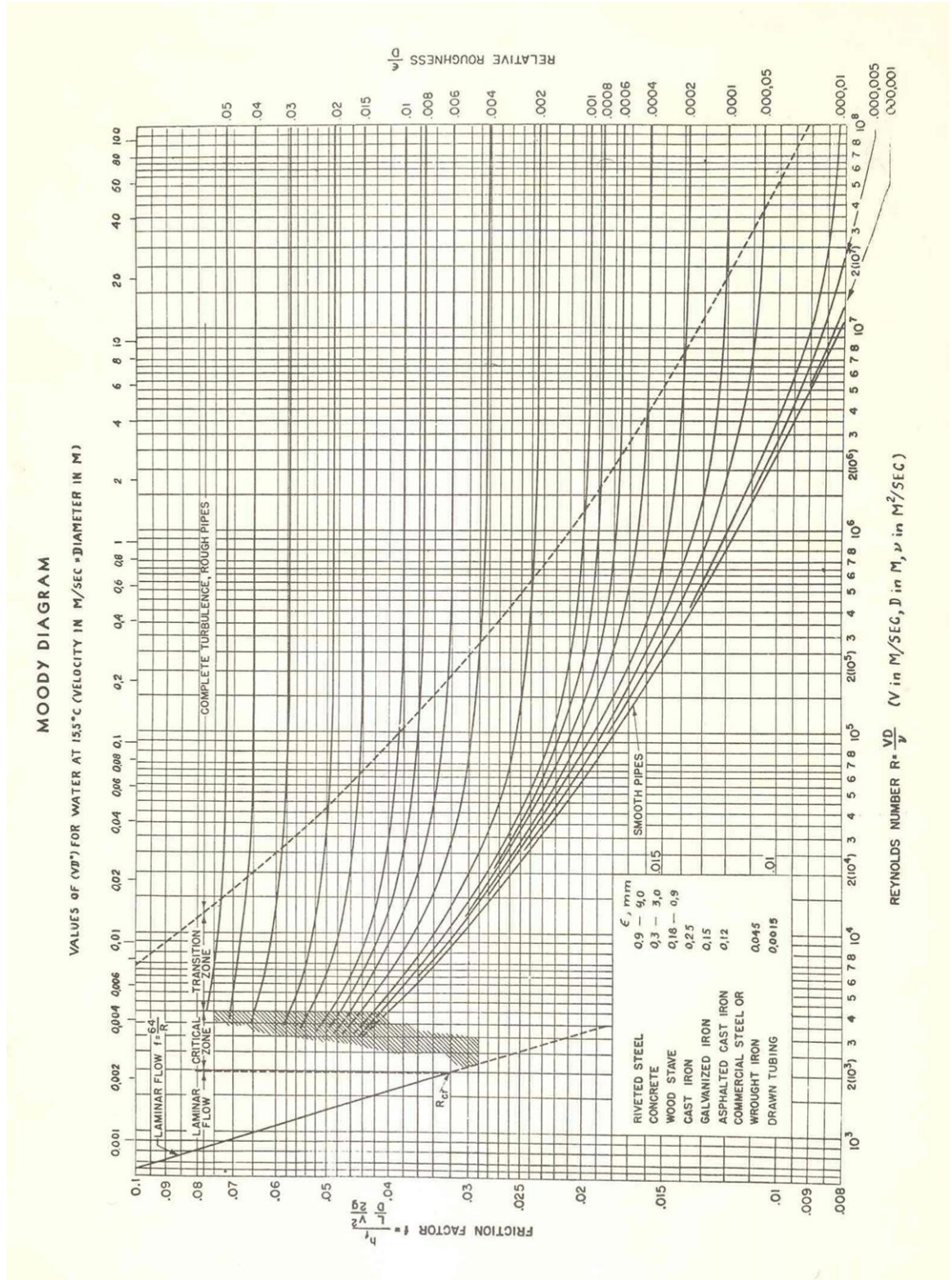
LIITE 1. Suomen yli yhden megawatin vesivoimalaitokset. (Kauppa- ja teollisuusministeriö energiaosasto, 2005)

## SUOMEN VESIVOIMALAITOKSET

- 1 MW - 10 MW
- yli 10 MW







LIITE 3. Tarjousten annuiteettitaulukot.

**WaterPumps Oy**

Vuosi	Laina [€]	Korko [%]	Korko [€]	Tuotto [€]	Tulos [€]
0	213200	5	10660	0	-213200
1	223860	5	11193	20703	-223860
3	214350	5	10717,5	20703	-214350
4	204365	5	10218,2	20703	-204365
5	193880	5	9693,99	20703	-193880
6	182871	5	9143,54	20703	-182871
7	171311	5	8565,57	20703	-171311
8	159174	5	7958,7	20703	-159174
9	146430	5	7321,49	20703	-146430
10	133048	5	6652,42	20703	-133048
11	118998	5	5949,89	20703	-118998
12	104245	5	5212,23	20703	-104245
13	88754	5	4437,7	20703	-88754
14	72488,7	5	3624,43	20703	-72489
15	55410,2	5	2770,51	20703	-55410
16	37477,7	5	1873,88	20703	-37478
17	18648,6	5	932,431	20703	-18649
18	-1121,9	5	-56,096	20703	1121,92
19	-21881	5	-1094	20703	21881

**WaterPumps Oy tarjous vuodelta 1994.**

Vuosi	Laina [€]	Korko [%]	Korko [€]	Tuotto [€]	Tulos [€]
0	65440,2	5	3272,01	0	-65440
1	68712,3	5	3435,61	4633,46	-68712
3	67514,4	5	3375,72	4633,46	-67514
4	66256,7	5	3312,83	4633,46	-66257
5	64936	5	3246,8	4633,46	-64936
6	63549,4	5	3177,47	4633,46	-63549
7	62093,4	5	3104,67	4633,46	-62093
8	60564,6	5	3028,23	4633,46	-60565
9	58959,3	5	2947,97	4633,46	-58959
10	57273,8	5	2863,69	4633,46	-57274
11	55504,1	5	2775,2	4633,46	-55504
12	53645,8	5	2682,29	4633,46	-53646
13	51694,6	5	2584,73	4633,46	-51695
14	49645,9	5	2482,3	4633,46	-49646
15	47494,7	5	2374,74	4633,46	-47495
16	45236	5	2261,8	4633,46	-45236

LIITE 3. Tarjousten annuiteettitaulukot.

17	42864,3	5	2143,22	4633,46	-42864
18	40374,1	5	2018,7	4633,46	-40374
19	37759,3	5	1887,97	4633,46	-37759
20	35013,8	5	1750,69	4633,46	-35014
21	32131,1	5	1606,55	4633,46	-32131
22	29104,2	5	1455,21	4633,46	-29104
23	25925,9	5	1296,29	4633,46	-25926
24	22588,7	5	1129,44	4633,46	-22589
25	19084,7	5	954,235	4633,46	-19085
26	15405,5	5	770,274	4633,46	-15405
27	11542,3	5	577,114	4633,46	-11542
28	7485,93	5	374,297	4633,46	-7485,9
29	3226,76	5	161,338	4633,46	-3226,8
30	-1245,4	5	-62,268	4633,46	1245,36
31	-5941,1	5	-297,05	4633,46	5941,09

**OY M&S POWER LTD tarjous 1.**

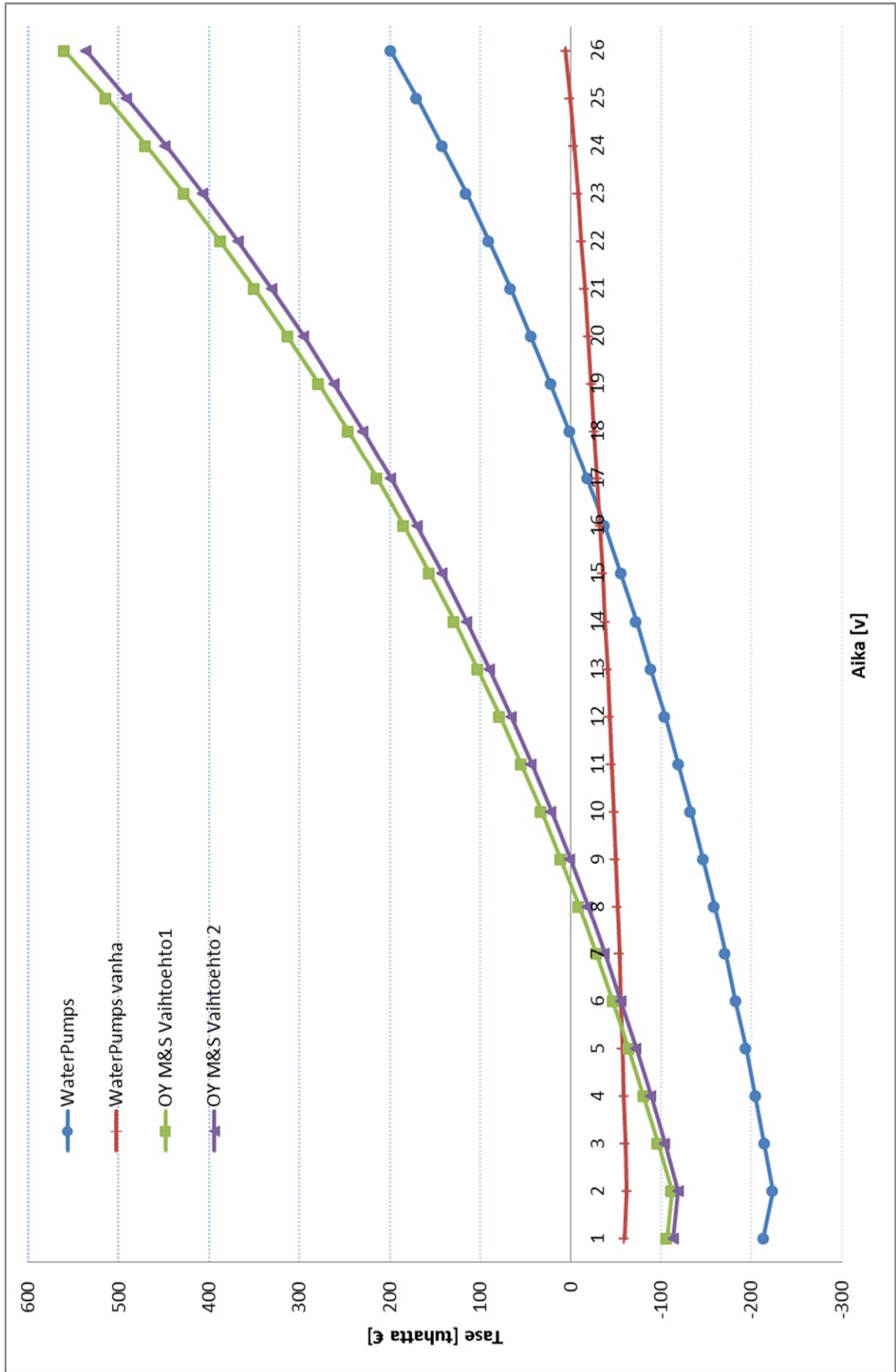
Vuosi	Laina [€]	Korko [%]	Korko [€]	Tuotto [€]	Tulos [€]
0	106510	5	5325,49	0	-106510
1	111835	5	5591,76	20703	-111835
3	96724,1	5	4836,2	20703	-96724
4	80857,3	5	4042,87	20703	-80857
5	64197,2	5	3209,86	20703	-64197
6	46704,1	5	2335,21	20703	-46704
7	28336,4	5	1416,82	20703	-28336
8	9050,22	5	452,511	20703	-9050,2
9	-11200	5	-560,01	20703	11200,2
10	-32463	5	-1623,2	20703	32463,2

LIITE 3. Tarjousten annuiteettitaulukot.

**OY M&S POWER LTD tarjous 2.**

Vuosi	Laina [€]	Korko [%]	Korko [€]	Tuotto [€]	Tulos [€]
0	113627	5	5681,37	0	-113627
1	119309	5	5965,44	20703	-119309
3	104571	5	5228,56	20703	-104571
4	89096,8	5	4454,84	20703	-89097
5	72848,7	5	3642,44	20703	-72849
6	55788,2	5	2789,41	20703	-55788
7	37874,6	5	1893,73	20703	-37875
8	19065,4	5	953,27	20703	-19065
9	-684,29	5	-34,215	20703	684,295
10	-21421	5	-1071,1	20703	21421,5

LIITE 4. Tarjousten takaisinmaksuajat.



### Lohikosken mylly

- 150 osakasta, joista 7-8 pääosakasta muodostaa äänienemmistön
- koskea hyödyntävää sähköntuotantoa pääasiallisesti; matkailua pienimuotoisesti

### Toimenpidesuunnitelma:

- 1) Yhden päivän työpaja, jossa fokusoidaan tarpeet ja etenemissuunnitelma. Työpajan kustannukset RCF-hankkeesta. Osallistujina RCF-hanke konsulttineen (2 hlöä) Lohikosken Myllyn edustajat (4-7 hlöä), LTY:n professori ja mahdollisesti jo tiedossa oleva DI-työn tekijä sekä Suur-Savon Sähkön edustaja. Yhteensä noin 10 hlöä. Työpaja antaa parhaat eväät DI-työn tekijälle. Jos tarvetta, toinen työpaja pidetään DI-työn puolivälissä.
- 2) Tehdään hakemus Suur-Savon Energiasäätiölle DI-työn rahoituksesta
- 3) Jos rahoitus saadaan, tehdään DI-työ, jossa selvitetään mm.
  - a) uuden sähkögeneraattorin hankinta (millainen, mistä, hinta, huolto, jne.)
  - b) padon kunto ja mitä vaatii mahdollinen kunnostus.
  - c) asiakkaiden laajentaminen saneerauksen myötä (nyt 11 sähkön käyttäjää, potentiaali tuplata). Sähkö myydään nyt alimman hintataksan mukaan osakkaille ja käyttäjille; loppu ylijäämä sähkö voitaisiin myydä Suur-Savon Sähkölle
  - d) selvitetään julkisen rahoituksen tukimahdollisuudet
  - e) luodaan liiketoimintasuunnitelma budjetteineen, jolla selvitetään myllyn investointikustannukset ja sen jälkeinen kannattavuus sekä investointien kuoletusaika.
- 4) Lohikosken Myllyn edustajat päättävät DI-työn jälkeen omista jatkotoimenpiteistä (mm. josko myllyä kannattaa kehittää, halukkuus investointiin, jne.).

### Aikataulu:

Työpaja 1	syyskuun alku 2013
Hakemus	Suur-Savon Energiasäätiölle syyskuussa 2013
DI-työ	10/2013 – 03/2014
Työpaja 2	jos tarvetta, tammikuu 2014

### Yhteystietoja:

**LUT Energia**, professori **Jari Backman** puh. 040-844 8414

**Peter Reiter**, Toiminnanjohtaja Pienvesivoimayhdistys ry. Kesantotie 5, 00740 HELSINKI  
pr.water@reiter.fi  
p. 040-726 7124

