



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**In-stream-pienvesivoimat hajautetussa  
sähkötuotannossa**

Timo Niskanen

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö 2018

# TIIVISTELMÄ

In-stream-pienvesivoimalat hajautetussa sähköntuotannossa

Timo Niskanen

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2018, 39 s.

Työn ohjaajat yliopistolla: Yrjö Louhisalmi ja Toni Liedes

Tämän kirjallisuusselvityksen tavoitteena oli perehtyä vapaavirtaturbiinien käyttömahdollisuuksiin ja niiden rakenteellisiin toteutuksiin. Työssä selvitetään myös, minkälaista pienvesivoimaa Suomessa käytetään ja kuinka paljon käyttämätöntä potentiaalia pienvesivoimasektorilla on edelleen käytettävissä. Työssä pohditaan millaisissa tilanteissa in-stream-voimalat ovat varteenotettava sähköntuotantomuoto myös Suomessa. Työn tarkoituksena on antaa lukijalle yleiskäsitys siitä millaisia komponentteja in-stream-voimalat sisältävät, missä niitä voidaan käyttää ja mitkä ominaisuudet voimaloissa vaikuttavat niiden hyötysuhteeseen ja suorituskykyyn. Turbiineissa pääpaino kohdistuu verikaaliakselisiin roottoreihin ja eritoten Savonius-turbiinin ominaisuuksiin ja niiden optimointiin. Työssä pyritään selvittämään kattavasti voimaloiden sijoittamiseen, asentamiseen ja niistä muodostettaviin voimalaryhmiin liittyviä asioita. Työn lopussa pohditaan olisiko in-stream-voimaloiden osia tai turbiineita mahdollista valmistaa 3D-tulostamalla.

*Asiasanat: in-stream-vesivoimala, turbiini, pienvesivoima, Savonius*

## **ABSTRACT**

Small-scale hydrokinetic turbines in decentralized generation of electricity

Timo Niskanen

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2018, 39 p.

Supervisors at the university: Yrjö Louhisalmi and Toni Liedes

The purpose of this literature survey was to report accessibilities and structural executions of the in-stream-turbines. In this thesis there is a statement which goes through what kind of small hydro power is used in Finland and how much unused potential there is in the small hydro power sector. The thesis describes in which situations free-flow hydro plants are worthy production form of electricity in Finland. The goal was to give a basic understanding of the components used in in-stream hydro plants, where they can be used, and which are the qualities that affect on their efficiency and performance. The main interest in turbines focuses on to the vertical shaft turbines and especially on optimizing the features of the Savonius turbine. The aim of the thesis is to report comprehensively the issues related to the installation, location and power plant groups. At the end of the thesis, there is a discussion could it be possible to produce in-stream hydro plant parts or turbines using 3D-printing.

*Keywords: in-stream hydroplant, turbine, small hydro, Savonius*

## ALKUSANAT

Työn tarkoituksena oli perehtyä virtaavaan veteen sijoitettavien pienvesivoimaloiden teknisiin ratkaisuihin, niiden erilaisiin käyttömahdollisuuksiin hajautetussa sähköntuotannossa sekä niiden eroihin suhteessa perinteisiin pienvesivoimaloihin. Työn alussa luodaan katsaus tavanomaiseen pienvesivoimaan Suomessa ja sen jälkeen työ keskittyy käsittelemään vapaavirtausvesivoimaloita ja niissä käytettäviä turbiiniratkaisuja. Pääpaino työssä oli selvittää in-stream-voimaloissa käytettävien turbiinityyppien hyviä ja huonoja puolia. Tärkeässä osassa oli myös selvittää, mitä komponentteja voimalat sisältävät ja mitä tekijöitä tulee ottaa huomioon korkean hyötysuhteen saavuttamiseksi. Työssä on listattu myös jo markkinoilla olevia valmiita in-stream-voimaloiden valmistajia ja heidän tuotteitaan. Työn lopussa pohditaan olisiko in-stream-voimaloiden osia tai roottoreita mahdollista valmistaa 3D-tulostamalla kustannussäästöjä haettaessa. Kiitokset kandidaatintyöni ohjaajille, joilta sain innoituksen aiheen valintaan ja hyviä neuvoja työn kirjoittamiseen ja aiheen rajaukseen.

Oulu, 8.4.2018

*Timo Niiskanen*

Työn tekijä

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	
ABSTRACT	
ALKUSANAT	
1 JOHDANTO .....	7
2 PIENVESIVOIMA SUOMESSA .....	9
2.1 Yleistä .....	9
2.2 Jaottelu .....	10
2.3 Rakenne ja liitännäisosat .....	11
2.4 Voimalatyypit .....	12
2.4.1 Säännöstely- ja käytötapajaottelu .....	12
2.4.2 Rakennetyyppi- ja jaottelu .....	12
2.4.3 Putoamiskorkeusjaottelu .....	12
2.4.4 Jaottelu voimalaitoskoneiston asennuksen mukaan .....	12
3 IN-STREAM-PIENVESIVOIMALA .....	14
3.1 Johdanto .....	14
3.2 Toimintaperiaate .....	15
3.3 In-stream-voimalan osat .....	17
3.3.1 Turbiini .....	17
3.3.2 Virtauksenohjain .....	18
3.3.3 Generaattori .....	19
3.4 Asentaminen .....	19
3.5 Peräaalto .....	21
3.6 Voimalaryhmien suorituskyky .....	22
3.7 Mahdollisuudet ja haasteet .....	23
3.7.1 Edut verrattuna tavanomaiseen vesivoimaan .....	23
3.7.2 Haasteet .....	24
3.7.3 Vaikutukset ympäristöön .....	24
3.8 Tuotteita markkinoilla .....	25
4 TURBIINIT .....	26
4.1 Cross-flow- ja vertikaaliturbiinit .....	26
4.1.1 Savonius-turbiini .....	27
4.1.2 Darrieus- ja Gorlov-turbiinit .....	32

4.2 Aksiaaliturbiinit.....	34
4.3 Turbiinityyppien edut ja haittapuolet.....	35
5 MAHDOLLISUUS 3D-TULOSTAMISEEN.....	36
6 YHTEENVETO .....	37

# 1 JOHDANTO

Automatisoitava yhteiskunta, kasvava sähköenergian tarve, monien tavanomaisten energianlähteiden ympäristöhaitat, nouseva fossiilisten polttoaineiden hinta ja ilmastonmuutos ovat esimerkkejä niistä syistä, jotka ovat lisänneet kiinnostusta uusista, halvempia ja ympäristön kannalta kestävämpiä sähköntuotantotapoja kohtaan. Kehittyvissä maissa on laajoja alueita, jotka ovat eristyksissä ja siten sähköverkon ulkopuolella. Suomessa vastaavanlaisia alueita ovat muun muassa kansallispuistot, joissa rakentaminen halutaan pitää minimissään luontoarvojen vuoksi. Myös syrjäiset lomajäsennot ovat usein sähköverkon ulkopuolella. Näillä alueilla tarve paikalliseen sähköntuotantoon on olemassa, mutta varsinainen sähkötehon tarve on usein pieni ja se kyettäisiin kattamaan hajautetulla pienvesivoimalla. Monilla alueilla aurinkopaneelit tai tuulivoimalat eivät tuota tarvittavaa tehoa tai eivät toimi juuri lainkaan, joten vesistöjen läheisyydessä ympäri vuoden suhteellisen tasaisesti virtaava vesi tarjoaa mahdollisuuden ympäristöystävälliseen sähköntuotantoon. Vermaakin et al. (2014, s. 626) mukaan kolmasosalla maailman väestöstä ei ole yhteyttä sähköverkkoon, mutta asuvat lähellä virtaavaa vettä, joten käyttökelpoiselle in-stream-vesivoimalle olisi valtava potentiaali. Sähköistyminen olisi näillä alueilla kehittymisen edellytys ja tämä luo tarpeen pienvesivoiman kaltaiselle uusiutuvalle energiamuodolle.

Pienvesivoimaloita voidaan sijoittaa pieniin jokiin, jo olemassa oleviin veden jakeluverkostoihin, kuten jäte- ja juomavesiverkostoihin tai muihin rakennelmiin, kuten kanaaleihin, joissa on veden virtausta. Nämä pienen mittaluokan vesivoimalat aiheuttavat vain vähäisiä tai olemattomia ympäristöhaittoja verrattuna perinteisiin isoihin vesivoimalaitoksiin, sillä ne voidaan sijoittaa jo olemassa oleviin rakennelmiin tai käyttää voimanlähteenä vain veden virtausta. (SSWM 2017)

Työn aiheena on selvittää padottomien pienvesivoimaloiden käyttömahdollisuuksia hajautetussa sähköntuotannossa. Työ keskittyy virtaavassa vedessä toimiviin in-stream-turbiineihin. Tämän lisäksi työssä selvitetään Suomessa olevan pienvesivoiman nykytilannetta, sen teknistä toteutusta ja variaatioita. Patorakenteiden valmistaminen on työlästä, kallista ja vaatii mittavat lupakäsittelyt toteutuakseen, minkä vuoksi vapaasti virtaavaan veteen sijoitettavien turbiinien edut syrjäisillä alueilla tai vaadittaessa vain vähäistä sähkötehoa on syytä selvittää. Mikäli tekniikka in-stream-ratkaisuissa kehittyy kustannustehokkaampaan suuntaan, voidaan tätä teknologiaa käyttää sähköntuotantoon

myös laajemmassa mittakaavassa, eikä vain erityistapauksissa. Työn tavoitteena on perehtyä in-stream-turbiinien rakenteellisiin ratkaisuihin, missä ja miten patovapaita minivesivoimaloita voisi käyttää ja olisiko niissä käytettäviä turbiineita mahdollista valmistaa edullisesti 3D-tulostamalla. Työssä keskitytään pääasiassa turbiinityyppeihin, joiden pyörimisakselit toimivat virtaukseen nähden kohtisuorassa. Nämä turbiinityypit ovat yleisesti ottaen huoltovapaampia, edullisempia valmistaa ja tarjoavat siten mahdollisesti kustannustehokkaamman tavan tuottaa sähköä syrjäisillä alueilla. Lisäksi selvitetään myös niiden turbiinien rakennetta, joiden pyörimisakseli on virtauksen kanssa samansuuntainen.



## 2 PIENVESIVOIMA SUOMESSA

### 2.1 Yleistä

Vesivoimalla tarkoitetaan sähköntuotantomenetelmää, jossa veden liike-energiasta tuotetaan sähköä. Vesivoimalaitoksen koosta riippumatta, niiden toimintaperiaate on samankaltainen. Tärkeimmät vesivoimaan vaikuttavat tekijät ovat virtausnopeus ja patokorkeus (SSWM 2017). Vesivoima on uusiutuvaa energiaa, jossa hyödynnetään veden luonnollista ja loputonta kiertokulkua. Suomessa vesivoimalaitoksia on käytetty sähköntuotantoon jo 1800-luvulta alkaen. Ensimmäinen vesisähkövoimala Suomessa otettiin käyttöön 1891 Tampereella. Yhteensä vesivoimalaitoksia Suomesta löytyy noin 250 (Wikipedia 2017). Varsinkin syrjäisillä ja eristäytyneillä alueilla on ollut tarvetta käyttää pienvesivoimaloita, sillä sähköverkko ei ole ulottunut niille alueille.

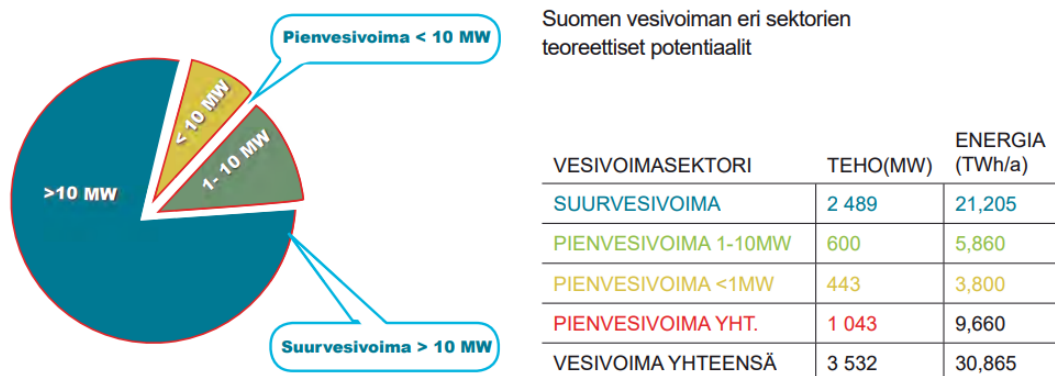
Suomessa pienvesivoimaloita on tällä hetkellä käytössä noin 150, joiden yhteenlaskettu keskimääräinen sähköntuotanto on noin 1100 gigawattituntia vuodessa. Vuonna 2016 Suomen koko sähköntuotanto oli 66 200 gigawattituntia (Tilastokeskus 2017), joten pienvesivoiman osuus tästä on noin 1.7 prosenttia. Vapaata eli ei suojelun alla olevaa energiapotentiaalia pienvoimasektorilla on kuitenkin yli 1400 gigawattituntia. Koska pienvesivoimaa on hyödynnetty jo kauan, ovat voimalaitokset yleensä vanhoja. Tämä mahdollistaa niiden modernisoinnin ja tehonnoston. Pienvesivoimaloilla tuotettavan sähkön kokonaismäärä on pieni Suomen kokonaistuotantoon nähden, mutta niiden hyödyt tulevat esille tarvittaessa sähköä paikallisesti syrjäisillä alueilla, jonne valtakunnallista sähköverkkoa ei voi ulottaa. Suomessa jokien putoamiskorkeudet ovat pieniä, minkä vuoksi pienvesivoimalaitokset on tyypillisesti rakennettu koskipaikkoihin, joissa on hyödynnetty virtaavan veden energiaa. Nämä pienvesivoimalat ovat perinteisiä voimaloita ja ne sisältävät aina jonkinlaisen patorakennelman. (Pienvesivoimayhdistys 2009)

Pienvesivoiman kehitysnäkymät Suomessa ovat kaksijakoiset. Toisaalta hyödyntämätöntä vesivoimapotentiaalia olisi varsinkin pienvoimalasektorilla, mutta ongelmaksi muodostuu voimaloiden taloudellinen kannattavuus sekä tavanomaisten pienvesivoimaloiden hankala toteutus. (Energiateollisuus 2018)

Lisää haasteita pienvesivoiman lisäämiseksi Suomessa aiheuttaa koskiensuojelulaissa tarkkaan määritellyt vesistöt ja joet, joihin ei saa rakentaa vesivoimaa. Tämä vaikeuttaa uusien laitosten rakentamista. Myös muutokset vanhoissa vesivoimaloissa edellyttävät usein vesilupien uusimista ja tämä voi tuoda voimalaitokselle uusia velvoitteita, kuten kalatien rakentamisen, ja nostaa siten investointien tarvetta. Tämä kasvattaa voimalaitosten modernisoinnin kustannusarviota ja voimalaitoksen takaisinmaksuaika voi siten venyä hyvinkin pitkäksi. (Pienvesivoimayhdistys 2009)

## 2.2 Jaottelu

Kuvassa 2.1 esitetään EU:n käyttämän määrittelyn perusteella vesivoiman jakaminen eri sektoreihin ja myöskin niiden teoreettiset potentiaalit Suomessa. Teoreettinen potentiaali on laskettu virtaamien pitkäaikaisten keskiarvojen, häviöttömien tuotantoehtojen, keskimääräisen putouskorkeuden ja vuoden täysimääräisten käyttötuntien mukaan. Teoreettista potentiaalia ei tietystikään voida saavuttaa, joten todellinen potentiaali on selvästi pienempi. Suurvesivoimasektorin on mahdollista hyödyntää teoreettisesta potentiaalistaan noin 60 prosenttia, kun taas perinteinen pienvesivoimasektori kykenee hyödyntämään vain noin 26 prosenttia omasta teoreettisesta potentiaalistaan. Hyödynnettävissä olevan potentiaalin suuruus voisi hyvinkin kasvaa, jos patovapaita ja ympäristölle vain vähäistä haittaa aiheuttavia in-stream-pienvesivoimalaitoksia kyettäisiin tulevaisuudessa käyttämään. Pienvesivoimalla tarkoitetaan alle 10 MW tehoisia voimalaitoksia. Pienvesivoimaloista voidaan edelleen erottaa minivesivoimalat, joiden teho on alle 1 MW. Näitä suuremmat vesivoimalaitokset ovat suurvesivoimaloita. (Pienvesivoimayhdistys 2009)

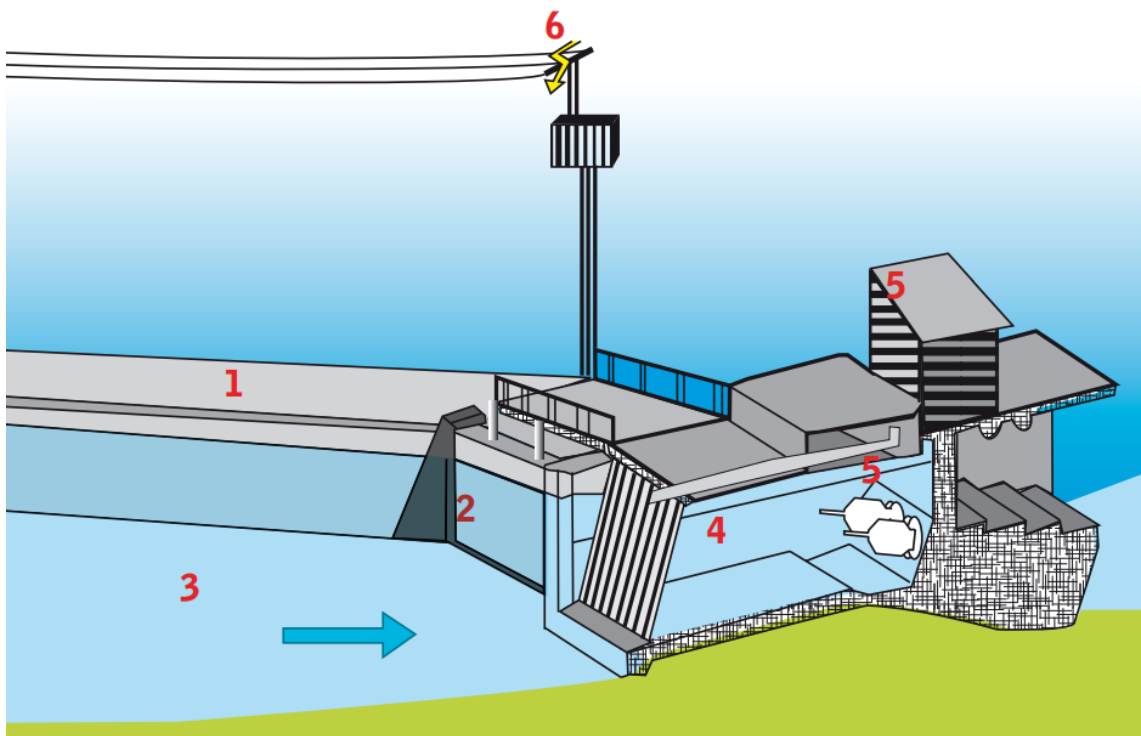


Kuva 2.1. Vesivoiman teoreettiset potentiaalit Suomessa (Pienvesivoimayhdistys 2009).

Minivesivoimalaluokasta voidaan edelleen erottaa mikro- ja pikoluokat. Pikoluokkaan kuuluvat voimalaitokset, joiden tuottama teho on alle 5 kilowattia. Mikroluokkaan kuuluvat voimat tuottavat tehoa 5-100 kilowattia ja miniluokka 100-1000 kilowattia. (SSWM 2017).

### 2.3 Rakenne ja liitännäisosat

Perinteinen vesivoimala tarvitsee toimiakseen patorakenteen, sillä sähköntuotanto perustuu veden potentiaalienergian käyttämiseen. Tätä varten täytyy rakentaa pato ja siihen liittyvä padotusallas, joiden avulla ylä- ja alaveden välille saadaan luotua korkeusero eli potentiaalienergiaa. Patoihin liittyy myös muita rakenneosia, kuten tulva-, ohjuoksutus-, jää- ja pohja-aukkoja. Koneasemalle täytyy myös rakentaa vesitiet, joihin kuuluvat ylä- ja alapuoliset vesitiet. Kaiken keskuksena toimii koneasema koneistoineen ja siihen liittyvä muuntamo ja sähköverkko. (Pienvesivoimayhdistys 2009) Kuvasta 2.2 käy ilmi vesivoimalan rakenne. Perinteiset vesivoimalat ovat siis monimutkaisia kokonaisuuksia ja tarvitsevat monia liitännäisosia toimiakseen. Tämä on vaikeuttanut pienien vesivoimaloiden yleistymistä, vaikka käyttämätöntä potentiaalia olisikin.



Kuva 2.2. Tavanomaisen pienvesivoimalan rakenne (Pienvesivoimayhdistys 2009).

## 2.4 Voimalatyypit

Pienvesivoimalat voidaan jaotella ominaisuuksiensa mukaan eri laitostyyppeihin. Jaottelu voidaan suorittaa säännöstely- ja käyttötavan, rakennetyypin, putoamiskorkeuden tai voimalaituskoneiston asennuksen mukaan. (Pienvesivoimayhdistys 2009)

### 2.4.1 Säännöstely- ja käyttötapaajaottelu

- Jokilaitos, yleisin suomalainen pienvesivoimalatyyppeihin.
- Säännöstelyvoimalaitos, rakennetaan suuren tekojärven tai järven joenniskaan.

### 2.4.2 Rakennetyypijaottelu

- Patolaitos tai keskitetty rakenne, yleisin suomalainen pienvesivoimalatyyppeihin.
- Kanavavoimalaitos
- Paineputkilaitos, soveltuu hyvin suuriin putoamiskorkeuksiin ja siten harvinainen pienvesivoimaloissa.
- Tunnelilaitos, sijoitettu kallioluolaan ja sen vesitiet ovat kalliotunneleita.

### 2.4.3 Putoamiskorkeusjaottelu

- Pienpainevoimalaitokset, näissä putoamiskorkeus alle 10 metriä. Suurin osa Suomen pienvesivoimaloista kuuluu tähän luokkaan.
- Keskipainevoimalaitokset, putoamiskorkeus 10-35 metriä. Osa Suomen suurimmista pienvesivoimaloista kuuluu tähän luokkaan.
- Keskikorkeapainevoimalaitokset, putoamiskorkeus 35-250 metriä. Suomessa melko harvinaisia.
- Korkeapainevoimalaitokset, putoamiskorkeus yli 250 metriä. Näitä ei ole Suomessa.

### 2.4.4 Jaottelu voimalaituskoneiston asennuksen mukaan

- Märkäasennus, tässä turbiini asennetaan veden alle ja generaattori kuivassa tilassa tai kytkettynä suoraan turbiiniin veden alle uppogeneraattorina.

- Kuiva-asennus, turbiinit, vaihteistot ja generaattorit asennetaan konesaliin.
- Vaaka-akseliset, turbiinin pyörimisakseli horisontaalitasossa.
- Vinoaakseliset
- Pystyakseliset, turbiinin pyörimisakseli vertikaalitasossa.

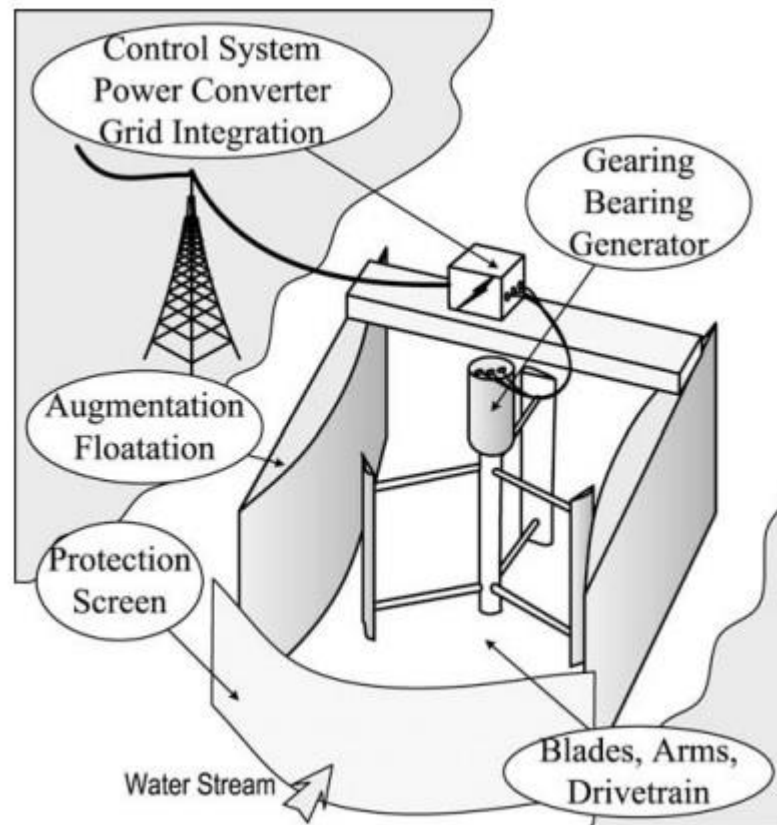
## 3 IN-STREAM-PIENVESIVOIMALA

### 3.1 Johdanto

In-stream-vesivoimalaitokset ovat laitteita, jotka muuntavat jokien, vuorovesien tai kanaalien virtauksen sähköksi ilman patoja tai säännöstelyaltaita. Tässä tutkielmassa ei kuitenkaan käsitellä vuorovesiin asennettavia laitoksia. In-stream-vesivoimalaitokset muuntavat virtaavan veden sisältämän kineettisen energian suoraan sähköksi pienen mittaluokan turbiinien avulla. Näitä turbiineita voidaan kutsua in-stream- tai vapaavirtausturbiineiksi. Kyseiset laitteet ovat suunniteltu asennettaviksi luonnollisiin virtauksiin, kuten jokiin, ihmisen rakentamiin kanaaleihin tai muihin kohteisiin, joissa on sopiva virtausnopeus. (Yuce, M.I. & Muratoglu, A. 2015, s. 72)

Pienen mittaluokan vesivoimalat kuuluvat kustannustehokkaimpiin ja ympäristöystävällisimpiin sähköntuotantomuotoihin ajatellen syrjäisiä alueita ja ne täydentävät erinomaisesti myös aurinkokennovoimaloita. Fysikaalisessa toiminnassa ja energian talteenotossa in-stream-laitoksilla on paljon yhteistä tuulivoimaloiden kanssa. Koska vesi on lähes 800 kertaa ilmaa tiheämpää, saadaan hitaastakin veden virtauksesta tuotettua sähköä. Alueilla, joissa ei esiinny juurikaan korkeusvaihteluja mutta on virtaavaa vettä, ei tavanomaista vesivoimaa voi käyttää vaan tarvitaan suoraan virtaukseen asetettavaa ratkaisua energian tuottamiseksi. Näitä vapaavirtausvoimaloiden potentiaalisia paikkoja on runsaasti verrattuna potentiaalsiin tavanomaisen vesivoiman paikkoihin. (Vermaak et al. 2014, s. 626-627)

In-stream-voimalaitoksen periaatteellinen esitys on esitetty kuvassa 3.1. Täydelliseen voimalaitokseen kuuluu turbiiniosan lisäksi tärkeitä osia, kuten laakerointi, vaihteisto, generaattori ja laitteet, jotka kytkevät turbiiniyksikön sähköverkkoon, mutta tässä selvityksessä ei keskitytä juurikaan niihin vaan pääpaino on kineettisen energian talteen saamisessa.



Kuva 3.1. In-stream-pienvesivoimalan periaatteellinen esitys (Khan et al. 2009, s. 1824).

### 3.2 Toimintaperiaate

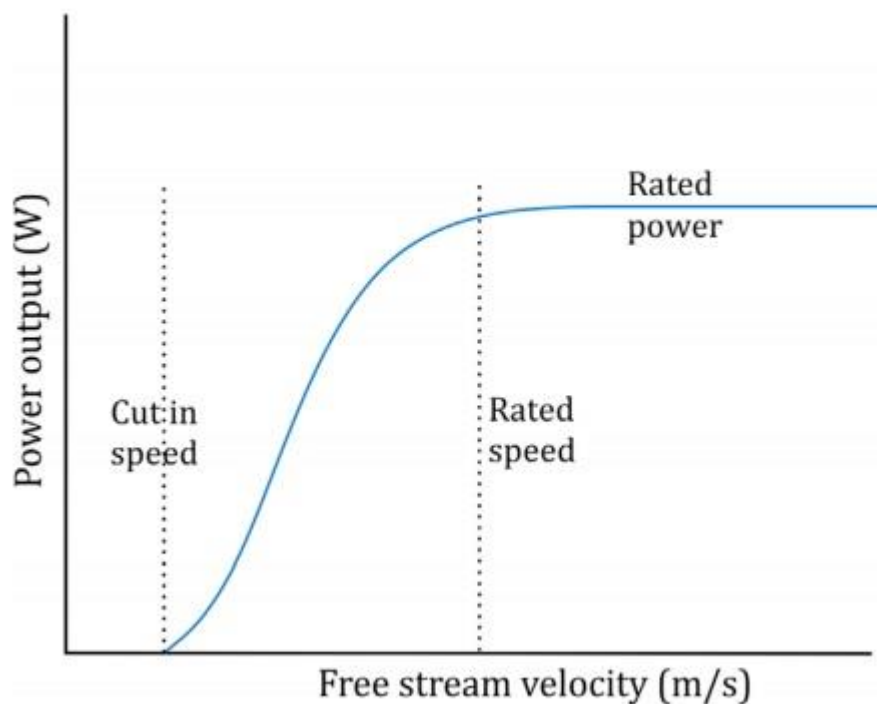
Voimalaitoksen tuottaman sähkön määrä on riippuvainen veden nopeudesta ja tilavuudesta. Toimiakseen kunnolla veden virtausnopeuden tulee olla suurempi kuin 0.5 m/s, riippuen kuitenkin turbiinimallista. Turbiinin saavuttama kokonaisteho riippuu tiheydestä, poikkipinta-alasta, nopeuden kuutiosta ja tehokerroimesta, tämä esitettyä kaavassa (1)

$$P = \frac{1}{2} * A * \rho * V^3 * C, \quad (1)$$

missä  $P$  on kokonaisvoima [W],  
 $A$  on turbiinin pinta-ala [m<sup>2</sup>],  
 $\rho$  on veden tiheys [1000 kg/m<sup>3</sup>],  
 $V$  on veden virtausnopeus [m/s],  
 $C$  on tehokerroin, joka vapaavirtausturbiineilla on noin 0.25.

Kaavasta (1) huomataan, että tehoon vaikuttavia muuttujia on vain roottorin halkaisija ja veden virtausnopeuden kuutio. Tästä syystä vapaavirtausturbiineilla virtauksen nopeudella on erityisen suuri merkitys. (Vermaak et al. 2014, s. 627; Khan et al. 2008, s. 2179)

Maksimaalinen hyötysuhde, jonka ideaalinen turbiini voi saavuttaa, tunnetaan Betzin lakina. Lain mukaan tehokerroin massavirtauksessa pyörivälle turbiinille voi olla maksimissaan 0.593. Tyypillisellä matalan mekaanisen häviön in-stream-turbiinilla tehokerroin on noin 0.30. Erityisen hyvin suunnitellulla systeemillä tehokerroin voi asettua välille 0.40-0.45. Yleisesti vapaavirtausturbiinit ovat suunniteltu pyörimään vakionopeudella, eli turbiinin pyörimisnopeus on sama riippumatta veden virtausnopeudesta. Kehittyneemmät systeemit käyttävät muuttuvaa pyörimisnopeutta, jotta saavutettaisiin parempi hyötysuhde. Joissakin tilanteissa turbiinin siipien kulmaa voidaan säätää, mikä parantaa myös turbiinin tehokkuutta. (Yuce, M.I. & Muratoglu, A. 2015, s. 75)



Kuva 3.2. Tyypillinen vapaavirtausturbiinin tehokäyrä (Yuce, M.I. & Muratoglu, A. 2015, s. 76).

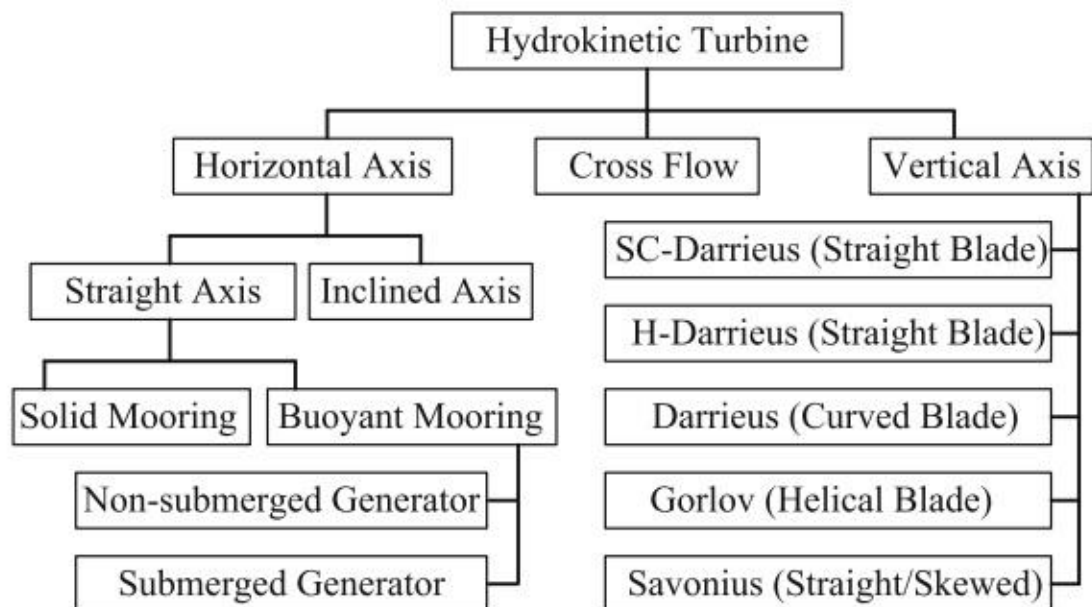


In-stream-turbiineille tyypillinen tehokäyrä on esitetty kuvassa 3.2. Jokaisella turbiinilla on sille ominainen käynnistymiseen tarvittava virtausnopeus ja maksimimaallinen virtausnopeus. Maksimiteho, jonka kyseinen turbiini voi saavuttaa, on nimeltään rajoitettu teho. Virtausnopeus, jolla rajoitettu teho saavutetaan, on nimeltään rajoitettu virtausnopeus.

### 3.3 In-stream-voimalan osat

#### 3.3.1 Turbiini

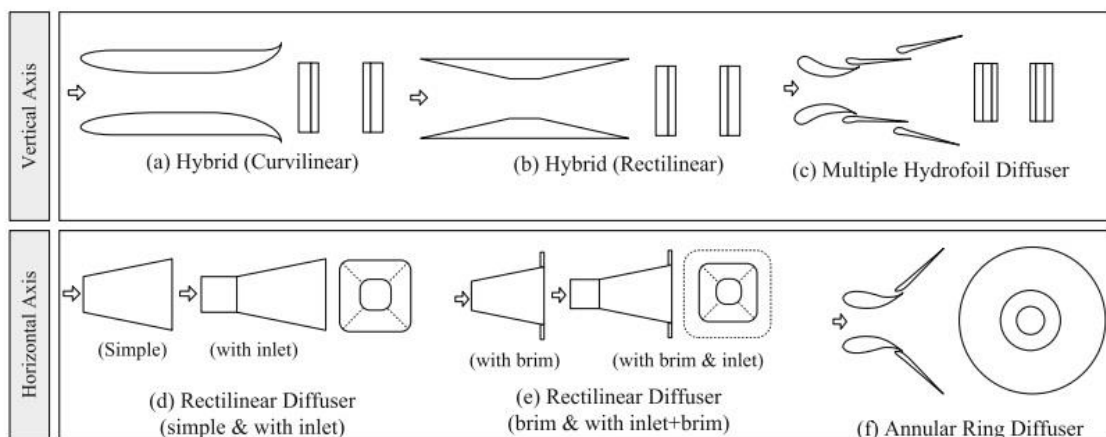
Vapaavirtausturbiinit luokitellaan pyörimisakseliensa mukaan kolmeen osa-alueeseen. Kuvassa 3.3 on esitetty turbiinien jaottelu, missä turbiinimallit jaetaan pyörimisakseliensa suunnan mukaan kolmeen luokkaan. Horisontaaliakselisten turbiinien pyörimisakseli on yhdensuuntainen veden virtauksen kanssa. Nämä voidaan edelleen jakaa asennustavasta riippuen suora- ja vinoakselisiin. Vertikaaliakselisten turbiinien pyörimisakseli on kohtisuorassa veden virtaukseen ja pintaan nähden. Cross-flow-turbiinit eroavat vertikaalisista siten, että niiden pyörimisakselin asennus on yhdensuuntainen vedenpintaan nähden. Lisää turbiinien ominaisuuksista kappaleessa 4.



Kuva 3.3. Vapaavirtausturbiinien jaottelu (Khan et al. 2009, s. 1829).

### 3.3.2 Virtauksenohjain

In-stream-vesivoimaloiden suorituskykyä voidaan parantaa käyttämällä turbiinien yhteydessä virtauksenohjaimia. Nämä suuntaavat veden virtausta turbiinin ympärillä ja siten mahdollistavat suuremman energian talteenoton. In-stream-voimaloihin asennettavat virtauksenohjaimet voivat toimia myös koko voimalan kelluntalaitteena. (Khan et al. 2008, s. 2185) Vaikka voimalan teho voi parhaimmillaan jopa kolminkertaistua virtauksenohjaimen ansiosta, se nostaa voimalan kokonaishintaa, tekee sen monimutkaisemmaksi ja lisää riskiä turbiinin tukkeutumiseen (Anyi, M. & Kirke, B. 2010, s. 115).



Kuva 3.4. Virtauksenohjaimien muodot sivulta ja päältä kuvattuna (Khan et al. 2009, s. 1831).

Vertikaaliakselisille ja horisontaaliakselisille turbiineille virtauksenohjaimet ovat huomattavan eri muotoisia, kuten kuvasta 3.4 voidaan huomata. Horisontaaliakselisille turbiineille virtauksenohjaimet ovat diffuusorityyppisiä, joissa veden virtausnopeutta nostetaan kasvattamalla virtauksenohjaimen halkaisijaa roottorin takana. Vertikaaliakselisilla turbiineilla keskitytään lähinnä suuntaamaan veden virtaus turbiinille suotuisasti, mutta myös niissäkin voidaan käyttää diffuusoreita nostamaan veden virtausnopeutta. Jokaisella mallilla on ominaiset suorituskykyarvot ja suunnittelurajoitukset. Pyöreä diffusori (annular ring diffuser) toimii erittäin hyvin, kun hydrodynaamiset muodot ovat optimaalisesti suunniteltu ja hybridimalliset virtauksenohjaimet toimivat paremmin suuremmassa mittakaavassa. Optimaalinen koko, muoto ja suunnittelu ovat edelleen avoin ongelma ja paras vaihtoehto tulisi tutkia erikseen käyttökohteen mukaan. (Khan et al. 2009, s. 1830-1831)

### 3.3.3 Generaattori

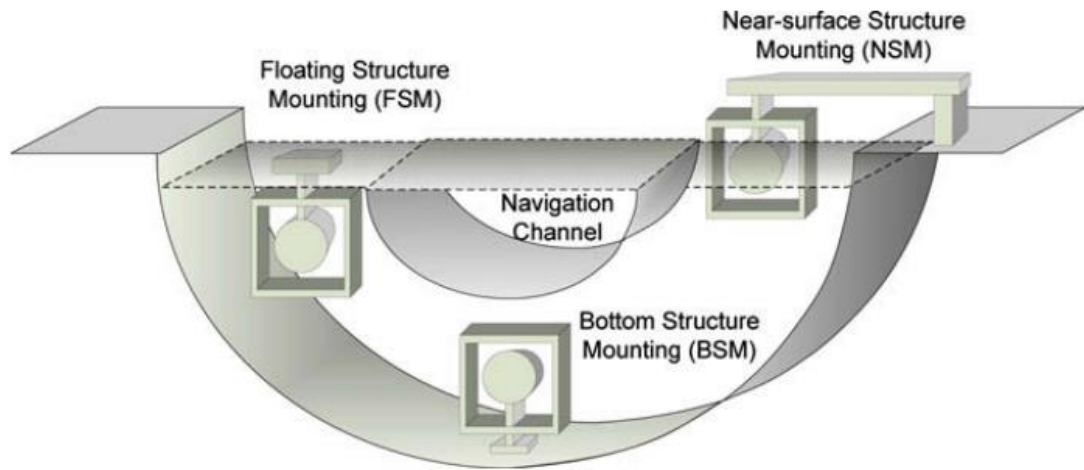
Sähkögeneraattorit muuttavat turbiinien mekaanisen energian sähköenergiaksi. Ne voivat olla joko tasavirta- tai vaihtovirtageneraattoreita. Valittaessa generaattoria tulee ottaa huomioon turbiinin pyörimisnopeus, tarvittava teho ja käyttöalueen laajuus. Generaattorin täytyy olla vedenpitävä horisontaali- tai cross-flow-tyyppisiä turbiineita käytettäessä, sillä voimaloiden rakenteesta johtuen generaattorit sijaitsevat yleensä vedenpinnan alla. Vertikaaliakselisissa voimalaitoksissa generaattori sijaitsee vedenpinnan yläpuolella, eikä generaattorin vedenpitävyys ole niin ehdoton vaatimus. In-stream-voimaloissa voidaan käyttää samanlaisia generaattoreita kuin muissakin sähköntuotantolaitteissa tai valmistuskulujen pienentämistä ajatellen voitaisiin käyttää ajoneuvoista ylijääneitä latureita. Kaksi yleisesti käytettyä generaattorityyppiä ovat synkronoitu kestopagneettigeneraattori ja induktiogeneraattori. (Vermaak et al. 2014, s. 629)

Synkronoitu kestopagneettigeneraattori pyörii vakionopeudella. Tätä generaattorityyppiä pidetään sopivimpana in-stream-sovelluksiin, sillä se on hyvin yksinkertainen, luotettava, aiheuttaa vähän melua ja voi tuottaa paljon tehoa. Se voi myös toimia sähköverkon ulkopuolisilla alueilla, sillä generaattorin magnetointi ei ole sähköverkosta riippuva. Jotta generaattori voisi toimia vaihtelevissa nopeuksissa, sisältää se myös taajuusmuuntimen ja tasasuuntaajan. (Vermaak et al. 2014, s. 630)

Induktiogeneraattoreita käytetään myös in-stream-voimaloissa ja sen hyviin ominaisuuksiin kuuluvat yksinkertaisuus, vahva rakenne ja pieni koko suhteessa tehontuotokkykyyn. Toisin kuin synkronoitu generaattori, induktiogeneraattori ei tarvitse ulkoista tasavirtalähdettä. Magneettikentän muodostamiseen ne tarvitsevat yhteyden ulkopuoliseen tehonlähteeseen eivätkä ne toimi yhtä hyvällä hyötysuhteella kuin kestopagneettigeneraattorit. (Vermaak et al. 2014, s. 630)

### 3.4 Asentaminen

Asennettaessa vapaavirtausvoimaloita jokiin tai kanaaleihin on asennukseen kolme vaihtoehtoa. Voimala voidaan sijoittaa joen tai kanaalin pohjalle (BSM), kiinnittää se kelluvaan rakenteeseen (FSM) tai asentaa se pinnan lähellä olevaan rakenteeseen (NSM). Kuvassa 3.5 on esitetty näiden asennustapojen periaatteellinen kuva.



Kuva 3.5. Vapaavirtausturbiinien asennustavat (Khan et al. 2009, s. 1831).

Khanin et al. (2009, s. 1831) esittämän kyselyn perusteella voidaan sanoa, että horisontaaliakselisten turbiinien kiinnityksessä kaikki asennusvaihtoehdot ovat yhtä suosittuja. Vertikaaliakselisten turbiinien tapauksessa lähellä pintaa olevaan rakenteeseen kiinnittäminen tapahtuu puolessa tapauksista, kelluvaan rakenteeseen asentamista käytetään myös, mutta pohjalle asennettavia ratkaisuja ei juurikaan käytetä. Se miksi pohjaan asennettavia vaihtoehtoja ei vertikaaliakselisissä juurikaan käytetä, johtuu mahdollisuudesta asentaa generaattori ja muut laitteet vedenpinnan yläpuolelle.

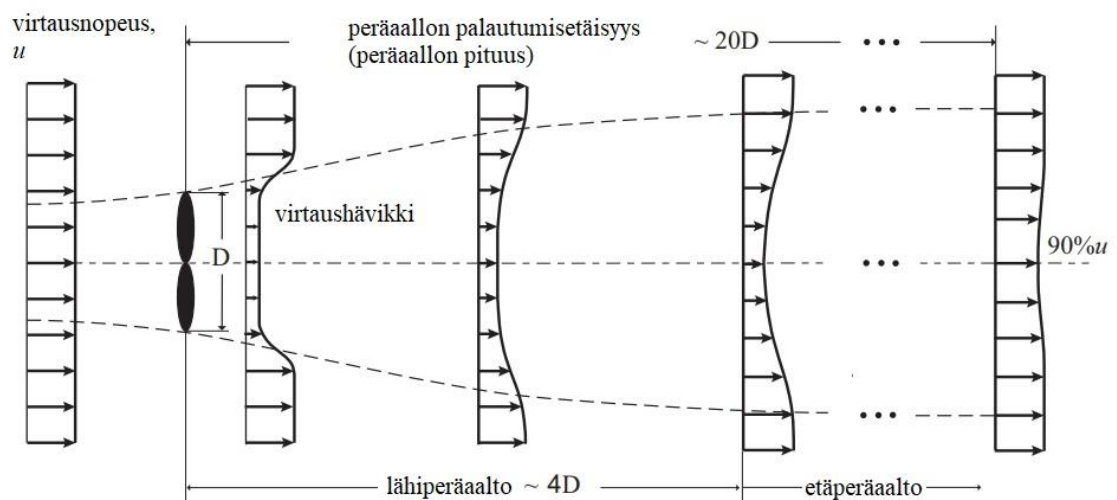
Selvästi parasta tapaa asentaa in-stream-voimaloita ei ole, mutta asennusta mietittäessä tulisi ottaa huomioon ainakin seuraavat asiat (Khan et al. 2009, s. 1831-1832):

- **Energian talteenotto:** Energiavuo on joissa ja kanaaleissa suurimmillaan lähellä pintaa, jos siis tavoitellaan maksimaalista energiaa, on FSM eli kelluvaan rakenteeseen kiinnittäminen paras vaihtoehto. Pohjalle asentaminen ei siten mahdollista optimaalista energian talteenottoa. Lähelle vedenpintaa kiinnitettäessä (NSM) turbiini on alttiina vedenpinnan korkeuden vaihteluille, mikä olisi syytä ottaa huomioon asennustapaa valittaessa.
- **Muut vesiväylän käyttäjät:** Vaikka kelluvaan rakenteeseen asentaminen tuo parhaan hyötysuhteen energian talteenotossa voivat muut vesiväylän käyttäjät häiriintyä tästä ratkaisusta. Kalastajat, laivaliikenne, veneily ja muut aktiviteetit voivat pakottaa käyttämään BSM- tai NSM-asennusta.

- Rakentamisen haasteet: Kelluvien rakennelmien suunnittelu energian tuottamista varten on vielä vähäistä, kun taas asiantuntemus yhdyskuntatekniikan puolelta pohjaan asennettavien rakennelmien kohdalla on runsasta.
- Vaikutus ympäristöön: Kaikki jokien pohjaa kuormittavat asennusmuodot voivat joutua tarkastelun alaiseksi, kun taas kelluva asennus tai joenpenkkaan tuleva rakennelma vaikuttavat ympäristön kannalta paremmilta ratkaisuilta.
- Muut toimintaan vaikuttavat tekijät: Riippuen asennustavasta ja turbiinimallista generaattori, vaihteisto, laakerointi ja sähkölaitteet tarvitsevat eritasoisen vedenpitävyyden, voitelun ja suojauksen. Myös veden virtausnopeuden vaihtelut ja myrskyolosuhteet tulee ottaa huomioon varsinkin NSM ja FSM asennustyypeissä.

### 3.5 Peräaalto

Eri turbiinimallien synnyttämien peräaaltojen tunteminen on tärkeää, haluttaessa tietää millaisia vaikutuksia turbiineilla on toisiinsa nähden tai ympäristöä ajatellen. Peräaallon tarkka mallintaminen voi edesauttaa useiden voimaloiden muodostaman in-stream-ryhmän laadinnassa ja se on voi lisäksi vähentää ympäristöhaittoja, kuten sedimenttien kulkeutumista ja huuhtoutumista. (Laws, N.D. & Epps, B.P. 2016, s. 1252)



Kuva 3.6. Peräaallon ominaisuuksien määrittely (Laws, N.D. & Epps, B.P. 2016, s. 1249).

Peräaallon ominaisuudet jaetaan tyypillisesti neljään osa-alueeseen: aallon leveyteen, aallon pituuteen, keskimääräiseen nopeusprofiiliin ja turbulenssin intensiteettiin. Kuvassa 3.6 esitetään peräaallon rakennetta ja aallon leveyden ja pituuden käsitteitä.

Peräaallon pituus on etäisyys turbiinilta alavirran kohtaan, jossa veden virtausnopeus on palannut lähes ennalleen. Peräaallon pituutta kutsutaan myös aallon palautumispiteudeksi ja se on tärkeä ominaisuus suunniteltaessa turbiinien järjestämistä ryhmiin. Aallon palautuminen johtuu pääasiassa veden sekoittumisesta viereiseen virtaan, joten tätä prosessia voidaan nopeuttaa luomalla korkeampi turbulenssi-intensiteetti, käyttämällä pieniä välejä asennettaessa turbiineja rinnakkain tai asentamalla turbiinit lähelle reunaa. Aksiaaliturbiineilla aallon palautumispiteus on noin 20 kertaa turbiinin halkaisija. Tärkeimmät asiat peräaaltojen tutkimisessa ovat (Laws, N.D. & Epps, B.P. 2016, s. 1252):

- Aallon ominaisuudet: geometria, virtausnopeuden häviö ja palautuminen, turbulenssin intensiteetti, palautuminen ja rakenne.
- Turbiinin suunnittelun ja suorituskyvyn vaikutus peräaaltoon.
- Virtausväylän tukkimisen tai turbiinien väliin asennettävien rakenteiden vaikutus peräaaltoon.
- Peräaallon, vapaan virtauksen ja ympäröivien pintojen yhteisvaikutukset.

### 3.6 Voimalaryhmien suorituskyky

Mikäli vapaavirtausvoimaloista halutaan tehdä tehokkaampia kokonaisuuksia, jotka tuottavat sähköenergiaa suuriinkin tarpeisiin, joudutaan käyttämään kymmenien tai jopa satojen turbiinien tiiviisti rakennettuja kokonaisuuksia. Voimalaryhmien toimintaa on tutkittu lähinnä vuorovesiolosuhteissa eikä juurikaan joissa. Samoja voimalaryhmiä koskevia lainalaisuuksia voidaan kuitenkin löytää joki- ja vuorovesiolosuhteista (Laws, N.D. & Epps, B.P. 2016, s. 1253-1254):

- Virtausuoman geometria vaikuttaa suuresti voimalaryhmän toimintaan ja lisäksi se vaikuttaa tehohäviön suuruuteen (matala vs. syvä tai pitkä vs. lyhyt).
- Turbiinit käyttäytyvät eri lailla ryhmissä kuin eristyksissä. Voimalaryhmän maksimaalisen hyötysuhteen saavuttamiseksi tulee virtausnopeus sovitaa oikeaksi jokaiselle yksittäiselle turbiinille. Optimaalinen säätö on funktio kanavan geometriasta, voimalaryhmän koosta ja yksittäisten turbiinien järjestelystä.
- Ylimääräisen turbiinin lisääminen riviin voi nostaa tai laskea tehoa turbiinia kohden, riippuen voimalaryhmän suhteellisesta koosta virtausuomaan nähden.

- Turbiinirivin lisääminen voimalaryhmään laskee tehoa turbiinia kohden, mutta nostaa voimalaryhmän kokonaistehoa.
- Voimalaryhmien taloudellisuus: turbiineihin kohdistuvat kuormitukset ja siitä johtuvat rakennuskustannukset skaalautuvat turbiinin tuottaman tehon mukaan. Mitä enemmän turbiinilta saadaan tehoa, sitä suuremmat ovat sen valmistuskustannukset.

### **3.7 Mahdollisuudet ja haasteet**

Jotta vapaavirtausvoimalat voisivat lisätä suosiotaan, tutkijoiden tulee kartoittaa niiden potentiaaliset käyttökohteet, kyetä suunnittelemaan kestäviä ja kustannustehokkaita turbiinimalleja, jotka toimivat hyvin myös voimalaryhmissä, ja osoittaa, että niistä saatava hyöty ylittää ympäristöön kohdistuvat kuormitukset. Voimaloissa tarvittavat komponentit, kuten generaattori ja turbiini, ovat jo olemassa olevaa tekniikkaa, joten haasteena on oikeanlaisen kokoonpanon löytäminen. Tämä voi edesauttaa vapaavirtausvoimaloiden nopeakin kehitystä.

#### **3.7.1 Edut verrattuna tavanomaiseen vesivoimaan**

Vapaavirtausvoimalat ovat helposti liikuteltavia, modulaarisia kokonaisuuksia, jotka voidaan asentaa lähelle käyttökohdetta. Ne tarvitsevat myös hyvin vähän yhdyskuntatekniikkaa ja -rakentamista toimiakseen. Tämä laskee kyseisen energiamuodon kustannuksia ja tarvitsee siten huomattavasti vähemmän resursseja kuin tavanomainen vesivoima. Vapaavirtausvoimaloista aiheutuvat esteettiset haitat ovat myös minimaalisia verrattuna suuriin patorakennelmiin, kuten myös meluhaitat. Lisäksi vaikutukset joilla liikkumiseen, uimiseen ja veneilyyn oletetaan olevan pieniä. In-stream-voimalat ovat yksinkertaisempia rakentaa, huoltaa ja ylläpitää kuin tavanomaiset vesivoimalat. Tämä mahdollistaa niiden asentamisen myös kehittyville tai syrjäisille alueille. (Khan et al. 2008, s. 2184-2185). Tavanomaisiin vesivoimaloihin verrattuna vapaavirtausvoimalat toimivat muuttamatta luonnollisia virtauksia ja vesielin ympäristöä, mikä helpottaa esimerkiksi voimalalupien saamista (Yuce, M.I. & Muratoglu, A. 2015, s. 79).

### 3.7.2 Haasteet

Todennäköisesti suurin ongelma vapaavirtausvoimaloihin liittyen on vedessä liikkuva jäte ja muut kiinteät esineet. Tämä aiheuttaa ongelmia varsinkin asennettaessa voimaloita jokiin ja voi jopa rajoittaa siten niiden käyttömahdollisuuksia. Jotta in-stream-voimaloiden käyttövarmuus voidaan taata, täytyy turbiinit suojata irtoesineiden varalta tai välttää herkkiä turbiinirakenteita potentiaalisesti vaarallisilla alueilla. Turbiinin eteen voidaan asentaa verkko tai muu suoja, jolla voidaan estää suurien irtokappaleiden, kuten tukkien, osuminen turbiiniin. Nämä ratkaisut tekevät voimalasta monimutkaisempia, kalliimpia ja tukkivat hieman virtausta turbiinille, mikä laskee kokonaistehoa. Muotoilemalla aksiaalisissa turbiineissa lavat kaareviksi voidaan vähentää niihin tarttuvan jätteen määrää. Lavoissa voisi käyttää myös vahvaa mutta taipuisaa muovia, mikä antaisi lavoille joustokykyä kappaleiden osuessa niihin. Metalliset roottorien lavat voitaisiin myös asentaa jousien päihin, mikä mahdollistaisi lapojen taittumisen taaksepäin, mikäli niihin osuisi suuri esine. Edellä mainitut lapamallit voivat aiheuttaa valmistamiseen vaikeuksia, mutta voisivat parantaa turbiinien käyttövarmuutta. (Anyi, M. & Kirke, B. 2010, s. 114)

### 3.7.3 Vaikutukset ympäristöön

Voimaloiden aiheuttamien ympäristövaikutuksien tulee olla tasapainossa energiantuotannon kanssa, joten tutkimukset ympäristövaikutuksista tulee ottaa huomioon voimaloita suunniteltaessa. Laws & Epps (2016, s. 1255-1256) käsittelevät EU-komission 2012 toteuttamassa selvityksessä esiin tulleita ympäristöhuolia, joita ovat turbiinien lapojen iskut vesieliöille, voimaloiden aiheuttamien äänien vaikutukset vesieliöille ja vaikutukset ympäröivään luontoon, johtuen energian tuottamisesta ja virtauksen muuttumisesta. Tutkimuksen mukaan turbiinin lapojen iskut eivät ole ongelma, sillä vesieliöt välttävät turbiineita ylipäätänsä ja jos kala joutuu turbiiniin niin se hyvin suurella todennäköisyydellä selviää siitä läpi vahingoittumattomana.

Voimalaryhmät vaikuttavat virtauksen nopeuteen ja turbulenssiin, millä voi olla vaikutusta maa-aineksen ja irtosedimenttien kulkeutumiseen. Toisaalta sedimenttien kulkeutuminen voi vaikuttaa voimalaryhmien toimintaan, jos sedimenttien kulkeutuminen muuttaa joen virtauksen muotoa. Jokiin voi kasautua suuria dyynejä ja siten muuttaa virtauksien rakennetta. Tätä ongelmaa ei kuitenkaan nähdä kovinkaan



suurena ja mikäli joen tai kanavan pohja on irtoaineksestä vapaa, ei kyseistä ongelmaa esiinny lainkaan. (Laws, N.D. & Epps, B.P. 2016, s. 1255-1256)

Muita tunnistettuja vaikutuksia ympäristöön ovat (Yuce, M.I. & Muratoglu, A. 2015, s. 79-80):

- Paljon liikkuvat eläimet voivat sotkeutua upoksissa oleviin kaapeleihin.
- Sähkölinjojen sähkömagneettinen kenttä voi vaikuttaa vedenalaisiin eliöihin.
- Vedenalaisista koneenosista irronneet kemialliset epäpuhtaudet voivat saastuttaa vettä.
- Kalojen vaellusreitit voivat estyä ja joilla liikkuminen vaikeutua.

### 3.8 Tuotteita markkinoilla

Kuvassa 3.7 esitetään lista eräistä yrityksistä ja niiden jo markkinoilla olevista vapaavirtaustuotteista.

Valmistaja	Laitteen nimi	Turbiinityyppi	Min./Max. nopeus	Teho
Lucid Energy (USA)	Gorvol Helical Turbine	Gorlov	(0.6 m/s)/rajoittamaton	Jopa 20 kW, riippuen koosta
Thropton Energy Services (Iso-Britannia)	Water current turbine	Aksiaalinen potkuri	(0.6 m/s)/riippuu halkaisijasta	Jopa 2 kW
Tidal Energy (Australia)	Davidson-Hill Venturi (DHV) Turbine	Vertikaali	Min. 2 m/s	4.6 kW
Seabell (Japani)	Stream	Vertikaali kaksikko	(0.6 m/s)/rajoittamaton	0.5-10 kW malleja
New Energy Corporation (Kanada)	EnCurrent Hydro Turbine	Vertikaali	Max. teholla 3 m/s	5 kW (ja 10 kW)
Eclectic Energy (Iso-Britannia)	DuoGen-3	Aksiaalinen potkuri	Min. 0.93 m/s/Max. 4.63 m/s	1.9 kW
Alternative Hydro Solutions (Kanada)	Free-stream Darrieus water turbine	Vertikaali	(0.5 m/s)/riippuu halkaisijasta	Jopa 2-3 kW
Energy Alliance (Venäjä)	Sub-merged hydro unit	Vertikaali	Min. 3 m/s	1-5 kW (ja > 10 kW)

Kuva 3.7. In-stream-yrityksiä ja niiden teknologioita (Vermaak et al. 2014, s. 631).

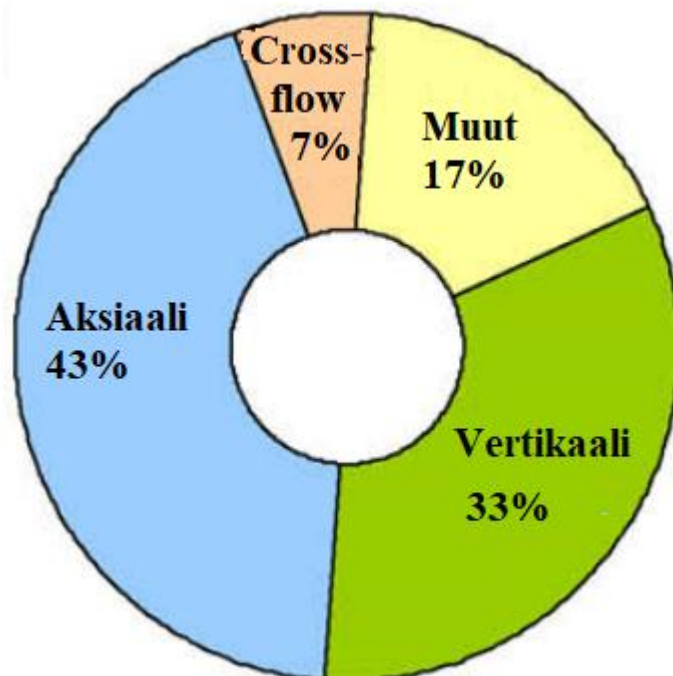
Muita vapaavirtausvoimaloita valmistavia yrityksiä:

- Hydrovolts (USA): Savonius-turbiini, teho jopa 10 kW.
- Smart Hydro Power (Saksa): Aksiaaliturbiini, teho jopa 5 kW.
- Idenergie (Kanada): Darrieus-turbiini, teho n. 0.5 kW.
- Xinda Green Energy (Kiina): Aksiaaliturbiini, teho n. 0.6 kW.
- Instream Energy Systems (Kanada): Darrieus-turbiini, teho jopa 25 kW.

## 4 TURBIINIT

### 4.1 Cross-flow- ja vertikaaliturbiinit

Turbiineita, joiden pyörimisakselit ovat kohtisuorassa veden virtaukseen nähden, kutsutaan asennustavasta riippuen joko vertikaali- tai cross-flow-turbiineiksi. Cross-flow-turbiineja voidaan kutsua myös vesipyöriksi. Vertikaaliturbiinien pyörimisakselit ovat pystysuorassa, kun taas cross-flow-turbiinien pyörimisakselit ovat vedenpinnan suuntaisesti. Molemmissa asennustavoissa voidaan käyttää samanlaisia turbiineja, sillä toimiakseen turbiinien tulee olla kohtisuorassa virtaukseen nähden ja molemmissa asennustavoissa tämä vaatimus täyttyy.

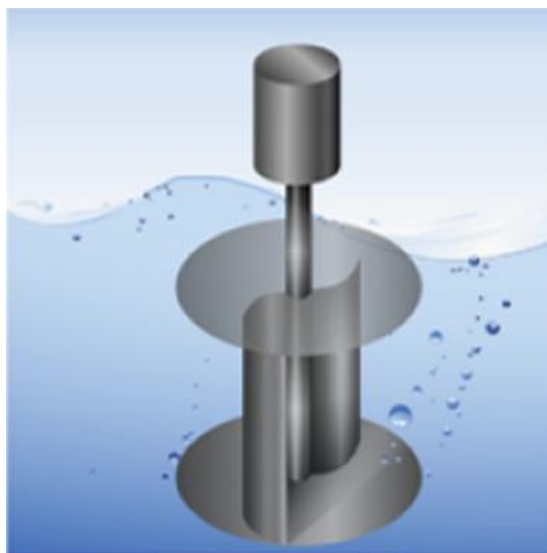


Kuva 4.1. In-stream-turbiinien asennustavat tutkimuksissa (Khan et al. 2009, s. 1829).

Kuvassa 4.1 on esitetty vapaavirtausturbiinien asennustapojen yleisyyttä pyörimisakselien mukaan jaoteltuna. Kuvasta nähdään, että aksiaaliturbiini on yleisin in-stream-voimaloiden turbiinimalli. Virtaukseen nähden kohtisuorassa asennustavassa vertikaaliakseliset ovat paljon yleisempiä kuin cross-flow-akseliset. Cross-flow-turbiinien toiminta perustuu yleensä vastuseroon ja niiden hyötysuhde on huonompi kuin vertikaaliturbiinien, joiden toiminta perustuu nosteeseen. (Khan et al. 2009, s. 1829-1830)

Vertikaaliturbiinit toimivat saman periaatteen mukaan kuin nosteeseen perustuvat aksiaaliturbiinit. Pitkin turbiinien siipiä muodostuu paine-eroa, mikä aiheuttaa pyörimisliikkeen. Vertikaaliturbiinien toiminta voi perustua myös vastukseen nosteen sijasta, kuten Savonius-turbiini. Koska vertikaaliturbiinien pyörimisakseli on kohtisuorassa veden virtaukseen nähden, siipien kohtauskulma virtaukseen muuttuu jaksottaisesti. Jaksottainen kohtauskulman muuttuminen aiheuttaa jaksottaista kuormitusta turbiiniin, mikä lisää turbiinin rakenteen väsymisnopeutta. Jaksottaista kuormitusta voidaan vähentää käyttämällä kierteisiä siipiä suorien sijasta. (Laws, N.D. & Epps, B.P. 2016, s. 1247)

#### 4.1.1 Savonius-turbiini



Kuva 4.2. Savonius-turbiini (Kumar A. & Saini R.P. 2016, s. 294).

Savonius-turbiinin rakenne on hyvin yksinkertainen, sen valmistuskustannukset ovat pienet sekä meluhaitat vähäiset. Turbiini muodostuu yleensä kahdesta, erikoistapauksessa kolmesta, vertikaalisesta puolisyylinteristä, jotka asennetaan yleensä osittain limittäin, kuten kuvassa 4.2 on esitetty. Savonius-turbiinin rakenne mahdollistaa veden virtauksen kaikista pyörimisakselia kohtisuorista suunnista. Sillä on myös hyvät käynnistymisominaisuudet, minkä vuoksi Savonius-turbiinia voidaan käyttää lisänä muissa turbiineissa takaamaan roottorin käynnistyminen. Savoniuksen hyötysuhde on kuitenkin huonompi kuin muilla vertikaaliturbiineilla. Savonius-turbiinin toiminta perustuu siipien koveran ja kuperan puolen vastuseroon, kun ne pyörivät akselinsa ympäri. Koveran puolen vastus on suurempi kuin kuperan puolen vastus ja se saa aikaan

pyörimisliikkeen. Savonius-turbiinit kykenevät toimimaan alhaisessa virtausnopeudessa, jo 0.5 m/s virtauksella turbiini toimii. (Kumar A. & Saini R.P. 2016, s. 292)

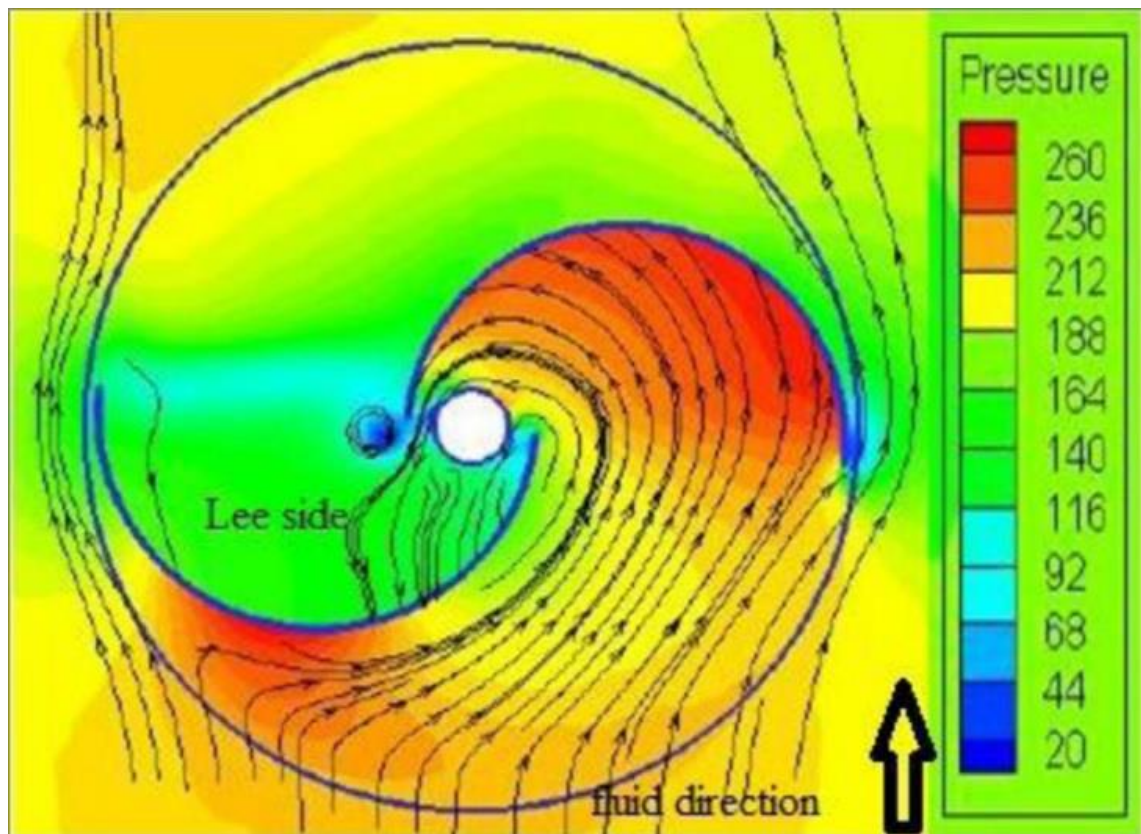
Savonius-turbiinin toimintaan vaikuttavia parametrejä ovat päätylevy, korkeuden ja halkaisijan suhde, siipien päällekkäisyys, siipien etäisyys, siipien lukumäärä, monivaiheisuus, siiven muoto, siiven kärjen kehänopeuden suhde virtausnopeuteen sekä asennuspaikan ominaisuudet (Kumar A. & Saini R.P. 2016, s. 293). Optimaalisen Savonius-turbiinin parametrien määrittäminen on edelleen avoin kysymys, mutta tutkimuksissa on saatu selvitettyä eri ominaisuuksien vaikutuksia turbiinin toimintaan.

Turbiinin korkeuden ja halkaisijan suhde vaikuttaa oleellisesti siihen kuinka suuri teho turbiinilla saavutetaan. Kumarin ja Sainin (2016, s. 296) taulukosta voidaan todeta, että kaksivaiheisella suorasiipisellä turbiinilla suurempi korkeuden ja halkaisijan suhde parantaa hyötysuhdetta, kun taas erilaisilla turbiiniasetelmilla optimaalinen korkeuden ja halkaisijan suhde vaihtelee. Rakenteellisten syiden vuoksi korkeuden ja halkaisijan suhde joudutaan kuitenkin pitämään suhteellisen pienenä. Suuri turbiinin halkaisija tuottaa enemmän vääntöä pienellä pyörimisnopeudella. Savonius-turbiinin kulmakiihtyvyys suurenee ja roottorin momentti ja hitaus pienenevät korkeuden ja halkaisijan suhteen kasvaessa. Useiden tutkimuksien perusteella voidaan sanoa, että hyvä suorituskyky saavutetaan korkeuden ja halkaisijan suhteen ollessa yhden ja kahden välillä. (Kumar A. & Saini R.P. 2016, s. 294-295)

Päätylevyt parantavat Savonius-turbiinin tehokkuutta huomattavasti. Päätylevyt estävät nesteen virtaamisen pois koveralta sivulta, mikä säilyttää vastuseron kuperan ja koveran puolen välillä. Optimaalinen päätylevyn halkaisija on 1.1 kertaa roottorin halkaisija. Päätylevyt parantavat tehokerrointa jopa 36 prosentin verran. (Kumar A. & Saini R.P. 2016, s. 295)

Savonius-turbiinin optimoinnissa siipien limityksen määrä on tärkeä ominaisuus. Kaiken kattavaa optimaalista päällekkäisyyden suhdelukua ei ole, sillä optimaalisen limityksen määrä riippuu käytettävästä turbiinimallista. Päällekkäisyyden suhdeluvun optimaaliset arvot sijaitsevat välillä 0.15-0.25, missä suorituskyky on yleensä paras mahdollinen. Kuvassa 4.3 on havainnollistettu puoliskoiden päällekkäisyyden vaikutusta paineeseen turbiinissa ja miten virtaus silloin käyttäytyy. Kuvasta voidaan nähdä palaavan eli kuperan sivun pinnalla vaikuttavan suuren paineen ja saman sivun suojapuolella paine on hyvin pieni. Tämä paine-ero hidastaa pyörimisliikettä, mutta limittäessä puoliskoita

virtausta pääsee myös palaavan puoliskon suojapuolelle. Tämä lisää suojapuolen painetta ja siten vähentää palaavan sivun eri puolilla vaikuttavaa paine-eroa. Paine-eron pieneneminen lisää vääntömomenttia ja siten sopivan suuruinen puoliskoiden limitys nostaa turbiinin suorituskykyä. Siipien välinen etäisyys vaikuttaa myös turbiinin suorituskykyyn. Paras suorituskyky saavutetaan siipien välisen etäisyyden ollessa nolla. (Kumar A. & Saini R.P. 2016, s. 295-299)

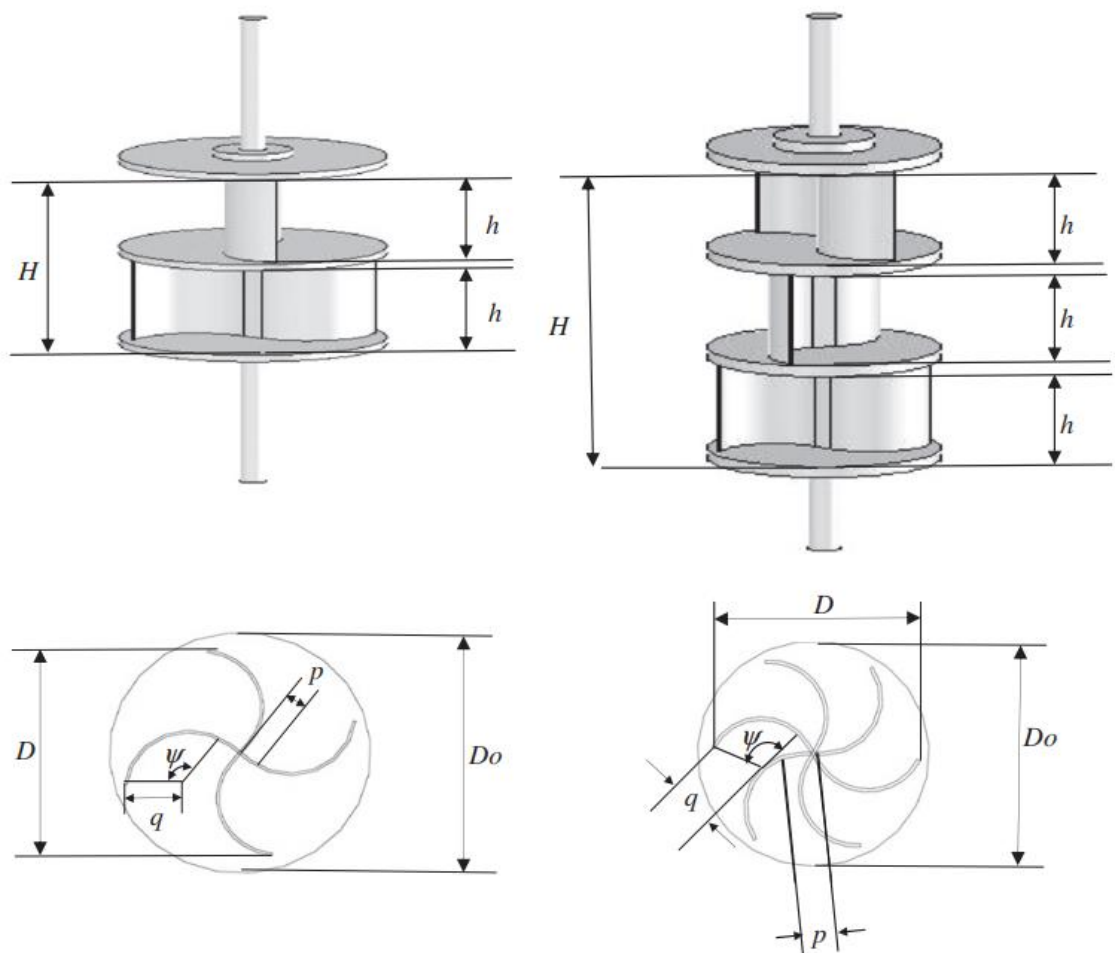


Kuva 4.3. Puoliskoiden limityksen vaikutus paineeseen roottorissa (Kumar A. & Saini R.P. 2016, s. 299).

Siipien lukumäärä vaikuttaa myös roottorin suorituskykyyn. Turbiinin tehokkuus heikentyy, jos siipiä on enemmän kuin kaksi. Tämä suorituskyvyn heikentyminen johtuu tapahtumasarjasta, jossa jokainen siipi vaikuttaa sitä seuraavan siiven tehokkuuteen heikentävästi. Kolmesiipisellä roottorilla saavutetaan kuitenkin parempi käynnistymisherkkyys. (Kumar A. & Saini R.P. 2016, s. 299)

Roottorin kulma vaikuttaa staattisen vääntömomentin suuruuteen, minkä vuoksi turbiinin suorituskyky vaihtelee suuresti pyörähdyksen aikana. Tavallisesti Savonius-turbiini on yksivaiheinen, mutta asentamalla kaksi tai kolme turbiinia päällekkäin saadaan

rakennettua kaksi- tai kolmevaiheturbiineja. Kuvassa 4.4 on esitetty kaksi- ja kolmivaiheturbiinit, missä vasemmalla olevassa kaksivaiheturbiinissa vaiheiden välillä on 90 asteen ero ja kolmivaiheturbiinissa vaihe-ero on 60 astetta. Asentamalla useampia yksivaiheisia turbiineita päällekkäin staattisen vääntömomentin muutos pienenee ja vääntömometti pysyy tasaisempuna koko kierroksen ajan, mistä seuraa parantunut suorituskyky ja rakenteen parempi väsymiskestävyys. Kaksivaiheisella turbiinilla saavutetaan paras hyötysuhde, sillä kolmivaiheisen turbiinin suurempi massa ja siitä johtuva hitaus heikentävät suorituskykyä verrattuna kaksivaiheiseen. (Kumar A. & Saini R.P. 2016, s. 300)

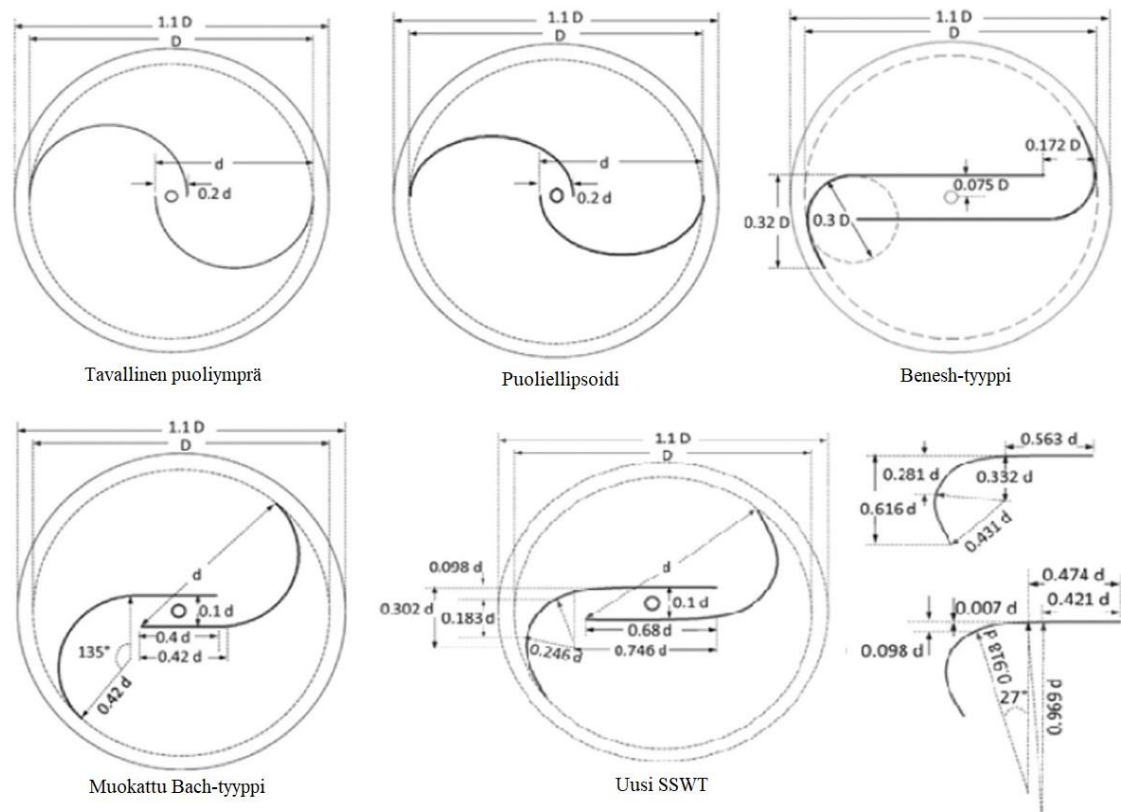


Kuva 4.4. Kaksi- ja kolmivaiheturbiinit kuvattuna isometrisesti ja ylhäältä (Golecha et al. 2011, s. 3214).

Tavalliset Savonius-turbiinit kärsivät suuresta staattisen vääntömomentin muutoksesta, jota voidaan pienentää myös siipien muotoilulla. Kumarin ja Sainin (2016, s. 301) mukaan kierteisten siipien korkeampi hyötysuhde, hyvä käynnistysherkkyys ja tasainen



pyöriminen tarjoavat hyvän suorituskyvyn verrattuna tavallisiin puolisynterinin muotoisiin siipiin. Kierteiset siivet tuottavat myös enemmän vääntömomenttia niiden pidemmän momenttivarren ansiosta ja ne auttavat myös vähentämään momentin oskillaatiota eli heilahtelua. Kierteisillä siivillä varustettu Savonius-roottori voidaan käsittää turbiiniksi, jossa on äärettömän monta vaihetta. Suurin tehokerroin saavutetaan siipien kiertokulman ollessa 180 astetta. Tutkimuksissa on myös huomattu, että roottorit, joissa ei ole akselia, tuottavat suuremman hyötysuhteen kuin perinteiset akselilla varustetut roottorit. (Kumar A. & Saini R.P. 2016, s. 301-303)

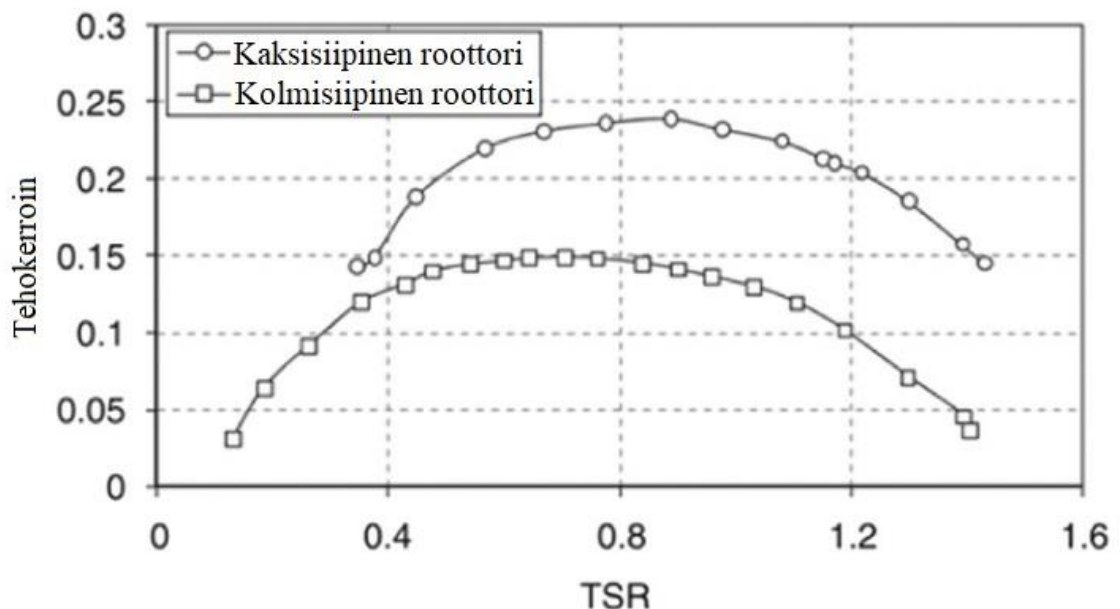


Kuva 4.5. Savonius-turbiinin erilaisia siiven muotoiluja (Kumar A. & Saini R.P. 2016, s. 304).

Kuvassa 4.5 esitetään Savonius-roottorin vaihtoehtoisia siipimalleja. Siiven vaikutusta selvittäneessä tutkimuksessa huomattiin suorituskyvyn paranevan tavalliseen puoliympyrään verrattuna 3.3 % muokatulla Bach-siivellä, 6.9 % Benesh-siivellä, 19.2 % puoliellipsoidilla ja 34.8 % SSWT-siivellä. SSWT-siiven geometria pienentää palaavan siiven negatiivista momenttia ja lisää staattisen vääntömomentin suuruutta. SSWT-siipi tuottaa 31.6 prosenttia suuremman staattisen vääntömomentin kertoimen verrattuna

tavalliseen puoliympyräsiipeen. Roottorin toimintaa voidaan tehostaa edelleen muotoilemalla siivet tuottamaan nostetta. (Kumar A. & Saini R.P. 2016, s. 304)

Siiven kärjen kehänopeuden suhde virtaukseen vaikuttaa oleellisesti turbiinin hyötysuhteeseen, tästä käytetään lyhennystä TSR, joka tulee englannin kielisestä termistä ”tip speed ratio”. TSR:n optimaaliseen arvoon vaikuttaa oleellisesti turbiinin mekaaniset ominaisuudet, kuten siipien lukumäärä ja roottorin halkaisija. Jos turbiini pyörii liian hitaasti, siivet eivät kykene käyttämään tarpeeksi virtausta hyväkseen. Jos turbiini pyörii liian nopeasti, roottori joutuu pyörimään turbulentsissa virtauksessa ja suorituskkyky laskee. Kuvassa 4.6 esitetään TSR:n vaikutus tehokertoimeen kaksi- ja kolmisiipisille roottoreille. Optimaalinen TSR kaksisiipiselle turbiinille on 0.9 ja kolmisiipiselle turbiinille 0.7. (Kumar A. & Saini R.P. 2016, s. 307)



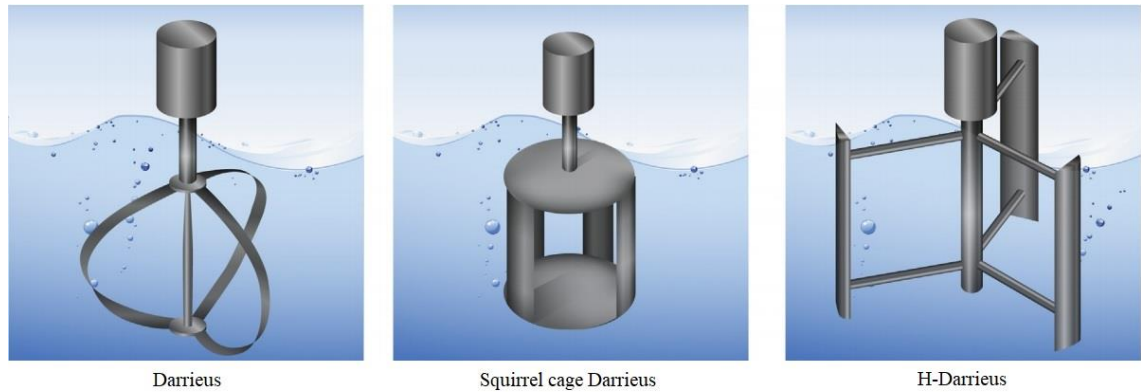
Kuva 4.6. Roottorin siiven kärjen kehänopeuden suhde virtaukseen (Kumar A. & Saini R.P. 2016, s. 307).

#### 4.1.2 Darrieus- ja Gorlov-turbiinit

Darrieus- ja Gorlov-turbiinien toiminta perustuu niiden siipien ympärille syntyvään paine-eroon, joka saa aikaan nostetta ja siten aikaansaa turbiinien pyörimisliikkeen (Laws N.D. & Epps B.P. 2016, s. 1246-1247). Turbiinien pyörimisakselien tulee olla kohtisuorassa virtaukseen nähden, mutta kaikki kohtisuorasta tasosta tuleva virtaus soveltuu turbiineille. Koska pyörimisakseli on kohtisuorassa virtausta vastaan, turbiinin siipien kohtauskulma muuttuu pyörähdyksen aikana. Tästä johtuva vääntömomentin



jaksottainen muuttuminen on kaikille vertikaali- ja cross-flow-turbiineille yhteinen ongelma, joka aiheuttaa siipiin jaksottaisen kuormitusvaihtelun. Tämän ongelman poistamiseksi turbiinissa voidaan käyttää kierteisiä siipiä. Tätä Darrieus-turbiinista sovellettua mallia kutsutaan Gorlov-turbiiniksi, jonka siivet ovat kierteiset niiden ollessa Darrieus-turbiinissa suorat. (Vermaak et al. 2014, s. 627-629)



Kuva 4.7. Darrieus-roottoreiden rakenteet (Vermaak et al. 2014, s. 629).



Kuva 4.8. Gorlov-turbiini (Laws N.D. & Epps B.P. 2016, s. 1248).

Kuvasta 4.7 nähdään Darrieus-turbiinien rakenteelliset ratkaisut. Suorilla siivillä olevat Darrieus-turbiinit ovat yleisiä jokiin asennettavissa in-stream-turbiineissa, mutta kaareva siipisiä malleja ei juurikaan käytetä. Darrieus-turbiinin pohjalta kehitetty Gorlov-turbiini tuottaa pyöriessään huomattavasti tasaisemman vääntömomentin kuin tavallinen

suorasiipinen Darrieus-turbiini. Kuvassa 4.8 on esitetty Gorlov-roottori ja sen siipien kierteisyyden rakenne. (Vermaak et al. 2014, s. 628)

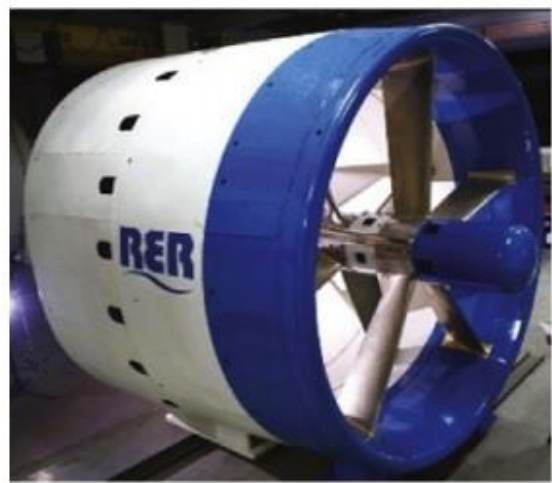
Suorasiipisen Darrieus- ja Gorlov-turbiinin välillä on vain hyvin pieni ero hyötysuhteessa, mutta Gorlov-roottorin tasaisempi vääntömomentti vähentää rakenteisiin kohdistuvaa kuormitusta ja siten sen käyttöiän voidaan olettaa olevan pidempi. Darrieus-roottorin hyötysuhdetta ja käynnistysherkkyyttä voidaan parantaa käyttämällä siipiä, joiden kallistusta voidaan muuttaa tarpeen vaatiessa. (Vermaak et al. 2014, s. 628)

## 4.2 Aksiaaliturbiinit

Aksiaaliturbiinit, joita voidaan kutsua myös horisontaaliturbiineiksi, ovat toinen ryhmä, johon in-stream-turbiinit jaetaan. Aksiaaliturbiinit muistuttavat ulkoisesti potkureita ja niiden toiminta perustuu potkurin siipien aikaansaamaan nosteeseen. Samaa periaatetta hyödyntävät lentokoneiden ja tuuliturbiinien siivet (Laws N.D. & Epps B.P. 2016, s. 1246). Nämä turbiinimallit ovat yleisesti käytettyjä tuulivoimaloissa ja niillä saavutettava korkea hyötysuhde tekee niistä varteenotettavia vaihtoehtoja myös vesivoimalakäyttöön. Maailmalla käynnissä olevissa in-stream-projekteissa aksiaaliturbiinit ovat yleisin ratkaisu valittaessa roottoria voimalaan (Yuce M.I. & Muratoglu A. 2015, s. 79). Kuvassa 4.9 on esitetty kaksi aksiaaliroottorimallia, joista RER Hydron turbiini on varustettu diffuusorilla ja Verdant on tavallinen kolmisiipinen potkuriturbiini. RER Hydron roottori on monivaiheinen, sillä sen siivet ovat kolmessa rivissä, joista ensimmäinen ja viimeinen rivi toimivat generaattorin staattoreina.



Verdant Power



RER Hydro

Kuva 4.9. Aksiaaliturbiinimalleja (Laws N.D. & Epps B.P. 2016, s. 1247).

### 4.3 Turbiinityyppien edut ja haittapuolet

Alla olevassa taulukossa vertaillaan aksiaali- ja vertikaaliturbiinien etuja ja haittoja toisiinsa nähden (mukaillen Vermaak et al. 2014, s. 629).

Taulukko 1. Turbiinimallien vertailua.

<b>Turbiini-malli</b>	<b>Edut</b>	<b>Haitat</b>
<b>Aksiaali-turbiini</b>	<p>Itsekäynnistyvä rakenne.</p> <p>Vaihdelaatikko ei välttämätön käytettäessä virtauskanavaa.</p> <p>Optimaalinen suorituskyky saavutetaan korkeammilla kierrosluvuilla, mikä helpottaa vaihteiston kytkentää.</p> <p>Siipien kulman aktiivinen seuranta ja säätäminen mahdollistavat korkeamman hyötysuhteen sekä suojan ylikierroksia vastaan.</p>	<p>Korkeat generaattorin kytkentäkustannukset, johtuen vedenalaisesta sijoittamisesta.</p> <p>Virtauskanavia ei voi helposti käyttää kelluttamaan turbiinia.</p> <p>Siiven muodon optimointi haastavaa (Khan et al. 2009, s. 1832).</p>
<b>Vertikaali-turbiini</b>	<p>Matalat generaattorin kytkentäkustannukset, johtuen mahdollisuudesta sijoittaa se vedenpinnan yläpuolelle.</p> <p>Muodostaa vähemmän melua.</p> <p>Virtauksen suunnalla ei merkitystä.</p> <p>Sylinterimäinen muoto mahdollistaa monenlaisten virtauksenohjaimien sopivan asennuksen.</p> <p>Toimii paremmin matalassa vedessä, missä veden virtausnopeus hidas tai vaihteleva tai vedenpinnan korkeus muuttuva.</p> <p>Rakenne yksinkertainen, joten niiden valmistaminen mahdollisesti edullisempaa ja helpompaa.</p>	<p>Matalasta käynnistymisvääntömomentista johtuen, usein tarve ulkoiselle käynnistysmekanismille.</p> <p>Suorasiiipiset turbiinit tuottavat väreilyä vääntömomenttiin.</p> <p>Matalampi hyötysuhde.</p>

## 5 MAHDOLLISUUS 3D-TULOSTAMISEEN

In-stream-voimalat ovat jokiin ja kanaviin asennettaessa yleensä vain muutaman kilowatin tehoisia yksioita. Kuten aikaisemmin tekstissä on mainittu, voimaloista voidaan muodostaa tehokkaampia kokonaisuuksia rakentamalla niistä useita turbiineja sisältäviä voimalaryhmiä, mutta yksittäisen turbiinin teho on kuitenkin aina suhteellisen pieni. Tämän seurauksena yksittäisen in-stream-turbiinikokonaisuuden valmistus- ja käyttökustannukset tulisivat olla mahdollisimman pienet, mikäli sähköenergiaa halutaan tuottaa kilpailukykyisesti.

Vapaavirtausvoimaloiden osien tulostaminen 3D-tekniikalla voisi alentaa yksikkökustannuksia merkittävästi ja tämän valmistusmenetelmän tarjoama mahdollisuus olisikin tarpeellista tutkia. Savonius-roottorin yksinkertainen rakenne voisi soveltua 3D-tulostamiseen, sillä sen siivet tuskin tarvitsisivat koneistamista tulostuksen jälkeen. Myös Darrieus- ja Gorlov-roottorien 3D-tulostamisen mahdollisuus tulisi selvittää, mutta niiden siipien nosteen mahdollistavan muotoilun tulostaminen asettaa lisähaasteen. Aksiaaliturbiinien siipien muotoilu on hyvin tarkkaa, jotta roottorin siivet tuottavat pyörimisliikkeen aikaansaavaa nostetta. Tästä syystä aksiaali- eli potkurityyppisten roottorien valmistaminen vain 3D-tulostamalla voi olla haastavaa, mutta tämäkin mahdollisuus tulisi selvittää.

Savonius- ja Darrieus-roottorien toiminnassa tapahtuva väntömomentin jaksottainen muuttuminen aiheuttaa rakenteisiin kohdistuvaa väsyttävää kuormitusta, joka lisää rakenteissa käytettävien materiaalien vaatimuksia. Tämä tulee ottaa huomioon materiaalivalintaa tehtäessä ja 3D-tulostamisessa tulisi voida tarpeen mukaan käyttää myös vahvoja materiaaleja, kuten alumiinia tai terästä. Tavallisesti valmistettu turbiini voi tarvita monia koneistusmenetelmiä, kuten valamista, hitsaamista tai poraamista, mutta 3D-tulostamalla valmistetun roottorin koneistamisen tarve voi olla hyvin pieni tai jälkikoneistusta ei tarvita lainkaan (Duda, T. & Raghavan, L.V. 2016, s. 105). Tämän ansiosta metallin 3D-tulostaminen voi laskea valmistuskustannuksia, vaikka metallin 3D-tulostaminen on edelleen suhteellisen kallista.

## 6 YHTEENVETO

In-stream-vesivoimalaitokset tuovat varteenotettavan vaihtoehdon sähköntuotantoon alueille, jotka sijaitsevat sähköverkon ulkopuolella tai missä tavanomaista vesivoimaa on vaikea hyödyntää. Suomessa pienvesivoima on edelleen tavallista padottua vesivoimaa, mutta potentiaalisia käyttökohteita vapaavirtausturbiineille olisi esimerkiksi syrjäisten loma-asuntojen tai matkapuhelinverkon tukiasemien sähkötarpeen kattamiseen. Maailmanlaajuisesti tarve edulliselle ja varmatoimiselle sähköverkon ulkopuolella toimivalle sähköntuotantomuodolle on hyvin suuri ja markkinoilla onkin jo tarjolla in-stream-voimalaratkaisuja. Voimalat voivat nousta laajempaan käyttöön, mikäli sähkön kokonaistuotantokustannuksia saadaan pienennettyä lähemmäs kilpailevien sähkön tuotantomenetelmien kustannuksia. Turbiinien ja niistä koostettavien turbiiniryhmien optimaalisen suorituskyvyn ja hyötysuhteen tutkiminen sekä halvempien valmistusmenetelmien käyttöönotto ovat avaintekijöitä in-stream-turbiinien yleistymisessä.

In-stream-vesivoimalan tärkein yksittäinen osa on turbiini. Turbiinit jaetaan kahteen kategoriaan, aksiaali- ja vertikaaliturbiineihin. Yleisesti voidaan sanoa aksiaaliturbiinien olevan suorituskyvyltään vertikaaliturbiineja tehokkaampia, mutta vertikaaliturbiinien yksinkertaisempi rakenne sekä muut käyttökohteesta riippuvat hyvät ominaisuudet tekevät niistäkin potentiaalisia vaihtoehtoja. Voimaloiden valmistuskustannuksia voidaan todennäköisesti laskea 3D-tulostamalla in-stream-turbiinin osia, mikä voi edesauttaa vapaavirtausvoimaloiden yleistymistä. Varsinkin Savonius-turbiinin yksinkertainen rakenne voisi mahdollistaa sen 3D-tulostamisen. Vapaavirtausvoimaloiden asennuksessa on kolme vaihtoehtoa, joista valitaan turbiinityypille ja käyttöolosuhteisiin sopiva asennustapa. Asennustapoja ovat sijoittaminen turbiini virtauksen pohjalle, kelluva asennus tai turbiinin kiinnittäminen lähellä pintaa olevaan rakennelmaan. Kaikki energiantuotantomuodot aiheuttavat ympäristöhaittoja, niin myös in-stream-vesivoimalat. Vapaavirtausvoimaloiden aiheuttamat ympäristöhaitat ovat kuitenkin huomattavasti paikallisempia ja pienempiä kuin tavanomaisten vesivoimaloiden ympäristövaikutukset, sillä in-stream-voimalat eivät aiheuta juurikaan haittoja vesieliöille tai ympäristölle, mutta ihmisten liikkumista vesistöjä pitkin ne voivat rajoittaa.

## LÄHDELUETTELO

Anyi, M., Kirke, B., 2010. Evaluation of small axial flow hydrokinetic turbines for remote communities. *Energy for Sustainable Development*, 14 (2), s. 110-116.

Duda, T., Raghavan, L.V., 2016. 3D Metal Printing Technology, *IFAC-PapersOnLine*, 49 (29), s. 103-110.

Energiateollisuus, 2018. Perustietoa energia-alasta, Energiantuotanto, Sähköntuotanto, Vesivoima [verkkosivu]. Saatavissa: [https://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/vesivoima](https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/vesivoima) [viitattu 8.3.2018]

Golecha, K., Eldho, T.I., Prabhu, S.V., 2011. Influence of the deflector plate on the performance of modified Savonius water turbine. *Applied Energy*, 88 (9), s. 3207-3217.

Khan, M.J., Bhuyan, G., Iqbal, M.T., Quaioco, J.E., 2009. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. *Applied Energy*, 86 (10), s. 1823-1835.

Khan, M.J., Iqbal, M.T., Quaioco, J.E., 2008. River current energy conversion systems: Progress, prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (8), s. 2177-2193.

Kumar, A., Saini, R.P., 2016. Performance parameters of Savonius type hydrokinetic turbine - A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, s. 289-310.

Laws, N.D., Epps, B.P., 2016. Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, s. 1245-1259.

Pienvesivoimayhdistys, 2009. Pienvoimalaopas [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://pienvesivoimayhdistys.com/yleista-2/> [viitattu 3.3.2018]

SSWM, 2017. Perspectives, Water&Nutrient Cycle, Water Distribution, Hardwares, Hydropower (Small-scale) [verkkosivu]. Saatavissa: <https://www.sswm.info/water-nutrient-cycle/water-distribution/hardwares/water-network-distribution/hydropower-%28small-scale%29> [viitattu 4.3.2018]

Tilastokeskus, 2017. Tilastot, Energia, Sähkön ja lämmön tuotanto [verkkosivu]. Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/salatuo/2016/salatuo\\_2016\\_2017-11-02\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/salatuo/2016/salatuo_2016_2017-11-02_tie_001_fi.html) [viitattu 6.3.2018]

Vermaak, H.J., Kusakana, K., Koko, S.P., 2014. Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, s. 625-633.

Wikipedia, 2017. Vesivoimalat Suomessa [verkkosivu]. Saatavissa: [https://fi.wikipedia.org/wiki/Vesivoimalat\\_Suomessa](https://fi.wikipedia.org/wiki/Vesivoimalat_Suomessa) [viitattu 6.3.2018]

Yuce, M.I., Muratoglu, A., 2015. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, s. 72-82.

