



KELLUVIEN AURINKOVOIMALOIDEN VAIKUTUS VESIEKOSYSTEEMEIHIN

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Ympäristötekniikan kandidaatintyö

2023

Kia Dillström

Tarkastajat: Tutkijaopettaja Sanni Väisänen

Tutkijatohtori Laura Lakanen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Ympäristötekniikka

Kia Dillström

Kelluvien aurinkovoimaloiden vaikutus vesiekosysteemeihin

Ympäristötekniikan kandidaatintyö

2023

30 sivua, 5 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastajat: Tutkijaopettaja Sanni Väisänen ja tutkijatohtori Laura Lakanen

Avainsanat: Kelluvat aurinkovoimalat, aurinkovoima, vesiekosysteemit

Tässä kandidaatintyössä selvitetään kelluvien aurinkovoimaloiden vaikutuksia vesiekosysteemeihin. Työn tutkimusmenetelmänä toimii kirjallisuuskatsaus ja työn teoria sekä tulokset perustuvat aiheesta tehtyihin aiempiin tutkimuksiin ja julkaisuihin. Työn teoriaosuudessa perehdytään vesiekosysteemeihin, aurinkovoimaan ja aurinkovoimaloihin vesiekosysteemeissä. Työn pääpainona on kelluvien aurinkovoimaloiden ekosysteemivaikutukset.

Kelluva aurinkovoima on kasvava energian tuotantomuoto. Kelluva aurinkovoima kiinnostaa maailmalla, sillä se ei tarvitse käyttöönsä arvokasta maapinta-alaa. Maahan asennettavien aurinkovoimaloiden haasteena on se, että ne tarvitsevat jopa 20 kertaa enemmän maapinta-alaa kuin perinteiset fossiilienergialla toimivat laitokset. Kelluvat aurinkovoimalat asennetaan erilaisten vesialtaiden pinnalle ja niitä on mahdollista hyödyntää myös hybridikäytössä, eli yhdistää energiantuotanto johonkin toiseen voimalaan, kuten vesi- tai tuulivoimalaan.

Kandidaatintyön tuloksena voidaan todeta, että kelluvilla aurinkovoimaloilla on ekosysteemin kannalta sekä hyötyjä että haittoja. Merkittävimmät hyödyt ekosysteemin kannalta ovat veden haihdunnan sekä haitallisten leväkukintojen väheneminen ja kellukerakenteiden tarjoamat uudet kasvualustat ekosysteemin eliöille. Myös haittoja nousi esille ja merkittävimmät haitat ekosysteemin kannalta ovat vesikasvien yhteyttämisen väheneminen, veden laadun sekä biodiversiteetin heikkeneminen, vieraslajien leviäminen ja veden pohjan häiriöt.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Environmental Technology

Kia Dillström

Effects of floating solar power plants on aquatic ecosystems

Bachelor's thesis

2023

29 pages, 5 figures and 1 table

Examiners: Associate professor Sanni Väisänen and post-doctoral researcher Laura Lakanen

Keywords: Floating solar, floatovoltaics, floating solar PV, aquatic ecosystems

The aim of this bachelor's thesis is to gather the effects of floating solar power plants on water ecosystems. Research method of the thesis is literature review, and the theory and results are based on prior studies and publications on the topic. The theory section of the thesis includes an introduction to aquatic ecosystems, solar power, and solar power plants in aquatic ecosystems. The main focus of the thesis are the effects of the solar power plant on the water ecosystems.

Floating solar energy is a growing technology. Floating solar energy is raising interest around the world, because it can help save valuable land space. The problem with ground-based solar energy plants is that those can need up to 20 times more land space than traditional fossil-fueled power plants. Floating solar plants are installed on a water body and it's possible to create hybrid systems where floating solar power is used with another power plant, like wind or hydro power plant.

Based on the results obtained in the bachelor's thesis, floating solar power plants have both positive and negative effects on aquatic ecosystems. The most significant benefits in terms of the ecosystem are reduction of water evaporation, reduction of harmful algal blooms and new growing platforms for various organisms offered by the floating structures. The most significant disadvantages in terms of the ecosystem are reduction of photosynthesis of aquatic plants, loss of biodiversity, spreading of invasive species and disturbance on the bottom of the water body.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

FPV	floating photovoltaic
GW	gigawatti
HDPE	tiheä polyeteeni
HFPV	hybrid floating photovoltaic
PV	photovoltaic
TWh	terawattitunti

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

1. Johdanto.....	6
2. Vesiekosysteemit	8
2.1. Eliöstö	10
2.2. Ihmisen toiminta.....	11
3. Aurinkovoima.....	13
3.1. Aurinkovoimaloiden toimintaperiaate	13
3.2. Tulevaisuuden näkymät	14
4. Aurinkovoimalat vesiekosysteemissä.....	16
4.1. Asennus ja sijoituskohteet.....	16
4.1.1. Hybridijärjestelmät	18
4.2. Kehitysnäkymät.....	19
5. Vaikutukset vesiekosysteemiin	20
5.1. Hyödyt.....	20
5.2. Haitat	21
6. Yhteenveto.....	24
Lähteet	26

1. Johdanto

Maailma ajautui globaaliin energiakriisiin vuonna 2022. Kriisin taustalla vaikutti koronapandemia sekä ensimmäisen pandemiavuoden jälkeinen talouden äkillinen elpyminen vuonna 2021, mutta kriisi äityi äärimmilleen helmikuussa 2022 syttyneen Ukrainan sodan jälkeen. Koronapandemialla ja Ukrainan sodalla on ollut suuri vaikutus globaaleihin energiemarkkinoihin, erityisesti maakaasun ja öljyn hintoihin. (IEA 2022a) Energia- sekä ilmastokriisin myötä uusiutuvan energian tuotannolla ja sitä myötä aurinkoenergialla on yhä enemmän kysyntää, koska se tarjoaa mahdollisuuksia kriisien ratkaisemiseksi. Maailman energiankulutus tulee kasvamaan tulevaisuudessa huomattavasti nykyisestä. Nykyistä fossiilista energiantuotantoa tulee korvata sekä uutta energiaa tuottaa fossiilisten energialähteiden sijaan uusiutuvilla energialähteillä. (IEA 2022b)

Aurinkovoimalat tarvitsevat sähköntuotantoon paljon maapinta-alaa tuotettua gigawattia kohden, jopa 20 kertaa enemmän kuin perinteiset fossiilienergialla toimivat laitokset. Ratkaisuksi maankäytön ongelmiin on esitetty erilasten vesialtaiden pinnalle asennettavia kelluvia aurinkovoimaloita (engl. floating PV, FPV, floatovoltaics). Kelluvilla aurinkovoimaloilla voidaan pienentää aurinkoenergialla tuotettavaan sähköön tarvittavaa maapinta-alaa ja tuottaa enemmän energiaa kuin perinteisillä maahan sijoitettavilla aurinkovoimaloilla. Kelluvat aurinkovoimalat, perinteisten maahan asennettavien voimaloiden rinnalla, voivat olla yksi merkittävä uusiutuvan energian lähde tulevaisuudessa. Kelluvia aurinkovoimaloita on kuitenkin käytössä maailmalla toistaiseksi vähän, mutta kiinnostus ja investoinnit niihin ovat kasvussa. Kelluvien aurinkovoimaloiden ympäristövaikutuksia on kuitenkin tutkittu vähän eikä niiden kokonaisvaltaista vaikutusta ympäristöön ja ekosysteemeihin vielä täysin tiedetä. (Almeida et al. 2018, 246, 248)

Kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, mitä vaikutuksia kelluvilla aurinkovoimaloilla on vesiekosysteemeihin, esimerkiksi millaisia vaikutuksia paneelien varjostuksella voi olla vesikasvien yhteyttämiseen vähentyneen auringonvalon vuoksi. Työn tavoitteena on selvittää, mitä kelluvista aurinkovoimaloista tiedetään, riittääkö tämänhetkinen tieto niiden

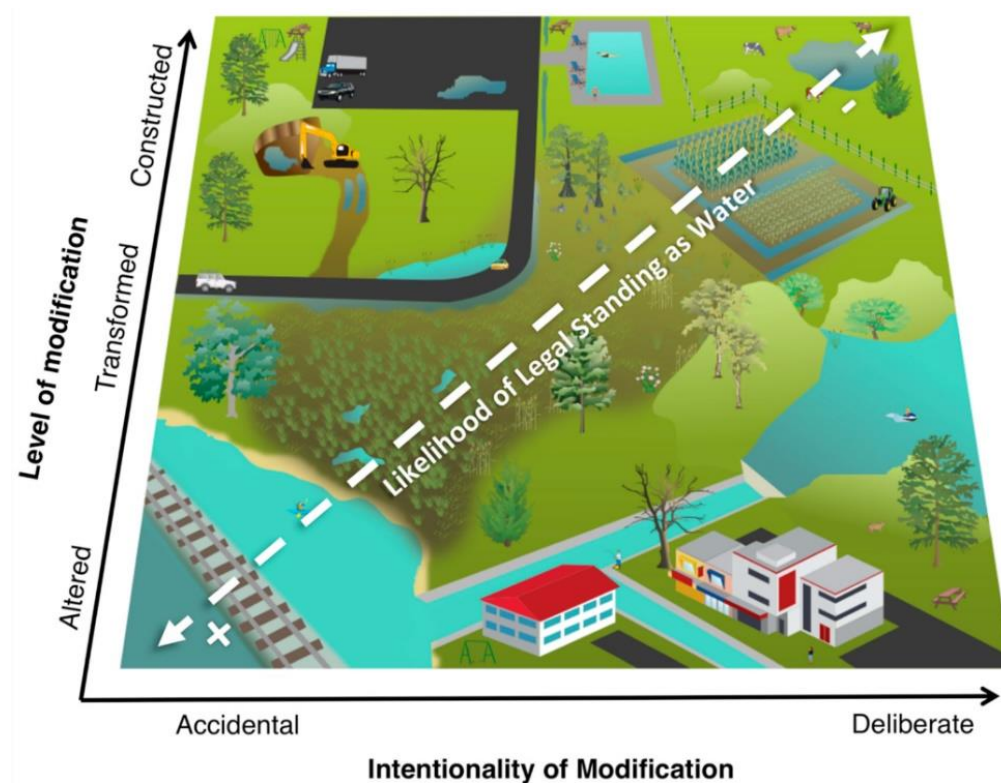
ympäristövaikutusten arviointiin ja mistä seikoista tarvitaan vielä lisää tietoa. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena.

2. Vesiekosysteemit

Ekosysteemillä tarkoitetaan luonnonaluetta, jossa eloton ja elollinen luonto toimivat vuorovaikutuksessa keskenään. Ekosysteemit kykenevät tuottamaan sekä prosessoimaan ekosysteemissä tarvittavan ravinnon, ja niiden tulee pystyä ylläpitämään ympäristön olosuhteita siten, että ekosysteemi pysyy toiminnallisena tulevaisuudessakin. Esimerkiksi järvet ja lammet ovat omia vesiekosysteemejään, joissa vallitsee suotuisat olosuhteet ekosysteemien eliöille sekä tasapaino ravinnon ja eliöiden välillä. (Penttinen & Niinimäki 2010, 12) Vesiekosysteemien toiminta on kuitenkin yhteydessä myös maaekosysteemeihin. Ravinteita siirtyy vesiekosysteemeihin maaekosysteemeistä esimerkiksi valunnan sekä tuulen kuljettaman kasvillisuuden mukana. Jotkin linnut kuljettavat ravintoa vesistöstä maalle ja jotkin hyönteiset elävät osan elinkaarestaan vesistöissä ja päätyvät myöhemmin maaeläinten ravinnoksi. (Haakana 2018, 24) Vesiekosysteemit ovat tärkeitä ihmisille ruoantuotannon, kuten kalastuksen ja kasteluveden, sekä virkistystoiminnan kannalta, mutta vesiekosysteemit ovat itsessään erityisen tärkeitä biodiversiteetin ylläpitämiseksi (Prakash 2021, 312)

Yli kaksi kolmasosaa maapallon pinta-alasta koostuu erilaisista vesiekosysteemeistä. Vesiekosysteemit voidaan karkeasti jakaa makean veden ekosysteemeihin ja meriekosysteemeihin. Meriekosysteemejä on erilaisia riippuen sijainnista ja olosuhteista, esimerkkejä ovat valtameret sekä rannikkoalueet. Makean veden ekosysteemit koostuvat soista sekä seisovista ja juoksevista vesistä, kuten lammista ja joista. Vesiekosysteemit ovat äärimmäisen tärkeitä niin ekosysteemin eliöiden elinympäristöinä kuin ilmastonmuutoksen hillinnässä, ruuantuotannossa sekä teollisuudessa. Meriekosysteemit auttavat hillitsemään ilmastonmuutosta sitomalla ilmakehän hiilidioksidia merenpohjan sedimenttiin. Makean veden ekosysteemeistä saadaan niin juomavettä kuin kasteluvettä maatalouteen ja vesiekosysteemin eläimet ovat ravintoa niin ihmisille kuin eläimille. (Häder et al. 2020, 2) Teollisuudessa vettä kuluu esimerkiksi laitosten jäähdytykseen ja lämmitykseen, mutta myös teollisuuden eri prosesseihin. Esimerkiksi paperiteollisuus on hyvin riippuvainen vedestä osana sen valmistusprosesseja. (Han et al. 2021, 3)

Vesiekosysteemien jakaminen täysin luonnollisiin ja koskemattomiin tai täysin keinotekoi-
siin ekosysteemeihin on vaikeaa, sillä suurin osa olemassa olevista vesiekosysteemeistä on
jotain näiden kahden ääripään väliltä. Vesiekosysteemien keinotekoisuutta voidaan kuiten-
kin arvioida kuvan 1 mukaisesti arvioimalla muutoksen tasoa ja muutoksen tarkoitukselli-
suutta. Periaatteessa keinotekoiseksi vesiekosysteemiksi voidaan luokitella järvi tai joki,
jonka ylittää silta, sillä sillan tukirakenteet ovat jossain määrin muuttaneet vesiekosysteemiä
alkuperäisestä. Sekä rakennetut että muokatut vesialtaat voivat kuitenkin olla tärkeitä biodi-
versiteetin kannalta ja joskus niissä oleva keinotekoinen ekosysteemi ylläpitää sopivia olo-
suhteita harvinaisille lajeille, niin eläimille kuin kasveille, ja jotkin lajit ovat täysin riippu-
vaisia keinotekoisista vesiekosysteemeistä elinympäristönään. (Clifford & Heffernan 2018,
1–3, 7)



Kuva 1. Työkalu vesiekosysteemien keinotekoisuuden arviointiin. Lähde: Clifford & Heffernan 2018, s. 3

2.1. Eliöstö

Vesiekosysteemit, muiden ekosysteemien tapaan, toimivat elinympäristönä lukuisille eri eliöille, joilla jokaisella on oma, tärkeä roolinsa ekosysteemin toiminnassa. Vesiekosysteemin eliöstö koostuu muiden ekosysteemien tapaan tuottajista, kuluttajista ja hajottajista, joista jokaisella on tärkeä tehtävä ekosysteemin toiminnan ja ravinteiden kierron kannalta. Vesiekosysteemin tuottajia ovat viherainetta sisältävät korkeammat kasvit sekä erilaiset levät, jotka pystyvät auringonvalon avulla yhteyttämään ja tuottamaan ekosysteemiin energiaa. Syvemmälle pohjaa kohti mentäessä auringonvalon määrä vähenee ja lopulta loppuu kokonaan. Auringonvalon loppuessa loppuu myös tuotanto, joten korkeampien vesikasvien osalta kasvua on rajoittunut siihen osaan vesistöä, jossa auringonvaloa on riittävästi yhteyttämiseen. Ulappa-alueilla esiintyy paljon mikroskooppisen pieniä planktonleviä, eli kasviplanktonia, jonka rooli vesiekosysteemin tuotannossa on merkittävä. Planktonleviä esiintyy monissa vesistöissä niin paljon, että ne ovat koko ekosysteemin suurin tuottajaryhmä. (Penttinen & Niinimäki 2010, 12–13) Planktonlevillä on suuri merkitys hiilidioksidin sitomisessa ja näin ollen myös ilmastonmuutoksen hillinnässä. Yhteyttämällä ne muuttavat hiilidioksidin sellaiseen muotoon, jota muut ekosysteemin eliöt voivat käyttää. (Heinze et al. 2015, 328) Planktonlevien lisäksi vesiekosysteemin tuottajina toimivat myös erilaiset päällyskasvustolevät, jotka kiinnittyvät korkeampien kasvien sekä kivien pinoille. Päällyskasvustolevät saavat uutta elinpinta-alaa myös ihmisen tekemistä rakenteista kuten laitureista ja siltojen tukirakenteista. (Penttinen & Niinimäki 2010, 13)

Vesiekosysteemin kuluttajat voidaan jakaa erilaisiin toiminnallisiin ryhmiin, mutta kaikkia kuluttajia yhdistää se, ettei niillä ole kykyä tuottaa tarvitsemaansa ravintoa itse, vaan ne ovat riippuvaisia ekosysteemin tuottajista. Kuluttajista kasvinsyöjät hyödyntävät ravinnokseen tuottajia, eli korkeampia kasveja sekä leviä. Toisen asteen kuluttajat hyödyntävät ravinnokseen kasvinsyöjiä ja kolmannen asteen ja huippukuluttajien pääasiallista ravintoa ovat muut eläinravintoa hyödyntävät kuluttajat. (Penttinen & Niinimäki 2010, 13) Kasvinsyöjät, eli ensimmäisen asteen kuluttajat, ovat planktonlevien tapaan mikroskooppisen pieniä ja suurinta osaa niistä ei paljain silmin näe. Toisen asteen kuluttajat voi jo nähdä paljain silmin, ne ovat enimmäkseen pieniä kaloja, kalanpoikasia ja hyönteisten toukkia. Kolmannen asteen kuluttajiksi luokitellaan petokalat, jotka voivat hyödyntää ravinnokseen suurempia kaloja.

(Haakana 2018, 25) Ekosysteemin huippukuluttajat ovat ravintoketjun huipulla eivätkä ole enää ekosysteemin muiden kuluttajien ravintoa (Penttinen & Niinimäki 2010, 13).

Vesiekosysteemin hajottajina toimivat erilaiset sienet, bakteerit sekä pohjaeläimet. Hajottajat hyödyntävät ravintonaan pohjalle laskeutuneen kuolleen planktonin, puiden lehdet sekä muun kuolleen kasvi- ja eläinmassan ja palauttavat ekosysteemin ravinteet takaisin kiertoon. (Penttinen & Niinimäki 2010, 13, Haakana, 2018, 45–46) Pohjaeläimet ovat sopeutuneet haastaviin elinolosuhteisiin sekä vaihtelevaan ravintoon. Jotkin pohjaeläimet voivat toimia myös indikaattoreina vesistön tilasta, kuten ravinnekuormituksesta ja rehevöitymisestä. (Niinimäki & Penttinen 2014, 36)

2.2. Ihmisen toiminta

Ihmisen toiminta vaikuttaa vesiekosysteemeihin monella eri tavalla. Maailman meret ovat sitoneet itseensä noin 90 % ihmisen tuottamasta hiilidioksidista. (Häder et al. 2020, 2) Hiilidioksidi kuitenkin happamoittaa maailman meriä ja aiempaa happamampi merivesi liuottaa kalkkikuoristen äyriäisten suojakuoria. Merten happamoitumisen vuoksi ravintoketjun pohjalla olevien kalkkikuoristen äyriäisten määrä on vähentynyt viime vuosikymmeninä, mikä vaikuttaa meriekosysteemin ravintoketjun kautta koko ekosysteemiin. Happamoituminen ei ole kuitenkaan ainoa uhka meriekosysteemeille, vaan merenkulku, saasteet ja pohjatroulaus uhkaavat syvänmeren pohjan biodiversiteettiä. Syvänmeren pohjasta löytyy enemmän lajeja kuin muusta meriympäristöstä yhteensä. Suurin yksittäinen uhka meriekosysteemien biodiversiteetille on kuitenkin pohjatroulaus, joka tuhoaa merenpohjan elinympäristöjä. (Prakash 2021, 315)

Ihmisen toiminta vaikuttaa ilmastonmuutoksen myötä myös maapallon hydrologiseen kiertoon. Hydrologisella kierrolla tarkoitetaan luonnossa tapahtuvaa veden kiertokulkua, eli veden varastoitumista haihdunnan kautta vesihöyrynä ilmakehään, sadannan ja valunnan kautta vesistöihin sekä maaperään. Veden kierto vaikuttaa vahvasti vesiekosysteemeihin määrittäen esimerkiksi miten paljon ekosysteemissä on vettä, kuinka nopeasti vesi kiertää

ekosysteemin läpi ja miten kiertokulku ajoittuu. Nämä kaikki tekijät vaikuttavat siihen, millaista elinympäristöä ekosysteemi pystyy ylläpitämään, millaiset eliöt ekosysteemissä selviävät, ja millaisena vesistön laatu pysyy. Veden kierron muutokset voivat vaikuttaa merkittävästi vesistöjen ekologiin olosuhteisiin ja suuret elinympäristön muutokset saattavat hävittää lajeja ekosysteemeistä. (Poff et al. 2002, 6)

Vesiekosysteemejä, erityisesti meriekosysteemejä, uhkaa myös kasvava muoviroskan määrä. Maailman meret täyttyvät ekosysteemien eläimille haitallisesta muoviroskasta ennäkemättömään tahtiin. Muoviroskasta voi vapautua myrkyllisiä kemikaaleja tai eläimet voivat juuttua kiinni roskeen ja jopa kuristua. Eläimet voivat erehtyä luulemaan muovia ruuaksi ja muovi voi jäädä niiden elimistöön jumiin. Merten roskalautojen muovit hajoavat mikromuoveiksi ja päätyvät kaloihin ja muihin ekosysteemin eliöihin. (Egger et al. 2020, 1–2) Muita vesiekosysteemiin vaikuttavia ihmisperäisiä tekijöitä ovat mm. kasvava ravinnekuorma maa- ja metsätalouden, haja-asutuksen, teollisuuslaitosten ja jätevedenpuhdistamoiden vuoksi. Suomessakin erityisesti kasvaneet fosforimäärät aiheuttavat vesistöjen rehevöitymistä, mikä johtaa vedenlaadun heikkenemiseen sekä esimerkiksi kalaston muuttumiseen. (Haakana 2018, 60)

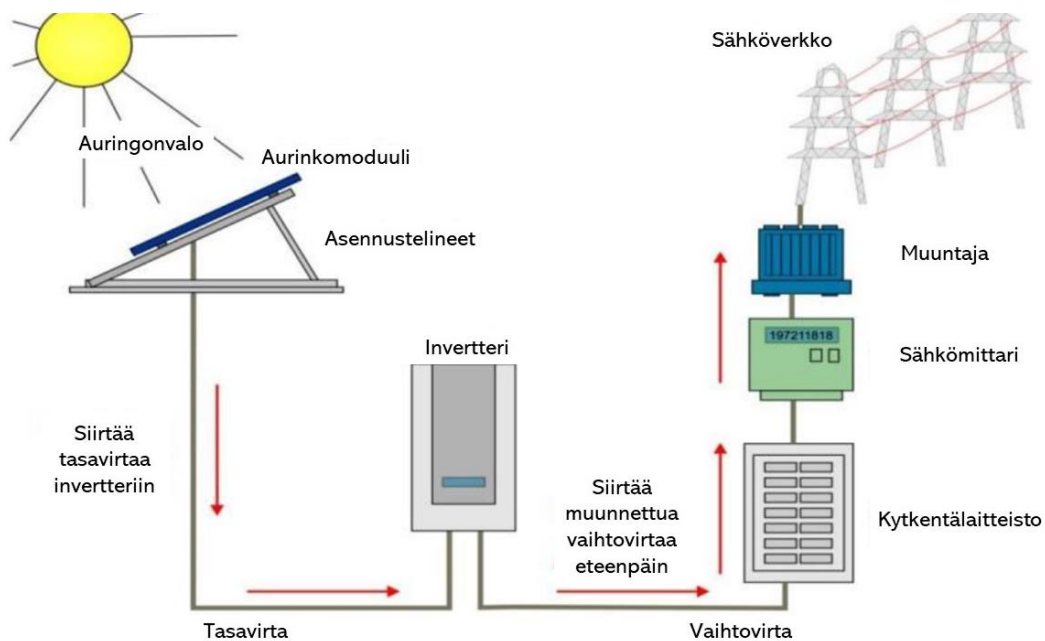
3. Aurinkovoima

Aurinkovoimalla tarkoitetaan auringosta saatua energiaa, joka on muunnettu sähköenergiaksi (Motiva 2022a). Aurinkovoima on avainasemassa, kun puhutaan uusiutuvan energian osuuden kasvattamisesta maailman energiantuotannossa, sillä sen käyttöönotto on taloudellisesti kannattavaa, erilaiset aurinkosähköjärjestelmät ovat jo laajasti käytössä ympäri maailmaa (Mancini & Nastasi 2020, 2) ja aurinkovoimalainvestointien takaisinmaksuaika on melko lyhyt. Muiden uusiutuvien energianlähteiden tavoin, myös aurinkovoiman päästöt ovat suhteellisen pienet, sillä itse energian tuotanto ei vaadi fossiilisten polttoaineiden käyttöä tai aiheuta päästöjä. Aurinkopaneelien tuotantoprosessissa tarvitaan kuitenkin vielä jonkin verran fossiilienergiaa. (Rabaia et al. 2020, 3) Valmistusvaiheen ympäristövaikutuksia lisää myös se, että aurinkopaneeleja varten täytyy tuottaa ja louhia erilaisia raakamateriaaleja, kuten silikonia, kadmiumia, telluuria, kuparia, seleeniä ja galliumia. Materiaalit täytyy puhdistaa sekä erottaa muista materiaaleista ja niiden käsittelyyn käytetään erilaisia niin ympäristölle kuin ihmisille haitallisia ja vaarallisia kemikaaleja, joiden kierrätysprosessit ovat monimutkaisia sekä vaativat paljon energiaa. Aurinkopaneelien negatiivisia ympäristövaikutuksia voidaan pienentää kierrättämällä sekä valmistuksessa tarvittavat kemikaalit että käytöstä poistuvat paneelit huolellisesti. (Tawalbeh et al. 2020, 3–5)

3.1. Aurinkovoimaloiden toimintaperiaate

Aurinkovoimaloiden toiminta perustuu aurinkopaneelisiin, jotka muuttavat auringon säteilyä sähköenergiaksi. Aurinkopaneelit koostuvat erillisistä puolijohdemateriaalista valmistetuista aurinkokennoista. Yleisimmin kennot valmistetaan kiteisestä, monikiteisestä tai amorfisesta piistä. Auringon säteily kennojen pinnalle tuottaa jännitteen ja sarjaan kytkemällä useita kennoja voidaan aurinkopaneelilla saavuttaa haluttu jännite. (Energiamailma 2023) Piikennojen lisäksi aurinkosähköä voidaan tuottaa myös ohutkalvokennoilla, jotka on valmistettu edullisesta pohjamateriaalista, kuten lasista tai muovista, jonka päällä on ohuita kerroksia valoherkkää materiaalia. Piikennoisten aurinkopaneelien hyötysuhde on tavallisesti 15–17 % väliltä ja ohutkalvokennojen 9–11 % väliltä. (Motiva 2022b)

Aurinkopaneelin kennot tuottavat energiaa valosähköilmiön avulla (engl. photovoltaic). Aurinkopaneelien tuottama tasavirtainen sähköenergia ohjataan invertteriin, eli vaihtosuuntaajaan, joka muuntaa sähköenergian tasavirrasta vaihtovirraksi. Vaihtosuuntaajan muutettua sähköenergian tasavirrasta vaihtovirraksi, voidaan aurinkosähköjärjestelmän tuottama energia syöttää sähköverkkoon. (Hindocha & Shah 2020, 885)

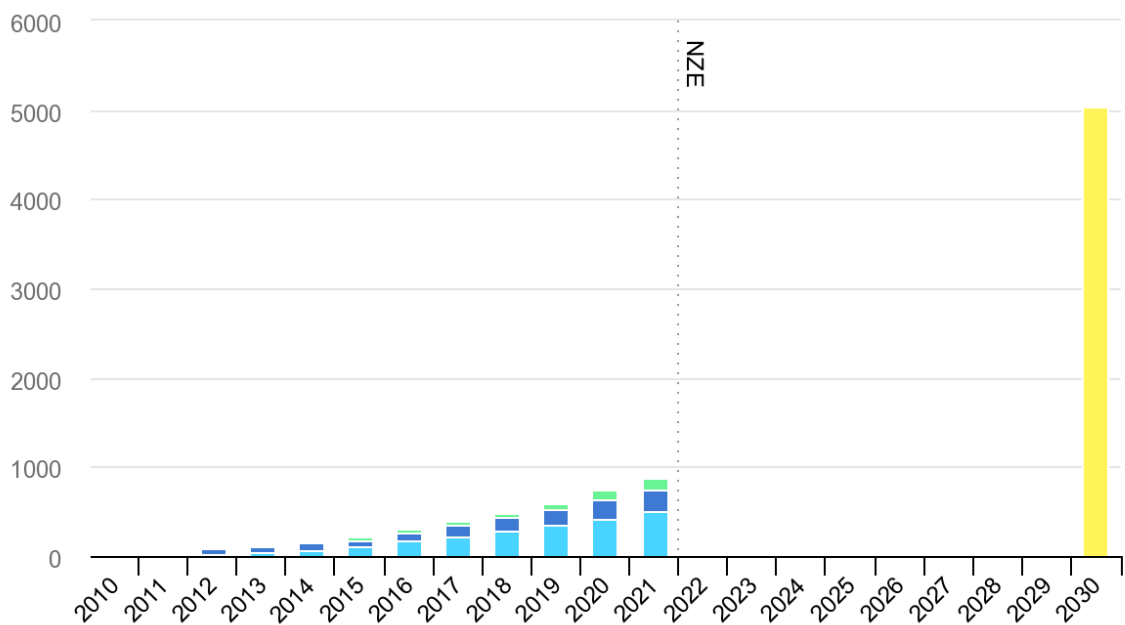


Kuva 2. Aurinkosähköjärjestelmän toimintaperiaate. Muokattu lähteestä: Hindocha & Shah 2020, s. 885

3.2. Tulevaisuuden näkymät

Aurinkovoima on heti tuulivoiman jälkeen toiseksi nopeimmin kasvava ja kolmanneksi eniten energiaa tuottava uusiutuvan energian muoto. Aurinkovoiman osuus koko maailman energiantuotannosta oli 3,6 % vuonna 2021, mikä vastaa noin 1000 TWh tuotettua energiaa. Vuonna 2021, aurinkosähkön osuus maailman energiantuotannosta kasvoi 22 %, eli noin 179 TWh. Suurimmaksi osaksi kasvusta on vastuussa Kiina ja Intia. Aurinkovoimalla tulisi tuottaa vuosittain jopa 7400 TWh energiaa vuonna 2030, jotta energijärjestelmän hiilidioksidipäästöt saadaan tavoiteltuun nettonollaan vuoteen 2050 mennessä. 7400 TWh:n vuotuisen energiantuotanto tarkoittaa aurinkoenergialle 25 %:n vuosittaista kasvua vuoteen 2030

saakka. Kuvasta 3 voidaan nähdä aurinkoenergian tuotantokapasiteetin kasvu vuodesta 2010 alkaen ja vuoden 2030 tavoite (GW). Kiina ja Intia ovat julkaisseet kunnianhimoisia tavoitteita uusiutuvan energian lisäämisestä, myös EU kiristi tavoitteitaan uusiutuvan energian osalta heinäkuussa 2021. Aurinkoenergia on kriittinen osa näiden tavoitteiden saavuttamisessa. (IEA 2022c)



Kuva 3. Aurinkoenergian tuotantokapasiteetin kasvu ja tavoite 2010–2030. Lähde: IEA 2022c

4. Aurinkovoimalat vesiekosysteemissä

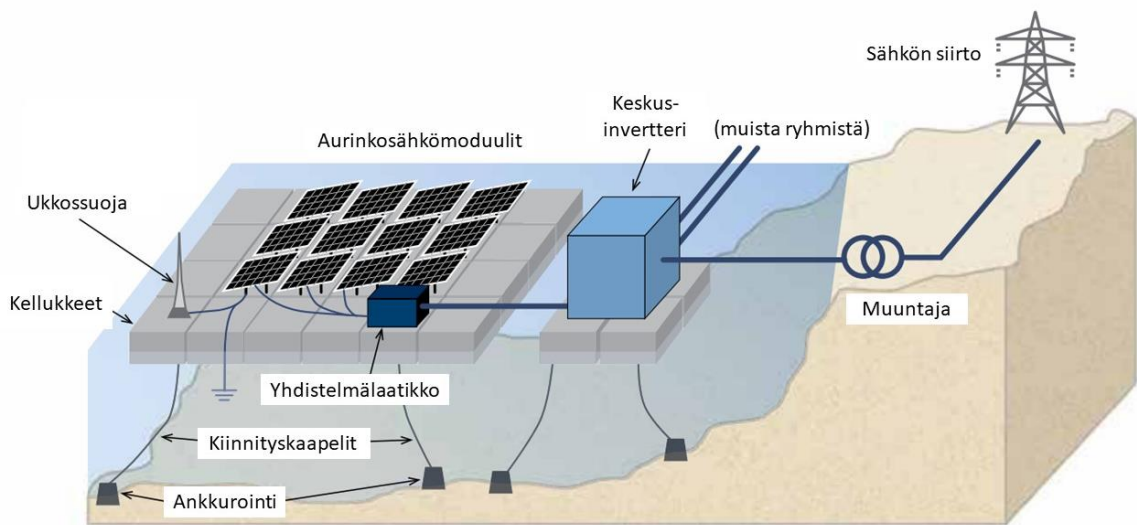
Kilpailu maapinta-alasta kasvaa, sillä energiantuotannon lisäksi maata tarvitaan myös ruoantuotantoon ja vapaa maapinta-ala on tärkeää myös biodiversiteetin suojelun ja ylläpitämisen kannalta. Yhtenä ratkaisuna maapinta-alan riittävyteen ja kilpailuun on esitetty kelluvia aurinkovoimaloita eli aurinkopaneelien asentamista vesialtaiden, kuten esimerkiksi vesivoimaloiden yhteydessä olevien patoaltaiden, pinnalle (Almeida et al. 2022, 246)

Ensimmäinen kelluva aurinkovoimala rakennettiin Japanissa vuonna 2007 tutkimustarkoitukseen ja ensimmäinen kaupallinen kelluva aurinkovoimala otettiin käyttöön Yhdysvalloissa Kaliforniassa vuonna 2008. Kelluva aurinkovoimala haluttiin rakentaa Kaliforniaan, jotta maapinta-alaa säästyisi energiantuotannon sijaan viinirypäleiden kasvattamiseen. Ennen vuotta 2013 käyttöön otetut kelluvat aurinkovoimalat olivat pienen mittaluokan voimaloita ja suuria ja keskisuuria voimaloita alettiin ottaa käyttöön vasta vuonna 2013. (World Bank Group et al. 2019, 2–3) Sen lisäksi, että kelluvat aurinkovoimalat vähentäisivät energiantuotantoon tarvittavaa maapinta-alaa, niillä voidaan tuottaa perinteisiä aurinkovoimaloita enemmän energiaa, sillä aurinkopaneeleilla on negatiivinen lämpökerroin eli niiden hyötysuhde kasvaa paneelin lämpötilan laskiessa. Vedellä on aurinkopaneelisiin viilentävä vaikutus, joten veden pinnalle asennetut aurinkovoimalat voivat veden viilentävän vaikutuksen vuoksi olla hyötysuhteeltaan parempia kuin perinteiset maahan asennetut voimalat. (Solomin et al. 2021, 3)

4.1. Asennus ja sijoituskohteet

Perinteisten maahan ja katolle asennettävien aurinkovoimaloiden tapaan, kelluvat aurinkovoimalat noudattavat samaa toimintaperiaatetta. Kelluvissa aurinkovoimaloissa aurinkopaneelit asennetaan tyypillisesti ponttoneihin tai muunlaisiin kellukkeisiin, joiden noste riittää kannattelemaan paneeleja veden pinnalla. Kellukkeet kiinnitetään vesialtaan pohjaan siten, että paneelit pysyvät paikallaan eivätkä pääse liikkumaan vapaasti veden pinnalla. (Patil Desai Sujay et al. 2017, 789–790) Perinteisten aurinkovoimaloiden tapaan myös kelluvan

aurinkovoimalan kennot voidaan asentaa kellukkeen päälle suoraan tai kallistettuna ja kennot voivat olla myös aurinkoa seuraavia. (Solomin et al. 2021, 4) Nollakulmaan asennetut paneelit pystyvät hyödyntämään veden viilentävää vaikutusta kallistettuun kulmaan asennettuja paneeleja paremmin, mutta kallistettuun kulmaan asennetut paneelit vastaanottavat enemmän auringon säteilyä. (El Hammoumi et al. 2022, 11994) Kuvassa 4 on esitettyä kelluva aurinkovoimala sekä sen toimintaympäristö.



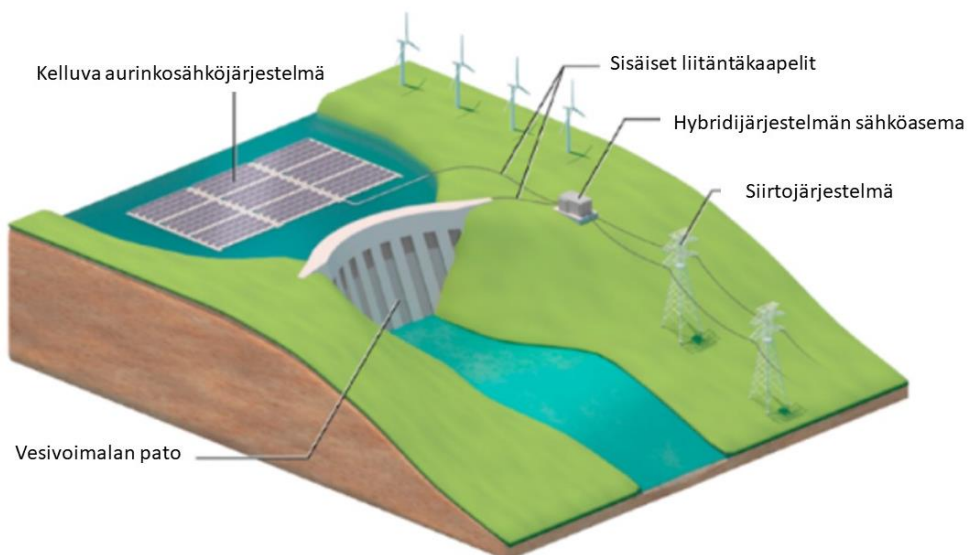
Kuva 4. Kelluva aurinkovoimala ja sen toimintaympäristö. Muokattu lähteestä: World Bank Group 2019, s. 2

Kelluvia aurinkovoimaloita voidaan sijoittaa erilaisiin luonnollisiin vesistöihin, kuten meriin, järviin, jokiin ja lampiin (Kumar et al. 2018, 1092), mutta pääsääntöisesti kelluvia aurinkovoimaloita on asennettu keinotekoisiiin vesialtansiin, kuten puhdistettuihin jätevesialtansiin, tekojärviin tai maataloudessa käytettyihin kastelu- ja säilytysaltansiin. (Lee et al. 2020, 1416) Veden pinnalle asennettujen paneelien täytyy kestää erilaisia sääilmiöitä sekä ympäristön aiheuttamaa korroosiota. Aurinkopaneeleihin voi tulla tuulen ja aaltojen voimasta pieniä murtumia, jotka vaikuttavat paneelien energiantuotantoon sekä kestävyuteen. (El Hammoumi et al. 2022, 12006)

4.1.1. Hybridijärjestelmät

Yhdistämällä kelluvia aurinkopaneeleja esimerkiksi vesivoimaloiden patoaltaisiin, offshore-tuulivoimaloihin, aaltovoimaloihin tai paineilmajärjestelmiin voidaan luoda uusiutuvan energian hybridijärjestelmiä. Kelluvan aurinkovoiman hybridijärjestelmiä (engl. hybrid floating solar photovoltaics, HFPV) puoltaa tasaisempi energiantuotanto ja parempi suorituskyky ja niiden etuna on olemassa oleva yhteys sähköverkkoon, kahden tuotantomuodon yhdistämisen lisäämä energiantuotannon luotettavuus sekä tuottavuus ja energiamuotojen toisiaan kompensoiva vaikutus rinnakkaiskäytössä. (Solomin et al. 2021, 7)

Hybridijärjestelmät voivat parantaa kelluvan aurinkovoiman kilpailukykyä, sillä kelluvat paneelit olisivat yhdistettävissä lukuisiin eri energian tuotantomuotoihin tehostamaan ja tasa-painottamaan niiden energiantuotantoa. Kelluvan aurinkovoiman yhdistäminen erityisesti vesivoimaloihin tarjoaa saarivaltioille mahdollisuuden vastata omaan energiantarpeeseensa uusiutuvalla energialla. Erilaiset hybridijärjestelmät eivät kuitenkaan ole vielä laajasti käytössä ja niiden mahdollisuuksia tulee selvittää ja tutkia enemmän. (Solomin et al. 2021, 7, 21)



Kuva 5. Esimerkkikuva kelluvan aurinkovoiman ja vesivoiman hybridijärjestelmästä. Muokattu lähteestä: Lee et al.2020, s. 1417

4.2. Kehitysnäkymät

Kelluvaa aurinkovoimaa on maailmalla käytössä toistaiseksi vähän. Vuonna 2020 perinteisten aurinkovoimaloiden asennettu tuotantokapasiteetti oli yli 700 GW, kun taas kelluvien aurinkovoimaloiden asennettu tuotantokapasiteetti oli vastaavasti vain 3 GW. (Almeida et al. 2022, 247) Kelluvia aurinkovoimaloita on rakennettu tai on suunnitteilla Etelämannerta lukuun ottamatta kaikkiin maanosiin ja eniten kelluvaa aurinkovoimaa rakentaa ja hyödyntää tällä hetkellä Kiina. (World Bank Group et al. 2019, 4) Kelluvan aurinkovoiman suosion on kuitenkin ennustettu kasvavan tulevaisuudessa sen tuomien hyötyjen mukana. Veden viilentävän vaikutuksen vuoksi energiatehokkaammat ja kallista maapinta-alaa säästävät paneelit voivat olla hyödyksi sellaisilla alueilla, joilla vapaata maapinta-alaa ei juuri ole. (Cuce et al. 2021, 3)

Kelluvien aurinkovoimaloiden rakennuskustannukset ovat korkeammat kuin perinteisten aurinkovoimaloiden. Kelluvia voimaloita varten ei tarvitse raivata ja valmistella maa-alueita, mutta kustannukset ovat riippuvaisia vesialtaan sijainnista ja materiaalien kuljetuksesta. Kustannuksia nostattaa myös vesialtaan muut ominaisuudet, kuten syvyys, vedenpinnan korkeuden vaihtelu, veden pohjan tyyppi sekä kellukkeissa käytetty materiaali. Suurimmat kustannukset syntyvät kuitenkin paneelien ankkuroinnista, mutta hyvällä ja vakaalla ankkuroinnilla voimalan käyttöikä voi olla jopa 25 vuotta. (Pouran et al. 2022, 2) Markkinat ovat kelluvan aurinkovoiman osalta vasta kehittymässä ja kustannusten ennustetaan kuitenkin laskevan tulevaisuudessa. Kustannusten laskua on kuitenkin vaikea arvioida, erityisesti kellukkeiden materiaalina käytetyn HDPE-muovin takia, sillä sen hinta on riippuvainen raakaöljyn hinnasta. Kustannusten ei arvioida kuitenkaan jäädä kovin paljon korkeammaksi kuin maahan asennettavien voimaloiden kustannukset. (World Bank Group et al. 2019, 91–92)

5. Vaikutukset vesiekosysteemiin

Kelluvan aurinkovoiman vaikutuksia vesiekosysteemeihin on tutkittu melko vähän. Tutkimustuloksia löytyi enemmän teknisistä vaikutuksista, kuten paneelien hyötysuhteen paranemisesta tai maapinta-alan vapautumisesta energiantuotannon sijaan muuhun käyttöön. Taulukossa 1 on kuitenkin esitelty vesiekosysteemin kannalta olennaiset vaikutukset, joita kelluvalla aurinkovoimalla lähdemateriaalin perusteella on. Vaikutuksia on käsitelty enemmän kappaleissa 5.1 Hyödyt ja 5.2. Haitat. Vesiekosysteemit voivat hyötyä kelluvista aurinkopaneeleista, mutta niillä on myös haittoja. Vaikutukset ovat kuitenkin riippuvaisia asennuskohteen sijainnista, etäisyydestä rantaan sekä paikallisista vesiolosuhteista (Hooper et al. 2021, 12) Tällä hetkellä kelluvaa aurinkovoimaa asennetaan lähtökohtaisesti keinotekoisiiin vesistöihin, mutta keinotekoisissakin vesistöissä vallitsee oma ekosysteeminsä. Riippuen asennuskohteesta, keinotekoisetkin vesistöt voivat olla eliöstöltään varsin rikkaita. Monella vaikutuksella on sekä hyötyjä että haittoja vesiekosysteemin kannalta.

Taulukko 1. Kelluvan aurinkovoiman hyödyt ja haitat ekosysteemin kannalta

Hyödyt	Haitat
Veden haihdunnan väheneminen	Asennuksen aikainen häiriö
Leväkukintojen väheneminen	Varjostuksen vaikutus vesikasvien kasvuun
Kellukkeista ja kaapeleista uusia kasvualustoja	Varjostuksen vaikutus vesikasvien yhteyttämiseen
Veden laadun paraneminen	Ankkuroinnin vaikutukset ja muutokset pohjaan
	Veden laadun heikkeneminen
	Vieraslajien leviäminen
	Sähköonnettomuudet

5.1. Hyödyt

Riippuen voimalan sijainnista ja siitä, kuinka suuri pinta-ala aurinkopaneelilla peitetään, kelluvan aurinkovoimalan paneelien varjostuksella voidaan ehkäistä veden haihtumista vesialtaasta ja parantaa vesihuoltoa erityisesti kuivilla alueilla. (Kumar et al. 2018, 305–306) Veden haihdunnan ennustetaan kasvavan erityisesti eteläisillä alueilla, joilla haihdunta on jo nykyisellään suurta, mutta myös pohjoisemmilla alueilla (Woolway et al. 2022, 1053–1054).

Veden haihdunnan vähentämisen hyödyistä puhutaan paljon vesihuollon näkökulmasta, eli vettä riittäisi paremmin maatalouden käyttöön ja ihmisten juomavedeksi, mutta vesiekosysteemin kannalta veden haihdunnan väheneminen erityisesti kuumien ja kuivien ajanjaksojen aikana on tärkeää, sillä se ehkäisee vesialueen kuivumista täysin ja auttaa ekosysteemin eliöitä selviämään hengissä. (Durkovic & Đurišić 2017, 21) Haihdunnan vähentämisen lisäksi kelluvien aurinkopaneelien varjostus hidastaa vesikasvien yhteyttämistä, sillä auringonvaloa pääsee vähemmän veden pinnan alle. Auringonvalon väheneminen ja yhteyttämisen hidastuminen vähentää esimerkiksi haitallisia leväkukintoja. (Tercan et al. 2022, 1150) Haitalliset leväkukinnot saattavat tuottaa myrkyllisiä yhdisteitä, jotka voivat johtaa ekosysteemin eliöiden kuolemiin. Myrkyllisiä leväkukintoja esiintyy lämpimissä ja erityisesti ravinnerikkaissa vesistöissä. (Griffith & Gobler 2019, 2)

Aurinkopaneelien kellukkeet sekä koko rakennelman kiinnityskaapelit voivat tarjota ekosysteemin eliöille uusia kasvualustoja toimimalla keinotekoisina riuttoina. (Hooper et al. 2019, 12) Pienet organismit saavat suojaa kellukkeiden pohjasta ja kaapeleista ja houkuttelevat esimerkiksi kaloja ruoan tai suojan perässä aurinkovoimalan alueelle. Kellukerakenteen tarjoama kasvualusta lisää biomassan määrää sekä edistää biodiversiteettiä sijoituskohteessaan. (Loxton et al., 2017, 299) Korkean biodiversiteetin ekosysteemeillä on paremmat mahdollisuudet vastata suuriin muutoksiin ja häiriöihin ekosysteemissä. Yksittäiset lajit saattavat olla herkkiä ekosysteemissä tapahtuvalle muutokselle, mutta mitä suurempi lajien kirjo on ekosysteemissä, sitä turvatumpi ekosysteemin toiminta on muutosten ja häiriöiden kohdassa. (Irfan & Alatawi 2019, 10)

5.2. Haitat

Kelluvien aurinkopaneelien aiheuttamalla varjostuksella on vesiekosysteemin kannalta myös haittavaikutuksia. Paneelien varjostus estää auringonvalon pääsyn veden pinnan alle ja hidastaa vesikasvien yhteyttämistä. Riittävän auringonvalon saanti korostuu etenkin merialueilla, sillä erityisesti meriruoho ja korallit tarvitsevat auringonvaloa kasvamiseen. (Hooper et al. 2021, 12) Vaikka yhteyttämisen hidastumisella voi olla positiivinen vaikutus sen vähentäessä haitallisia leväkukintoja, varjostuksen vaikutuksesta hidastunut yhteyttäminen

ja liian vähäinen hapen tuotanto vesistössä voi vaarantaa koko ekosysteemin ravintoketjun, sillä liiallinen varjostus voi tappaa alkutuottajia (Haas et al. 2019, 2). Myös veden pinnan korkeuden vaihtelu voi edesauttaa kelluvan aurinkovoiman häiritseviä vaikutuksia ekosysteemeille. Aaltojen liikuttaessa paneeleja esimerkiksi matalan vuoroveden aikaan kaapelit saattavat liikkua aiheuttaen hankausta merenpohjaan. (Hooper et al. 2021, 12) Yhdistyneissä kansakunnissa tehdyn tutkimuksen mukaan, satamissa veneiden ankkurointikaapelit aiheuttavat ympyrämäistä vedenpohjan arpeutumista vuoroveden ja tuulen mukana. Kaapeleiden hangatessa veden pohjaa, ne estävät esimerkiksi merialueilla meriruohon kasvun sillä alueella, mihin kaapelit osuvat ja vähentävät elinalueita vedenaläviltä. Paneelien ankkuroinnilla on samankaltaisia negatiivisia vaikutuksia, mutta vaikutukset ovat riippuvaisia käytetyn ankkurin koosta. Väliaikaisen ankkuroinnin häiriöstä aiheutuvat muutokset ovat havaittavissa jopa vuosia. (Collins et al. 2010, 118–121)

Jos paneelijärjestelmiä hinataan esimerkiksi satamasta kauemmas ulapalle, riskinä voi olla vieraslajien leviäminen laajemmalle vesiekosysteemiin. Kelluvan rakennelman tarjoama hyöty on uudet kasvualustat ekosysteemin eliöille, mutta samalla se tarjoaa kasvualustan myös vieraslajeille. Etenkin suurissa ja vilkkaissa satamissa vieraslajeja saattaa esiintyä paljonkin ja riski niiden leviämiseksi kauemmas vesistöön on suuri. (Loxton et al. 2017, 299) Vieraslajit valtaavat elinympäristöjä kotoperäisiltä lajeilta ja vähentävät eliöstön rikkautta vesiekosysteemeissä huomattavasti. Haitalliset vieraslajit yksipuolistavat ekosysteemejä ja niiden haittoja on toisinaan haastava arvioida, sillä haitat eivät kaikissa tapauksissa ole yksiselitteisiä eivätkä kaikki vieraslajit suinkaan ole pahasta. Vieraslajien haitallisuutta paikallisille ekosysteemeille on kuitenkin haastava arvioida etukäteen. (Jauni & Seppälä, 202)

Yksi harvemmin mainittu kelluvien aurinkovoimaloiden mukana tuleva riski on sähköonnettomuudet. Kovin tuulisissa olosuhteissa riskinä on paneelien kellukerakenteen rikkoutuminen tai hajoaminen. Mikäli jokin rakenteista tai kiinnikkeistä pettää kovissa sääolosuhteissa, muut rakenteet joutuvat kestävänsä aiempaa suurempaa kuormaa ja riskinä on sähkökaapeleiden katkeaminen. Tilanne voi johtaa järjestelmän oikosulkuun ja tulipaloon. Sähköonnettomuuksia voidaan kuitenkin ehkäistä hyvällä suunnittelulla ja huolehtimalla siitä, että

rakennelma on suunniteltu kestävään alueen ankarampiakin sääolosuhteita. (Kumar & Majid 2023, 328–329)

6. Yhteenveto

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää, millaisia vaikutuksia kelluvilla aurinkovoimaloilla on vesiekosysteemeihin. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena ja työ koostuu teoriaosuudesta, jossa perehdyttiin vesiekosysteemeihin, lyhyesti aurinkovoimaan ja lopuksi aurinkovoimaloihin vesiekosysteemissä, eli itse kelluvaan aurinkovoimaan. Työn lopuksi esitettiin työn tutkimustulokset ja avattiin mahdollisia ekosysteemivaikutuksia laajemmin. Voimaloiden vaikutukset oli rajattu vain ekosysteemivaikutuksiin, joten työssä on keskitytty tuomaan esille keskeisimmät vaikutukset vesiekosysteemin kannalta, mutta kelluvilla aurinkovoimaloilla on vaikutuksia myös muilla osa-alueilla. Voimaloiden maisemavaikutukset voivat esimerkiksi laskea tonttien arvoa ja riippuen vesistöstä, voimalat voivat vaikuttaa myös vesialueiden vapaa-ajan käyttöön tai kalastajien elinkeinoon, mikä voi johtaa uusien voimalaprojektien vastustamiseen.

Kelluva aurinkovoima on ollut suuressa mittakaavassa käytössä vasta noin 10 vuotta ja mahdollisia ympäristövaikutuksia on tutkittu melko vähän. Voimaloista löytyy kuitenkin tuoretta tutkimustietoa ja ympäristökysymyksiä on nostettu enemmän esiin. Kelluvilla aurinkovoimaloilla on vesiekosysteemin kannalta sekä hyötyjä että haittoja. Voimalat voivat parhaimmillaan vähentää haitallisia leväkukintoja sekä parantaa veden laatua, mutta ne voivat myös vähentää veden haihduntaa ja kasvattaa vesistön biomassaa toimimalla keinotekoisina riuttoina. Voimaloiden asennuksesta ja ankkuroinnista voi kuitenkin aiheutua häiriöitä ekosysteemiin ja paneelien varjostus voi hidastaa vesikasvien kasvua sekä yhteyttämistä, mikä voi johtaa veden laadun heikkenemiseen. Monia voimaloiden haittavaikutuksia voidaan kuitenkin ehkäistä ja minimoida hyvällä suunnittelulla, eli suunnittelemalla voimalat sijoituspaikkaan ja sen sääolosuhteisiin sopivaksi. Myös sijoituspaikalla on väliä, jotta alueen biologista monimuotoisuutta ei heikennetä ja veden laatu pysyy hyvänä. Ihmiset kuormittavat vesiekosysteemejä toiminnallaan paljon, joten voimalahankkeita suunnitellessa on tärkeää kartoittaa mahdolliset ympäristöhaitat, jotta laajoilta ja pysyviltä haittavaikutuksilta voidaan välttyä. Suunnitellessa on tärkeää kartoittaa myös, miten voimaloiden positiivisia ympäristövaikutuksia voidaan sijoituskohteessa vahvistaa.

Kelluvien aurinkovoimaloiden ympäristövaikutuksista erilaisissa vesiekosysteemeissä tarvitaan vielä lisää tietoa. Kelluva aurinkovoima voi toimia yhtenä ratkaisuna maankäytön ongelmiin sekä apuna tasapainottamaan energiantuotantoa osana hybridijärjestelmiä, mutta voimalan ympäristövaikutukset tulee pystyä arvioimaan jo voimalahankkeiden suunnitteluvaiheessa negatiivisten ympäristövaikutusten ehkäisemiseksi.

Lähteet

Almeida, R.M. Schmitt, R., Grodsky, S.M., Flecker, A.S., Gomes, C.P., Zhao, L., Liu, H., Barros, N., Kelman, R., McIntyre, P.B. 2022. Floating solar power could help fight climate crisis – let’s get it right. *Nature*. Vol. 6, nro 7913, s. 246–249. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://www.nature.com/articles/d41586-022-01525-1>

Clifford, C.C., Heffernan, J.B. 2018 *Artificial Aquatic Ecosystems*. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/w10081096>

Collins, K.J., Suonpää, A.M., Mallinson, J.J. 2010. The impacts of anchoring and mooring in seagrass, Studland Bay, Dorset, UK. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.3723/ut.29.117>

Cuce, E., Cuce, P.M., Saboor, S., Ghosh, A., Sheikhejad, Y. 2022. Floating PVs in Terms of Power Generation, Environmental Aspects, Market Potential and Challenges. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/su14052626>

Durkovic, V., Đurišić, Ž. 2017. Analysis of the Potential for Use of Floating PV Power Plant on the Skadar Lake for Electricity Supply of Aluminium Plant in Montenegro. *Energies*, 10, 1505. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.3390/en10101505>

Egger, M., Sulu-Gambari, F., Lebreton, L. 2020. First evidence of plastic fallout from the North Pacific Garbage Patch. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64465-8>

El Hammoumi, A., Chtita, S., Motahhir, S., El Ghzizal, A. 2022. Solar PV energy: From material to use, and the most commonly used techniques to maximize the power output of PV systems: A focus on solar trackers and floating solar panels. *Energy Reports*, 8, s. 11992–12010. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.054>

Energiamailma. 2023. Aurinkoenergia. Energiateollisuus ry. [verkkosivusto] [viitattu 12.4.2023] Saatavissa: <https://energiamailma.fi/energiasta/energiantuotanto/aurinkovoima/>

- Gallardo, B., Clavero, M., Sánchez, M.I., Vilà, M. 2016. Global ecological impacts of invasive species in aquatic ecosystems. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/gcb.13004>
- Griffith, A.W., Gobler, C.J. 2019. Harmful Algae. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.03.008>
- Haakana, H. 2018. Vesistöopas. Suomen luonnonsuojeluliitto. ISBN: 978-952-9693-78-8
- Haas, J., Khalighi, J., de la Fuente, A., Gerbersdorf, S.U., Nowak, W., Chen, P. 2019. Floating photovoltaic plants: Ecological impacts versus hydropower operation flexibility [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112414>
- Han, N., Zhang, J., Hoang, M., Gray, S., Xie, Zongli. 2021. A review of process and wastewater reuse in the recycled paper industry. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101860>
- Heinze, C., Meyer, S., Goris, N., Anderson, L., Steinfeldt, R., Chang, N., Quéré, L., Bakker, D.C.E. 2015. The ocean carbon sink – impacts, vulnerabilities and challenges Earth System Dynamics, 6, s. 327–358. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.5194/esd-6-327-2015>
- Hindocha, K. Shah, S. 2020. Design of 50 MW Grid Connected Solar Power Plant. International Journal of Engineering Research & Technology. Vol. 9 Issue 04. s 885–897. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://www.doi.org/10.17577/IJERTV9IS040762>
- Hooper, T., Armstrong, A., Vlaswinkel, B. 2021. Environmental impacts and benefits of marine floating solar. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.010>
- Häder, D.P., Banaszak, A.T., Villafañe, V.E., Narvarte, M.A., González, R.A., Helbling, E.W. 2020. Anthropogenic pollution of aquatic ecosystems: Emerging problems with global implications. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136586>
- IEA. 2022a. Global Energy Crisis – How the energy crisis started, how global energy markets are impacting our daily life, and what governments are doing about it. [viitattu: 8.2.2023] [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://www.iea.org/topics/global-energy-crisis>

- IEA. 2022b. Renewable Electricity. [viitattu: 17.3.2023] [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/renewable-electricity>
- IEA. 2022c. Solar PV. Technology deep dive. [viitattu: 6.4.2023] [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/solar-pv>
- Irfan, S., Alatawi, A.M.M. 2019. Aquatic Ecosystem and Biodiversity: A Review. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.4236/oje.2019.91001>
- Jauni, M., Seppälä, M. 2020. Haitalliset vieraslajit: Uhka luonnolle. Elämän verkko. *Gaudeamus*. s. 196–212. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/327671>
- Kumar, J.C.R., Majid, M.A. 2023. Floating solar photovoltaic plants in India – A rapid transition to a green energy market and sustainable future. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.1177/0958305X211057185>
- Kumar, N.M., Kanchikere, J., P. Mallikarjun. 2018. Floatovoltaics: Towards improved energy efficiency, land and water management. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. Vol. 9, Issue 7, s. 1089–1096. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <http://www.iaeme.com/ijciyet/issues.asp?JType=IJCIET&VType=9&IType=7>
- Lee, N., Grunwald, U., Rosenlieb, E., Mirletz, H., Aznar, A., Spencer, R., Cox, S. 2020. Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential. *Renewable Energy*. Vol. 162. s. 1415–1427. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.080>
- Loxton, J., Macleod, A.K., Nall, C.R., McCollin, T., Machado, I., Simas, T., Vance, T., Kenny, C., Want, A., Miller, R.G. 2017. Setting an agenda for biofouling research for the marine renewable energy industry. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijome.2017.08.006>
- Mancini, F., Nastasi, B. 2020. Solar Energy Data Analytics: PV Deployment and Land Use. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/2/417>
- Motiva. 2022a. Aurinkosäteilyn määrä Suomessa. [verkkosivusto] [viitattu 19.4.2023] Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa

Motiva. 2022b. Aurinkosähköteknologiat. [verkkosivusto] [viitattu 19.4.2023] Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat

Niinimäki, J. Penttinen, K. 2014. Vesienhoidon ekologiaa. Ravintoverkkokunnostus. Books on Demand GmbH. ISBN: 9789528018926

Patil Desai Sujay, S., Wagh, M. M., & Shinde, N. N. 2017. A review on floating solar photovoltaic power plants. International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol 8, Issue 6, s. 789-794. [verkkójulkaisu] Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/347818468_A_Review_on_Floating_Solar_Photovoltaic_Power_Plants

Penttinen, K., Niinimäki, J. 2010. Vesiensuojelun perusteet ja vesistön kunnostus. Opetushallitus. ISBN: 9789521345739

Poff, N.L., Brinson, M.M., Day, J.W. 2002. Aquatic Ecosystems & Global Climate Change – Potential Impacts on Inland Freshwater and Coastal Wetland Ecosystems in the United States. [verkkójulkaisu] Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/248528187_Aquatic_Ecosystems_Global_Climate_Change_-_Potential_Impacts_on_Inland_Freshwater_and_Coastal_Wetland_Ecosystems_in_the_United_States

Pouran, H.M., Campos Lopes, M.P., Nogueira, T., Castelo Branco, D.A., Sheng, Y. 2022. Environmental and technical impacts of floating photovoltaic plants as an emerging green technology. [verkkójulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105253>

Prakash, S. 2021. Impact of climate change on aquatic ecosystem and its biodiversity: an overview. [verkkójulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.46505/IJBI.2021.3210>

Rabaia, M.K.H., Abdelkareem, M.A., Sayed, E.T., Elsaid, K., Chae, K., Wilberforce, T., Olabi, A.G. 2020. Environmental impacts of solar energy systems: A review. [verkkójulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141989>

Solomin, E., Sirotkin, E., Cuce, E., Selvanathan, S. P. & Kumarasamy, S. 2021. Hybrid Floating Solar Plant Designs: A review. Energies, Vol 15, nro 10. [verkkójulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/en14102751>

Tawalbeh, M., Al-Othman, A., Kafiah, F., Abdelsalam, E., Almomani, F., Alkasrawi, M. 2020. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent

progress and future outlook. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528>

Tercan, E., Dereli, M.A., Saracoglu, B.O. 2022. Location alternatives generation and elimination of floatovoltaics with virtual power plant designs. [verkkojulkaisu] Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.145>

Woolway, R.I., Sharma, S., Smol, J.P. 2022. Lakes in Hot Water: The Impacts of a Changing Climate on Aquatic Ecosystems. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://doi.org/10.1093/biosci/biac052>

World Bank Group, ESMAP, SERIS. 2019. Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report. Washington, DC: World Bank. [verkkojulkaisu] Saatavissa: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/579941540407455831/floating-solar-market-report-executive-summary>