

# Vesienhoidon toimenpiteiden vaikutukset säättövoimaan

Maria Kopsakangas-Savolainen, Iivo Vehviläinen,  
Antti Belinskij, Hannu Huuki, Jarno Turunen, Antti Iho,  
Saija Koljonen, Suvi-Tuuli Puharinen, Pauliina Louhi

VALTIONEUVOSTON SELVITYS- JA  
TUTKIMUSTOIMINNAN JULKAISUSARJA 2024:39

[tietokayttoon.fi](https://tietokayttoon.fi)

Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2024:39

# Vesienhoidon toimenpiteiden vaikutukset säättövoimaan

Maria Kopsakangas-Savolainen, Iivo Vehviläinen,  
Antti Belinskij, Hannu Huuki, Jarno Turunen, Antti Iho,  
Saija Koljonen, Suvi-Tuuli Puharinen, Pauliina Louhi

Valtioneuvoston kanslia Helsinki 2024

**Julkaisujen jakelu**

Distribution av publikationer

**Valtioneuvoston  
julkaisuarkisto Valto**

Publikations-  
arkivet Valto

[julkaisut.valtioneuvosto.fi](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi)

Valtioneuvoston kanslia

CC BY-ND 4.0

ISBN pdf: 978-952-383-144-5

ISSN pdf: 2342-6799

Taitto Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto

Helsinki 2024

## Vesienhoidon toimenpiteiden vaikutukset säättövoimaan

### Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2024:39

**Kustantaja** Valtioneuvoston kanslia

**Tekijä/t** Maria Kopsakangas-Savolainen, Iivo Vehviläinen, Antti Belinskij, Hannu Huuki, Jarno Turunen, Antti Iho, Saija Koljonen, Suvi-Tuuli Puharinen, Pauliina Louhi

**Kieli** suomi **Sivumäärä** 201

#### Tiivistelmä

EU vesipuitedirektiivin (VPD 2000/60/EY) mukaisesti vesimuodostumien tulee saavuttaa hyvä ekologinen tila. Osa vesivoimatuotannossa olevista vesistöistä on nimetty voimakkaasti muutetuiksi, niissä tavoitteena on hyvä saavutettavissa oleva ekologinen tila. Tilan saavuttaminen voi tarkoittaa toimenpiteitä, jotka rajoittavat vesivoiman tuotantoa, kuten minimivirtaamien ylläpitoa tai kalateiden rakentamista. Näiden toimenpiteiden toteuttamisessa tulee huomioida, etteivät ne aiheuta merkittävää haittaa energiantuotannolle eli niillä ei ole sellaista vaikutusta sähkön tuotantoon ja säättövoiman saatavuuteen, joka voisi vaarantaa sähköntuotannon luotettavuuden.

Hankkeessa selvitettiin miten vesienhoitoon liittyvät ympäristötoimenpiteet vaikuttavat vesivoiman tuotantokapasiteettiin ja säättövoiman tarjontaan myös sähkömarkkinoiden tasolla erilaisten tulevaisuuden suuntautuvien skenaarioiden valossa.

Raportin tuloksien mukaan arvioidut vesienhoitotoimenpiteet vaikuttavat jossain määrin vesivoiman tuotantoon ja vesivoiman säättökykyyn. Sähkömarkkinatasolla nämä vaikutukset jäävät kuitenkin varsin maltillisiksi. Ympäristörajoitteet voivat lisätä hieman säättövoiman kysyntää muista lähteistä, johtuen tarpeeseen kehittää uusia teknologioita, kuten energian varastointia ja kysyntäjoustoja. Tämä ilmiö linkittyy kuitenkin myös laajempaan energiamarkkinoita koskevaan transitiioon.

**Klausuuli** Julkaisu on läpikäynyt ulkopuolisen tieteellisen arvioinnin.

Tämä julkaisu on toteutettu osana valtioneuvoston selvitys- ja tutkimussuunnitelman toimeenpanoa. (tietokayttoon.fi) Julkaisun sisällöstä vastaavat tiedon tuottajat, eikä tekstisisältö välttämättä edusta valtioneuvoston näkemystä.

**Asiasanat** tutkimus, tutkimustoiminta, säättövoima, merkittävä haitta, vesienhoidon vaikutukset, vesivoima, vesioikeus

**ISBN PDF** 978-952-383-144-5

**ISSN PDF** 2342-6799

**Julkaisun osoite** <https://um.fi/URN:ISBN:978-952-383-144-5>

## Effekterna av vattenvårds miljöåtgärder till reglerkraft

Publikationsserie för statsrådets utrednings- och forskningsverksamhet 2024:39

<b>Utgivare</b>	Statsrådets kansli		
<b>Författare</b>	Maria Kopsakangas-Savolainen, Iivo Vehviläinen, Antti Belinskij, Hannu Huuki, Jarno Turunen, Antti Iho, Saija Koljonen, Suvi-Tuuli Puharinen, Pauliina Louhi		
<b>Språk</b>	finska	<b>Sidantal</b>	201
<b>Referat</b>	<p>I enlighet med EU ramdirektiv för vatten (VPD 2000/60/EG) bör vattenförekomster uppnå god ekologisk status. I kraftigt förändrade vattenförekomster, såsom vattendrag med vattenkraft, är målet att uppnå god möjlig ekologisk status. Att uppnå denna status kan innebära åtgärder som begränsar vattenkraftsproduktionen, såsom att upprätthålla minimiflöden eller bygga fiskvägar. Vid genomförandet av dessa åtgärder bör man säkerställa att de inte orsakar betydande skada på energiproduktionen, det vill säga att de inte påverkar elproduktionen eller tillgängligheten av reglerkraft på ett sätt som skulle kunna äventyra tillförlitligheten i elförsörjningen.</p> <p>Denna rapport sammanställer och ger information om hur miljöåtgärder kopplade till vattenvården påverkar vattenkraftens produktionskapacitet och tillgången på reglerkraft, samt hur förändringar i vattenkraftsproduktionen återspeglas på elmarknadsnivå i olika framtida scenarier.</p> <p>Rapportens resultat visar att de bedömda vattenvårdsåtgärderna i viss mån påverkar vattenkraftsproduktionen och dess reglerkapacitet. På elmarknadsnivå förblir dock dessa effekter ganska måttliga. Miljörestriktioner kan öka efterfrågan på reglerkraft från andra källor något, vilket skapar behov av att utveckla nya teknologier såsom energilagring och efterfrågefleksibilitet. Detta fenomen är dock också kopplat till den bredare övergången på energimarknaden.</p>		
<b>Klausul</b>	Publikationen har genomgått en extern vetenskaplig utvärdering.		
	Den här publikation är en del i genomförandet av statsrådets utrednings- och forskningsplan. (tietokaytoon.fi) De som producerar informationen ansvarar för innehållet i publikationen. Textinnehållet återspeglar inte nödvändigtvis statsrådets ståndpunkt.		
<b>Nyckelord</b>	forskning, forskningsverksamhet, reglerkraft, betydande skada, vattenvård, vattenkraft, vattenrätt		
<b>ISBN PDF</b>	978-952-383-144-5	<b>ISSN PDF</b>	2342-6799
<b>URN-adress</b>	<a href="https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-144-5">https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-144-5</a>		

## The effects of implementing water management measures on balancing power

---

### Publications of the Government's analysis, assessment and research activities 2024:39

**Publisher** Prime Minister's Office

---

**Author(s)** Maria Kopsakangas-Savolainen, Iivo Vehviläinen, Antti Belinskij, Hannu Huuki, Jarno Turunen, Antti Iho, Saija Koljonen, Suvi-Tuuli Puharinen, Pauliina Louhi

**Language** Finnish

**Pages** 201

---

**Abstract** The target of the EU Water Framework Directive (WFD 2000/60/EC) is water bodies to achieve good ecological status. In heavily modified water bodies, like some hydropower water bodies, the goal is good ecological potential. Achieving this may involve measures that limit hydropower production, such as maintaining minimum flow levels or constructing fishways. The implementation of these measures must ensure that they do not cause significant harm to energy production, meaning they should not affect electricity production or the availability of balancing power in a way which would compromise the reliability of electricity generation.

This report provides information on how water management-related environmental measures impact hydropower production capacity and the availability of balancing power, and how changes in hydropower production are reflected in the electricity markets under various future scenarios.

The report shows that the assessed water management measures have a certain impact on hydropower production and balancing capacity. However, at the electricity market level, these effects remain quite moderate. Environmental restrictions may slightly increase the demand for balancing power from other sources, leading to the need to develop new technologies such as energy storage and demand response. This phenomenon, however, also ties into the broader energy market transition.

**Provision** This publication has undergone an external scientific review.

This publication is part of the implementation of the Government Plan for Analysis, Assessment and Research. (tietokayttoon.fi) The content is the responsibility of the producers of the information and does not necessarily represent the view of the Government.

**Keywords** research, research activities, balancing power, significant harm, water resources management, hydropower, water law

---

**ISBN PDF** 978-952-383-144-5

**ISSN PDF** 2342-6799

---

**URN-address** <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-144-5>

---

# Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>13</b>
1.1	Tausta ja tavoitteet .....	13
1.2	Mallintamiseen liittyvät skenaario-oletukset .....	16
<b>2</b>	<b>Sähköjärjestelmä ja säätövoima .....</b>	<b>19</b>
2.1	Markkinarakenteet .....	19
2.1.1	Sähkö markkinahyödykkeenä .....	19
2.1.2	Sähkön vuorokausimarkkina .....	19
2.1.3	Päivän sisäinen kaupankäynti .....	20
2.2	Reservit .....	21
2.2.1	Tarve turvata sähköjärjestelmän toimintaa .....	21
2.2.2	Reservit Suomessa .....	22
2.3	Kysynnän ja tarjonnan tasapainotus .....	23
2.3.1	Tuotantoteknologiat .....	23
2.3.1.1	Lämpövoima .....	23
2.3.1.2	Vesivoima .....	24
2.3.1.3	Tuulivoima .....	24
2.3.1.4	Kysyntäjousto .....	25
2.3.1.5	Sähkövarastot .....	25
2.3.1.6	Rajasiirrot .....	26
2.3.2	Teknologioiden soveltuvuus eri käyttöihin .....	26
2.4	Taloudellinen tehokkuus .....	27
2.4.1	Ideaalimalli .....	27
2.4.2	Resilienssi .....	28
2.4.3	Markkinavoima .....	29
2.4.4	Monopolitoiminnan sääntely .....	30
2.5	Sähkömarkkinakehitys vuosina 2015–2023 .....	30
2.5.1	Tuotanto .....	30
2.5.2	Kysyntä ja jäännöskysyntä .....	32
2.5.3	Rajasiirrot .....	34
2.5.4	Sähkön laatu .....	35

<b>3</b>	<b>Virtaamasäännöstelyn ekologiset vaikutukset virtavesissä .....</b>	<b>36</b>
3.1	Ranta- ja vesikasvillisuus .....	37
3.2	Pohjaeläimet .....	39
3.3	Kalat ja nahkiainen .....	40
3.3.1	Nopeat virtaamamuutokset jättävät kalanpoikaset kuiville .....	40
3.3.2	Kalanpoikaset voivat huuhtoutua alavirtaan .....	41
3.3.3	Kalojen lisääntymismenestys heikkenee .....	42
3.3.4	Kalojen vaellukset estyvät tai hidastuvat .....	43
3.3.5	Nahkiainen .....	44
3.4	Lyhytaikaisäännöstelyn muutoksien ekologiset hyödyt .....	45
3.4.1	Lohen populaatiomallinnus ja kalateiden toimivuus .....	48
3.5	Tutkimustarpeet .....	49
<b>4</b>	<b>Ympäristötoimenpiteiden tarkastelu esimerkkivoimalaitoksissa .....</b>	<b>50</b>
4.1	Edustava vesivoimalaitos .....	51
4.1.1	Energiaosuus .....	52
4.1.2	Vesivoimatuotannon säätökyvyn arviointi .....	53
4.1.3	Tulovirtaama ja varastointirajoitukset .....	56
4.1.4	Reservimarkkinapaikat .....	58
4.2	Voimalaitoskohtaiset parametrit .....	63
<b>5</b>	<b>Markkinavaikutukset .....</b>	<b>66</b>
5.1	Tavoitteet .....	66
5.2	Tuleva kehitys .....	66
5.2.1	Pitkän aikavälin tasapaino .....	66
5.2.2	Skenaariot .....	68
5.2.2.1	Lähtökohdat skenaarioille .....	68
5.2.2.2	Oletukset tuotantokustannuksista ja kysynnän maksuhalukkuudesta .....	71
5.2.2.3	Skenaarioiden yhteenveto .....	72
5.2.2.4	Kysynnän ja tarjonnan rakenne skenaariossa .....	73
5.3	Markkinavaikutusten mallintaminen .....	75
5.3.1	Vesivoiman rooli tasapainotuksessa .....	75
5.3.1.1	Vesivoiman merkitys tuntitason tasapainotuksessa .....	75

5.3.1.2	Vesivoiman merkitys vuoden yli tapahtuvassa tasapainotuksessa .....	76
5.3.2	Sähkömarkkinamallin kuvaus .....	77
5.3.2.1	Sähkömarkkinan historiallisten hintojen replikaatio.....	77
5.3.2.2	Lähtötiedot .....	77
5.3.2.3	Skenaariokohtainen numeerinen laskenta .....	78
5.3.3	Vesivoiman säätökyvyn muutokset .....	79
5.3.3.1	Vesivoimatuotannon optimointi nykyisillä rajoitteilla.....	79
5.3.3.2	Veden ohjaaminen voimalaitoksen ohi.....	80
5.3.3.3	Minimivirtaamarajoitteen mallintaminen .....	80
5.4	Tulokset sähkömarkkinavaikutuksista .....	82
5.4.1	Vaikutukset vuorokausimarkkinalla .....	82
5.4.2	Päivän sisäinen kaupankäynti .....	86
5.4.3	Lyhyen aikavälin vaikutukset.....	87
5.4.3.1	Lyhyen aikavälin säätötarve.....	87
5.4.3.2	Vesivoiman merkitys lyhyen aikavälin tasapainotuksessa .....	89
5.4.3.3	Reservien käyttö .....	91
5.4.3.4	Reservien tarjonta.....	93
5.5	Muut markkinavaikutukset.....	95
5.6	Menetelmien arviointi .....	96
5.6.1	Skenaariot .....	96
5.6.2	Vuorokausimarkkinan mallintaminen.....	97
5.6.3	Markkinavoima .....	99
5.6.4	Vertailu muihin selvityksiin.....	99

## **6 Ympäristötoimien vaikutus vesivoimalaitoksen säätökykyyn..... 101**

6.1	Pieni voimalaitos: Vuorokausi- ja FCR-N-markkinapaikat .....	102
6.2	Suuri voimalaitos: Vuorokausi-, aFRR- ja mFRR-markkinapaikat.....	105

<b>7</b>	<b>Vesienhoidon toimenpiteen 'Keskivirtaama -2 %' tarkastelu suurissa voimatalousvesistöissä.....</b>	<b>109</b>
7.1	Päivätason virtaama-alue ja säätökyky.....	109
7.2	Kemijoen voimalaitokset.....	113
7.3	Iijoen voimalaitokset.....	116
7.4	Oulujoen voimalaitokset.....	119
<b>8</b>	<b>Oikeudelliset reunaehdot – vesienhoidon toimenpiteistä säättövoimalle aiheutuva merkittävä haitta .....</b>	<b>122</b>
8.1	Luvun sisältö .....	122
8.1.1	Merkittävän haitan arviointi.....	122
8.1.2	Kysymykset ja luvun rakenne .....	123
8.2	Merkittävä haitta vesienhoidossa .....	124
8.2.1	Vesienhoidon ympäristötavoitteet.....	124
8.2.2	Vesienhoidon toimenpiteet .....	126
8.2.3	Vesimuodostuman nimeäminen voimakkaasti muutetuksi .....	127
8.2.3.1	Tärkeän vedenkäytön suhde ekologisiin tavoitteisiin .....	127
8.2.3.2	Nimeämisen edellytykset .....	128
8.2.3.3	Vesivoiman tuotanto nimeämisen perusteena .....	129
8.2.4	Ympäristön kannalta paremmat vaihtoehdot .....	130
8.2.4.1	Vaihtoehtojen arviointi voimakkaasti muutetuksi nimeämisen yhteydessä.....	130
8.2.4.2	Vaihtoehtojen arvioinnin laajuus .....	131
8.2.4.3	Ympäristöllisesti paremmat vaihtoehdot muualla EU-lainsäädännössä .....	132
8.2.5	Hyvän ekologisen potentiaalin määrittäminen .....	133
8.2.5.1	Merkittävä haitta rajana.....	133
8.2.5.2	Hyvä saavutettavissa oleva tila Suomen KeVoMu-ohjeistuksessa.....	134
8.2.5.3	Vesienhoidon suunnittelun toimenpiteet .....	135
8.2.6	Merkittävien haitallisten vaikutusten skaala.....	136
8.2.6.1	Tulkintavaihtoehdot.....	136
8.2.6.2	Sähköjärjestelmätason skaalaa puoltavat perusteet.....	137
8.2.7	Merkittävän haitan suhde ympäristövastuuseen .....	138
8.3	Merkittävä haitta vertailumaissa .....	139

8.3.1	Ruotsi .....	139
8.3.1.1	Tausta .....	139
8.3.1.2	Vuoden 2019 sääntelyuudistus .....	140
8.3.1.3	Energiapolitiittiset linjaukset .....	141
8.3.1.4	Energiapolitiikan oikeudelliset kytkennät .....	142
8.3.1.5	Vesivoimalupien tarkistamisen pysäyttäminen .....	143
8.3.2	Saksa .....	143
8.3.2.1	Tausta .....	143
8.3.2.2	Kansallinen ohjeistus merkittävän haitan arvioinnista .....	144
8.3.3	Itävalta .....	145
8.3.3.1	Tausta .....	145
8.3.3.2	Kansallinen ohjeistus .....	145
8.3.4	Ranska .....	146
8.3.4.1	Tausta .....	146
8.3.4.2	Kansallinen ohjeistus .....	146
8.4	Suomen lupajärjestelmä .....	148
8.4.1	Vesiluvan tarve ja lupamääräykset .....	148
8.4.2	Lupamääräysten muuttaminen .....	149
8.4.2.1	Vesilain keskeiset luvantarkistamissäännökset .....	149
8.4.2.2	Yleissäännös lupien muuttamisesta ja pysyvyyssuojasta .....	149
8.4.2.3	Kalatalousmääräysten tarkistaminen .....	149
8.4.2.4	Vanhan säännöstelyluvan tarkistaminen .....	150
8.4.2.5	Lupamääräysten muuttaminen vesienhoidon ympäristötavoitteiden perusteella .....	151
8.5	Oikeudellisen sääntelyn arviointi ja kehittämistarpeet .....	152
8.5.1	Vesimuodostuman voimakkaasti muutetuksi nimeäminen suhteessa erilaisiin vesivoimalaitoksiin .....	152
8.5.2	Hyvän ekologisen potentiaalin ja säätövoimatuotannon yhteensovittaminen .....	153
8.5.3	Vesivoimalupien päivittäminen Suomen oikeusjärjestelmässä .....	155
8.5.4	Kansallisen sääntelyn kehittämistarpeet .....	155

<b>9</b>	<b>Yhteenveto ja johtopäätökset.....</b>	<b>157</b>
9.1	Selvityksen tavoitteisiin vastaaminen.....	157
9.2	Päätulokset .....	159
9.3	Johtopäätöksiä ja kehitysehdotuksia.....	166
	<b>Lähteet.....</b>	<b>182</b>

## LUKIJALLE

Tämä raportti kokoaa yhteen arvion vesienhoitoon liittyvien ympäristötoimenpiteiden vaikutuksista vesivoiman säätökykyyn ja energiamarkkinoihin Suomessa. Raportti perustuu Valtioneuvoston kanslian tilaamaan tutkimukseen, joka on toteutettu laaja-alaisesti asiantuntijatyön ja mallinnusten pohjalta. Raportissa käsitellään vesivoiman roolia säätövoiman tuottajana sekä arvioidaan vesienhoitoon liittyvien toimenpiteiden vaikutuksia vesivoimatuotantoon, sähkömarkkinoihin ja vesien ekologiseen tilaan eri tulevaisuuteen liittyvien skenaarioiden kautta

Tutkimuksen keskeisiä tietolähteitä ovat olleet vesienhoidon suunnitelmat, tieteellinen kirjallisuus, sekä vesivoimatuotantoon ja sähkömarkkinoihin liittyvät analyysit. Mallinuksissa on hyödynnetty kansainvälisiä esimerkkejä ja tuloksissa on huomioitu uudet teknologiset kehitykset, kuten energian varastointi ja kysyntäjousto. Skenaarioanalyysien avulla raportissa esitetään, miten erilaiset ympäristötoimenpiteet vaikuttavat säätövoiman tarjontaan ja millä tavoin nämä vaikutukset näyttäytyvät sähkömarkkinoilla.

Hankkeen aikana laskelmia on päivitetty useaan otteeseen viimeisimmän saatavilla olevan tiedon perusteella. Työryhmä haluaa kiittää kaikkia hankkeeseen osallistuneita asiantuntijoita ja muita sidosryhmiä arvokkaasta yhteistyöstä. Lisäksi esitämme lämpimät kiitokset hankkeen ohjausryhmälle arvokkaasta tuesta ja palautteesta.

Maria Kopsakangas-Savolainen

# 1 Johdanto

## 1.1 Tausta ja tavoitteet

Suomessa jokien patoamisella sähköenergian tuotantoa ja tulvasuojelua varten on ollut mittavat vaikutukset virtavesiin ja niiden eliöyhteisöihin. Kokonaiset jokiympäristöt lajistoineen ovat muuttuneet lähemmäksi järvimäisiä patoaltaita kuin varsinaisia virtavesiekosysteemejä ja etenkin vaelluskalakannat ovat kärsineet merkittävästi patojen muodostamista vaellusesteistä, koskielinympäristöjen häviämisestä ja virtaamamuu- toksista.

Eri arvioiden mukaan noin 20–30 Suomen Itämeren puolen rannikkojoista on ollut lohikanta (Maa- ja metsätalousministeriö 2015). Vapaana virtaavat Tornionjoki ja Simojoki ovat näistä ainoat jäljellä olevat joet, joissa edelleen esiintyy geneettisesti alkuperäinen ja luontaisesti lisääntyvä lohikanta (Maa- ja metsätalousministeriö 2015). Vastaavan mittaluokan muutoksen ovat kokeneet myös Suomen meritaimen-, vaellussiika- ja ankeriaskannat (Jokikokko & Huhmarniemi 2014, Urho ym. 2019, Maa- ja metsätalousministeriö 2020). Lisäksi sisävesissä Vuoksen vesistön järvilohi on äärimmäisen uhanalainen ja taimenmuodot erittäin uhanalaisia (Urho ym. 2019).

Vesirakentamisesta johtuvien haittojen vähentämiseksi ja vaelluskalakantojen elvyttämiseksi on laadittu kansallinen kalatiestrategia vuonna 2012, jonka päivittämistyö on käynnistymässä lähiaikoina. Strategia ohjaa vaelluskalojen luonnollisen elinkierron palauttamiseen tähtääviä toimenpiteitä niihin kohteisiin, joissa toimenpiteillä arvioidaan saavutettavan suurimmat ekologiset hyödyt. Rakennettujen jokien vaelluskalakantojen tilaa parantaville hankkeille on kohdistettu valtion rahoitusta eri hallitusten ohjelmien mukaisesti. Viimeisimpänä Rinteen ja Marinin (2019–2023) sekä Orpon (2023–2027) hallitusten tuella on toimeenpantu Nousu-ohjelma.

Kansallisten strategioiden ja ohjelmien ohella myös lainsäädännössä pyritään vesistöjen tilan parantamiseen. EU:n vesipuitedirektiivin (VPD 2000/60/EY) ja sitä toimeenpanevan vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä annetun lain (VMJL 1299/2004) tavoitteena on saavuttaa vesimuodostumien hyvä tila ja estää tilan heikkeneminen. Jos vesimuodostuma on nimetty voimakkaasti muutetuksi esimerkiksi vesivoimatuotannon ja säännöstelyn takia, tavoitteena on hyvä saavutettavissa oleva ekologinen tila. Voimakkaasti muutetuissa vesimuodostumissa ympäristöhaittoja lieventäviä toimenpiteitä tulee toteuttaa niin pitkälle kuin niistä aiheutuu merkittäviä haitallisia vaikutuksia nimeämisen perusteena oleville ihmistoiminnoille (VMJL 22 §).

Vesipuidedirektiivin perusteella voimakkaasti muutettujen jokien ympäristötoimenpiteissä tulee kiinnittää huomiota esimerkiksi jokien ekologiseen jatkumoon eläimistön vaelluksen sekä kutemis- ja lisääntymisalueiden kannalta. Hyvään saavutettavissa olevaan ekologiseen tilaan voi liittyä toimenpiteitä, kuten ympäristövirtaamat, minimivirtaamat ja ohitusuomat, jotka vähentävät vesivoiman tuotanto- ja säätökapasiteettia. Se miten ympäristötoimenpiteet ja vesivoimaintressit voidaan yhteensovittaa, on ratkaistava tapauskohtaisesti. Esimerkiksi Ruotsissa asiasta on kuitenkin tehty myös yleisempiä strategisia linjauksia. Selvää vesipuidedirektiivin perusteella on, että vesivoimalupia pitää olla mahdollista muuttaa ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi (VPD 11 art.).

Vesivoiman tuotantokapasiteetin vähentäminen herättää voimakkaita reaktioita. Tämä johtuu vesivoiman perinteisesti vahvan roolin lisäksi sähkömarkkinoiden poikkeuksellisesta tilanteesta. Venäjän hyökkäyssota Ukrainaan aiheutti nykymallisen eurooppalaisen sähkömarkkinan suurimman kriisin. Suomen sähköjärjestelmälle se merkitsi ensisijaisesti sähkön tarjonnan vähentymistä.

Tuulivoimatuotannon lisääntyminen voimistaa sähkön tarjonnan vaihtelua ja lisää sähkömarkkinoiden kysyntää ja tarjontaa tasapainottavan säädön tarvetta. Säätöä voidaan tuottaa lisäämällä tai vähentämällä tuotantoa ja/tai kulutusta. Eri tuotantomuotojen kyky säätää on erilaista. Kysyntäjoustopotentiaali vähentää kulutusta on konkretisoitunut pörssisähköä ostavien yksityisasiakkaiden osuuden noustessa. Kysyntäjoustopotentiaali tarkoittaa sähkönkulutuksen siirtämistä korkean kuormituksen ja korkean hinnan tunneilta edullisempaan aikaan tai kulutuksen väliaikaista säätämistä tehotasapainon hallitsemiseksi. Akkuteknologian kehitys on lisännyt niiden käyttöä kaikkein nopeinta reagoivia vaativassa säädössä.

Tuulivoiman tuotanto Suomessa on noin kymmenkertaistunut kahdeksassa vuodessa. Kasvunopeutta kuvaa se, että Energiateollisuus ry:n ja Fingridin rahoittamassa, ÅF Consultin vuonna 2012 tekemässä selvityksessä ”*Mistä lisäjoustopotentiaalia sähköjärjestelmään?*” tuulivoimakapasiteetin ennakoitiin olevan 4 000 MW vuoteen 2030 mennessä. Kapasiteetti nousi kuitenkin jo vuoden 2023 loppuun mennessä lähes 7 000 MW:iin.

Energiaviraston voimalaitosrekisterin mukaan vesivoimakapasiteetti ei ole muuttunut vuodesta 2014 vuoteen 2023.<sup>1</sup> Vuodesta 2012 vuoteen 2022 yhteistuotantokapasiteetti kaukolämmössä ja teollisuudessa on alentunut 5860 MW:sta 5247 MW:iin. Vesivoimalla tuotettiin vuosina 2010–2014 keskimäärin 13 520 GWh ja vuosina 2018–2022

<sup>1</sup> Tiedot vuodesta 2014 kerätty osoitteesta <https://energiavirasto.fi/toimitusvarmuus>. Tietojen mukaan kapasiteetti vuoden 2014 viimeisellä viikolla oli 3008 MW ja vuoden 2023 viimeisellä viikolla 3006 MW. ÅF Consultin raportin mukaan vesivoimakapasiteetti vuonna 2012 oli 3084 MW. Motivan mukaan kapasiteetti oli vuonna 2021 3190 MW. Sivu ei nimeä lähdettä tiedolle (https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\_energia/vesivoima).

14 003 GWh. Sähkön ja lämmön yhteistuotantona kaukolämpö- ja teollisuuslaitoksissa tuotettiin vastaavina jaksoina keskimäärin 24 483 GWh ja 19 600 GWh. Lauhdetuotannon määrä laski 8 888 GWh:sta 3 181 GWh:iin.<sup>2</sup> Öljyllä ja maakaasulla (kaasuturbiinit ja tahtimoottorit) voi olla edelleen rooli mahdollisina säätövoiman tuottajina (AFRY 2023), mutta myös niiden merkitys sähkön tuotannossa on vähentynyt vuoden 2012 jälkeen.<sup>3</sup>

Vaihtelevan tuotannon kapasiteetin muutos on siis ollut ajanjaksolla kolme kertaa nopeampaa kuin ennakoitiin ja säätöön kaavailtujen tuotantomuotojen tuotanto on lisääntymisen sijaan vähentynyt yli viidenneksen. Tästä huolimatta markkinatulemat ovat olleet hyvin maltillisia. Sähkön hinta on ollut Suomessa Euroopan tasolla edullista, sähkön laatu on pysynyt ennallaan tai parantunut, eikä sähkön toimituksessa ole ollut häiriöitä, vaikka Venäjän hyökkäys Ukrainaan aiheutti koko Euroopan sähkömarkkinoihin valtavan shokin.

Muuttuvien olosuhteiden vähäiset vaikutukset Suomen sähkömarkkinoihin selittyvät osittain markkinoiden luonteella. Markkinatoimijat reagoivat käsillä oleviin ja ennakoituihin muutoksiin. Ennakoidut korkeat hinnat kannustavat tuotantoinvestointeihin ja toisaalta sähköä kuluttavien tuotantolaitosten tehokkuuden parantamiseen. Suuret hintavaihtelut kannustavat kysyntäjoustavuutta tai joustavaa tuotantoa mahdollistaviin investointeihin. Etukäteen ei voida tietää, mitä tulevaisuuden voittavat teknologiat ja menetelmät ovat, mutta markkinoilla on taipumus löytää tai kehittää tehokkaimpia kulloinkin saatavilla olevia vastineita toimintaympäristön muutoksiin.

Tämän hankkeen tavoitteena on arvioida vesien tilaa parantavien ympäristötoimenpiteiden vaikutuksia i) virtavesiekosysteemeihin ja ii) vesivoiman tuotantokapasiteettiin, säätövoimaan, tuottoon ja sähkömarkkinoihin. Näitä vaikutuksia peilataan vesienhoitolainsäädännön mukaiseen ihmistoiminnoille aiheutuvan merkittävän haitan käsitteeseen.

Raportin tarkastelussa keskiöön nousevat vesivoimalta edellytettävien ympäristötoimenpiteiden kustannukset, jotka muodostuvat sähkömarkkinoiden välittämänä. Näin ollen sähkömarkkinoiden toimintamekanismit, niiden käynnissä oleva muutos sekä tulevaisuuden mahdolliset muutokset saavat selvityksessä paljon huomiota. Tarkastelussa lähdetäänkin liikkeelle sähkömarkkinoiden toiminnasta, jota toisinnetaan rakenteellisen

---

<sup>2</sup> [https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_salatuo/statfin\\_salatuo\\_pxt\\_13ir.px/table/tableViewLayout1/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__salatuo/statfin_salatuo_pxt_13ir.px/table/tableViewLayout1/)

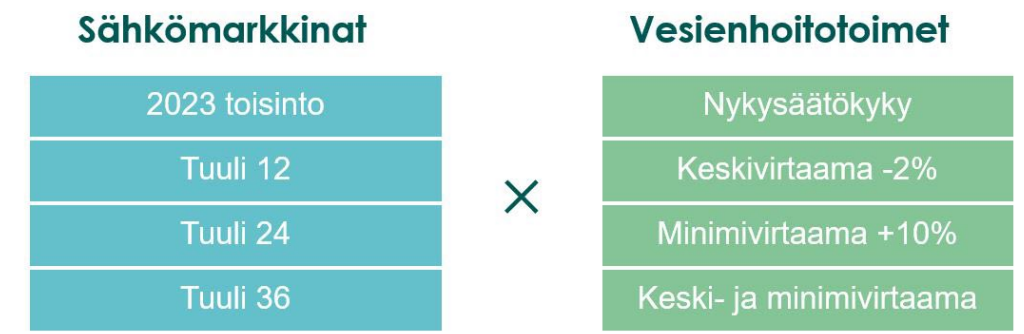
<sup>3</sup> [https://energia.fi/wp-content/uploads/2023/08/Sahkovuosi\\_2022.pdf](https://energia.fi/wp-content/uploads/2023/08/Sahkovuosi_2022.pdf)

sähkömarkkinamallin avulla (kts. Vehviläinen, 2023).<sup>4</sup> Mallin avulla vastaamme kysymykseen, millä tavoin sähkön tukkumarkkinat ja sähkön hinta reagoivat eri tuotantomuotojen tarjonnan ja kysynnän muutoksiin. Lisäksi tarkastelemme erillisellä yksittäisen vesivoimalan mallilla sitä, miten vesivoiman tuotanto reagoi erilaisiin ympäristörajoitteisiin. Käytettävien mallien tuloksia tuotetaan erilaisissa tulevaisuuden kysyntä- ja tarjontaskenaarioissa.

## 1.2 Mallintamiseen liittyvät skenaario-oletukset

Raportissa vesivoimatuotannon ympäristötoimenpiteiden vaikutusta tarkastellaan neljässä eri sähkömarkkinaskenaariossa yhdistettynä neljään vesienhoitotoimenpiteisiin liittyvään skenaarioon (Kuvio 1).

**Kuvio 1.** Sähkönmarkkina ja vesienhoitotoimien skenaariot.



Sähkömarkkinaskenaariot voidaan ajatella ilmentävän nykytilaa, lyhyttä aikaväliä, keskipitkää aikaväliä ja pitkää aikaväliä. Koska mallintamisessa käytettävät menetelmät edellyttävät kehityspolkujen konkretisoimista muutoksiin kysynnässä ja vaihtelevassa sähkön tuotannossa olemme nimenneet skenaariot tuulivoiman ja sen kapasiteetin mukaan (esim. Tuuli 12, tarkoittaa että tuulivoimaa tulee markkinoille 12 GW:n verran). Lisäksi käytetty sähkömarkkinamalli edellyttää erilaisten pitkän aikavälin markkinarealis- mia konkretisoivien oletusten tekemistä. Näihin liittyvät mm. oletukset kysyntäjoustosta ja hiilineutraalisuustavoitteista.

<sup>4</sup> Rakenteellinen malli (structural model) viittaa mallinnusmenetelmään, jossa pyritään kuvaamaan järjestelmän tai markkinoiden toiminnan taustalla olevia perusmekanismeja ja syy-seuraussuhteita. Rakenteelliset mallit koostuvat järjestelmän eri komponenttien välisistä suhteista ja käyttäytymisestä, ja ne pyrkivät mallintamaan todellista toimintaympäristöä mahdollisimman tarkasti.

Kysyntäjoustoön liittyvissä oletuksissa olemme huomioineet Suomen ilmasto- ja energiastrategiassa esiin nostetun painotuksen tarpeesta hyödyntää kysyntäjoustopotentiaali täysimääräisesti.<sup>5</sup> Täysimääräinen kysyntäjousto hyödyntäminen edellyttäisi joustojen estimoimista eri pörssisähköosuuksille ja sitä, että nämä estimaatit myös siirtyvät sähkömarkkinoiden vuorokausimarkkinoiden aggregoituihin kysyntäkäyriin ja sitä kautta tasapainohintoihin. Ennen kuin tällainen harjoitus on tehty, käsitys kysyntäjousto potentiaalista on epätäydellistä. Jotakin käsitystä kulutusjousto potentiaalista voidaan saada tarkastelemalla tiettyjä erityisiä ajanhetkiä sähkömarkkinoilla. Kulutusjousto potentiaalia kuvastaa esimerkiksi sähköperjantai 5.1.2024. Vuoden 2023 lopussa 29 % kuluttajista oli siirtynyt pörssisähkön käyttäjiksi.<sup>6</sup> Vuoden 2021 lopussa osuus oli 9 %.<sup>7</sup> Perjantaina 5.1., sähkön hinnan kohotessa ylimmillään 2,35 euroon kilowattitunnilta, sähkön kulutus jäi jopa 1 000 MW ennustetusta kulutuksesta.<sup>8</sup> Pohjois-Karjalan Sähkön liiketoimintajohtaja Tomi Turusen mukaan tuon päivän huippuhinnan aikana pörssisähköasiakkaat vähensivät kulutustaan 21 prosenttia suhteessa edellisen päivän vastaavaan tuntiin. Määräaikaiset eivät vähentäneet kulutustaan lainkaan.<sup>9</sup> Markkinatasapainossa, jossa kysyntä- ja tarjontakäyrien jyrkkyyden vuoksi pienikin muutos tarkoittaa merkittävää muutosta tasapainohinnassa, tämän suuruinen ero ennustetussa ja toteutuneessa kulutuksessa on dramaattinen.

Suomen 2022 päivitetyn ilmasto- ja energiastrategian skenaarion, jossa hiilineutraalisuus saavutetaan vuonna 2035, taustalla on oletus maankäyttösektorin 21 miljoonan tonnin hiilinielusta, joka mahdollistaa vastaavansuuruiset kokonaispäästöt. Niin sanotussa politiikkaskenaariossa päästöt ovat tätä 4 miljoonaa CO<sub>2</sub>-ekvivalenttitonnia suuremmat.<sup>10</sup> Päästövähennystarpeet, joita hiilineutraalisuus vuonna 2035 edellyttää, päivitetään ilmastopolitiikan tarkistusvuonna 2025. Selvää on, että päästövähennystavoitteet vuodelle 2035 tulevat tiukentumaan. Sähköjärjestelmän näkökulmasta ilmastostrategian vähähiilisyyskenaarion nopeampi vähähiilisten teknologioiden käyttöönotto niin energian käytössä kuin tuotannossa tarkoittaa lisääntyntä sähkön kysyntää. Tarkastelumme skenaarioissa sähkönkulutus enimmillään kaksinkertaistuu vuoteen 2035 mennessä.

---

<sup>5</sup> Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen energia- ja ilmastostrategia. s 54.

<sup>6</sup> Tilanne joulukuun lopussa 2023 Taloustutkimuksen selvityksen mukaan (<https://www.nordic-green.fi/tutkimus-porssisahkosopimusten-maara-kaksinkertaistui/>).

<sup>7</sup> <https://energiavirasto.fi/-/porssihintaisten-sahkosopimusten-osuus-nousi-lahes-14-prosenttiin-vuonna-2022>

<sup>8</sup> <https://energia.fi/tiedotteet/vuoden-ensimmainen-sahkoviikko-oli-hyvin-poikkeuksellisen-kulutusennatykset-uusiksi/>

<sup>9</sup> YLE 8.3.2024, <https://yle.fi/a/74-20077503>

<sup>10</sup> <https://www.ilmastopaneeli.fi/tiedotteet/maankayttosektorin-nettonielua-on-vahvistettava-kiireellisesti/>

Vesivoiman ympäristövaikutusten vähentämiseksi keskeisimpiä vesienhoidon toimenpiteitä ovat kalankulkua edistävät rakenteet kuten tekniset ja luonnonmukaiset kalatiet, kalojen alasvaellusta edistävät rakenteet ja virtaamasäännöstelyn rajoittaminen siten, että joessa pysyy jatkuva virtaama (ns. 0-virtaama tilateiden rajoittaminen). Vesienhoidon 3. suunnittelukauden ohjeistuksessa on arvioitu, että keinotekoisien ja voimakkaasti muutettujen (KEVOMU) jokien kalankulkuväylät on mahdollista toteuttaa ilman merkittävää haittaa voimataloudelle ohjaamalla suurissa joissa 2–3 % keskivirtaamasta voimalaitosten ohi kalankulun edistämiseksi. Kalateiden toimivuuden ja jokielinympäristön tilan parantamiseksi lyhytaikaisssäännöstelyä voi paikoin olla tarvetta rajoittaa esimerkiksi pienentämällä virtaaman alassäätökapasiteettiä 10 prosentilla. Vastaavan suuruista veden allokointia kalankulkuväyliin ja virtaamavaihtelun rajoittamista on käytetty myös kansainvälisissä tutkimuksissa, joissa on arvioitu vesienhoitotoimenpiteiden vaikutusta elinympäristöjen tilaan ja toisaalta voimatalouden menetyksiä (Widén ym. 2022). Tähän taustaan nojaten vesienhoitotoimenpiteisiin liittyviksi skenaario-oletuksiksi valittiin nykytila, keskivirtaama –2%, minimivirtaama +10% ja keskivirtaama –2% yhdistettynä minimivirtaama +10% skenaarioon. Minimivirtaama +10% skenaariossa vesivoiman minimivirtaamaa nostetaan, siten että vesivoimatuottajan tuotantoalue minimi- ja maksimituotannon välillä rajoittuu kymmenen prosenttia. Virtaaman rajoittaminen vesienhoitotoimenpiteinä on hyvin tapauskohtainen sekä rajoituksen tason että ajankohdan suhteen. Minimivirtaamaskenaario kuvaa yleisen tason esimerkkinä virtaamarajoituksen vaikutusta vesivoiman säätökykyyn.

Raportti rakentuu seuraavasti. Luku 2 on taustoittava luku, joka käy läpi sähkömarkkinoiden toimintamekanismit sekä pohjoismaisten sähkömarkkinoiden erityispiirteet. Luku helpottaa varsinaisten vesivoimaan ja energiamarkkinoihin keskittyvien lukujen (4, 5, 6 ja 7) seuraamista. Sähkömarkkinoiden toiminnan hyvin tunteva lukija voi aloittaa lukemisen suoraan luvusta 3. Luvussa 3 kuvataan virtaamasäännöstelyn ekologisia vaikutuksia ja luku 8 keskittyy oikeudellisiin reunaehtoihin. Luku 9 tarjoaa yhteenvedon ja johtopäätökset.

## 2 Sähköjärjestelmä ja säätövoima

### 2.1 Markkinarakenteet

#### 2.1.1 Sähkö markkinahyödykkeenä

Sähkön hinnat määräytyvät markkinoilla kuten useimpien muidenkin tuotteiden ja palveluiden, joita kulutamme ja käytämme. Sähkö poikkeaa kuitenkin monista muista tuotteista kahdesta pääsystä:

1. Sähköä ei voida nyky-yhteiskunnassa kokonaisuudessaan korvata millään muulla tuotteella edes hetkellisesti. Sähkö on välttämättömyyshyödyke.
2. Sähköä pitää jokaisella ajanhetkellä tuottaa sähkönkulutusta vastaava määrä, muutoin seurauksena on sähkökatko. Sähkökatko vaikuttaa kaikkiin sähkön tuottajiin ja kuluttajiin samanaikaisesti.

Sähkömarkkinoiden yhteiskunnallisen merkittävyyden ja eri toimijoiden välisen koordinaatiotarpeen ratkaisemiseksi sähkömarkkinoita säännellään monia muita markkinoita voimakkaammin. Sääntely määrittää miten kauppaa käydään, miten sähkön hinta määräytyy eri markkinapaikoilla ja miten varmistetaan sähköjärjestelmän toimivuus eri olosuhteissa.

Sähkömarkkinakokonaisuudesta on vuosien varrella rakentunut monimutkainen järjestelmä. Monimutkaisuutta luo tarve pitää tuotanto ja kulutus tasapainossa eri aikajän-teillä, huomioiden esimerkiksi se, että osa tarpeen tullen käyttöön otettavista voimalaitoksista tarvitsee useita tunteja käynnistykseen.

#### 2.1.2 Sähkön vuorokausimarkkina

Taloudellisesti merkittävin sähkömarkkinan osa-alue ovat sähkön vuorokausimarkkinat, nk. spot-markkinat, joilla kysynnän ja tarjonnan tasapaino lasketaan kullekin vuorokauden tunnille päivää etukäteen. Vuorokausimarkkinalle osallistuminen on vapaaehtoista, mutta valtaosa Suomessa tuotetusta ja kulutetusta sähköstä on myyty ja ostettu spot-markkinan kautta (vuonna 2023 vuorokausimarkkinan kautta myytiin n. 69% tuotannosta ja ostettiin n. 71% kulutuksesta (Energiavirasto 2024)). Vuorokausimarkkinahinta

on myös referenssihintaa sähkön johdannaismarkkinoille, jotka määrittävät pitkän aikavälin sopimushintoja, esimerkiksi kuluttajille tarjottavien määräaikaisten kiinteähintaisien sopimusten sopimushintoja.

Sähkön vuorokausimarkkina on samalla pääasiallinen väline kysynnän ja tarjonnan koordinointiin päivää etukäteen. Sähköpörssiin jätettyjen tarjousten perusteella laskeaan kullekin tulevan päivän tunnille kysynnän ja tarjonnan tasapaino. Tasapaino löytyy hakemalla markkinahinta, joka on sopiva kaikille osapuolille: 1) kukin sähköä myyvä on valmis myymään sähköä, jos saavat siitä korvaukseksi vähintään markkinahinnan ja 2) kukin sähköä ostava on valmis maksamaan sähköstä enintään markkinahinnan.

Sähkömarkkinalla tarjoukset kiinnittyvät niiden fyysisiin kulutus- tai tuotantopaikkoihin. Suomessa myyty ja ostettu sähkö tarjotaan Suomen hinta-alueelle. Suomen markkina on tiiviisti kytkeytynyt muihin Pohjoismaihin ja nykyään eteenpäin myös muihin EU-maihin. Sähkön siirtoa rajojen yli rajoittaa kuitenkin käytössä oleva siirtokapasiteetti ja siksi yhteiseurooppalainen sähkömarkkina koostuukin useista maantieteellisistä hinta-alueista. Muissa Pohjoismaissa hinta-alueet on pilkottu maiden rajoja pienempiin maantieteellisiin alueisiin: Ruotsi on jaettu neljään hinta-alueeseen, Norja viiteen ja Tanska kahteen. Kullakin hinta-alueelle määritetään erikseen spot-hinta vuoden jokaiselle tunnille. Annetuilla kysyntä- ja tuotantotarjouksilla tasapainon laskenta on periaatteessa yksinkertainen tehtävä, mutta käytännössä erilaiset tarjousmahdollisuudet ja rajoitteet vaikeuttavat laskentatehtävää<sup>11</sup>.

### 2.1.3 Päivän sisäinen kaupankäynti

Sitoumukset ostaa tai myydä sähköä päivän kunakin tuntina tehdään spot-markkinalla edellisenä päivänä puoleen päivään mennessä. Osto- ja myyntipäätökset on tehtävä niiden tietojen perusteella, jotka ovat käytettävissä ennen spot-kaupankäynnin sulkeutumista. Päivän sisäinen kaupankäynti antaa markkinatoimijoille tilaisuuden muuttaa etukäteen ostetun tai myydyn sähkön määrää. Päivän sisäisen kaupankäynnin taloudellinen merkitys on kuitenkin ollut kertaluokkaa sähkön vuorokausimarkkinaa vähäisempi.

---

<sup>11</sup> Rajoitteiden seurauksena optimointitehtävä ei ole konvekssi, eikä laskentatulosten optimaalisuutta voida taata teoriassa, eikä aina käytännössä.

## 2.2 Reservit

### 2.2.1 Tarve turvata sähköjärjestelmän toimintaa

Sähköjärjestelmän toiminta määräytyy fysiikan lakien mukaan. Sähköverkossa käytössä olevassa vaihtovirtajärjestelmässä sähkövirran suunta vaihtelee useita kertoja sekunnissa. Euroopassa taajuus on 50 hertsiä, ja sähköverkkoon kytkettyjen tuotanto- ja kulutuspuolen laitteiden toiminta perustuu tälle tekniselle määrittelylle. Mikäli taajuus poikkeaa liikaa viitearvosta, seurauksena on laitteiden irtikytkeytyminen sähköverkosta tai rikkoutuminen. Taajuuden äkillisistä muutoksista voi seurata ketjureaktio, joka vaarantaa koko sähköjärjestelmän toiminnan<sup>12</sup>.

Lähtökohtaisesti sähköjärjestelmän taajuus on aina lähellä viitearvoaan. Muutokset tuotannossa ja kulutuksessa vaikuttavat kuitenkin heti taajuuteen. Jos tuotanto on kysyntää suurempi, taajuus nousee ja jos tuotanto on kysyntää alhaisempi, taajuus laskee. Järjestelmän inertia sääntelee muutosnopeutta. Muutokset ovat suhteessa nopeampia, jos inertiaa on vähän verrattuna tilanteeseen, jossa inertiaa on enemmän.<sup>13</sup>

Tarve pitää sähköjärjestelmä toiminnassa kullakin ajanhetkellä edellyttää välillä hyvin nopeaa kysynnän ja tarjonnan tasapainottamista. Tavallisten hyödykkeiden osalta tilapäiset häiriöt toimituksissa voivat johtaa korkeisiin hintoihin ja tavarain loppumiseen, mutta kuluttajilla on mahdollisuus vaihtaa muiden tuotteiden käyttöön tai odottaa, kunnes tuotetta on jälleen saatavilla. Markkinatoimijat reagoivat muutoksiin hinnoissa ja uusi tasapaino saavutetaan aikanaan. Sähkömarkkinalla vastaavaan odotteluun ei ole varaa ilman sähkökatkoja, jotka voivat vaarantaa yhteiskunnan toimivuutta. Sähköjärjestelmän toimivuuden kannalta myös ylituotantotilanteet ovat ongelmallisia.

Sähkömarkkinoiden kautta ei, ainakaan vielä, ole mahdollista koordinoita tuotannon ja kulutuksen välistä tasapainoa riittävän nopeasti suhteessa sähköjärjestelmän ylläpidon edellyttämiin teknisiin vaatimuksiin. Esimerkiksi mikäli Olkiluoto 3:n irtikytkeytyy sähköverkosta, tulee sitä varten rakennetun erillisen järjestelmäsuojan kytetä reagoimaan 0,3 sekunnin sisällä. Erilaisiin kysyntä- ja tarjontapuolen shokkeihin varautuminen edellyttääkin keskitettyä etukäteen tehtyä koordinaatiota markkinan ulkopuolelta. Reservimekanismit ja -tuotteet, ja niille luodut erilliset markkinat ovat tämän koordinaation konkreettinen muoto.

---

<sup>12</sup> Esim. Yle uutinen, Ruotsin suuri sähkökatko aiheutti UPM:n sellutehtaan alasajon Pietarsaaressa – puolen minuutin häiriöstä puolen vuorokauden tehtaan ylösajo, 27.4.2023, <https://yle.fi/a/74-20029252>.

<sup>13</sup> Ks. esim. de Souza et al. (1984).

## 2.2.2 Reservit Suomessa

EU:n sähkömarkkinamallissa sähköjärjestelmän reaaliaikainen seuranta ja tasapainon varmistaminen on annettu järjestelmävastaavan tehtäväksi. Suomessa järjestelmävastaavaksi kantaverkonhaltijaksi on määrätty Fingrid Oyj. EU:ssa järjestelmävastaavan tehtäviä ja muita sähkömarkkinoiden yksityiskohtaisia toimintamenettelyjä ohjataan enenevässä määrin nk. verkkosääntöjen kautta, joiden tavoitteena on yhtenäistää eurooppalaisia käytäntöjä<sup>14</sup>.

Suomen ja muiden Pohjoismaiden välinen yhteistyö (ja parhaillaan käynnissä oleva EU-kehitys) eri reservimekanismien osalta on viime vuosina lisääntynyt. Käytännössä tämä tehostaa reservien käyttöä maiden rajojen yli kahta kautta. Ensinnä, eri maiden väliset kulutuksen ja tuotannon väliset poikkeamat voivat kumota toisiaan ja vähentää kokonaisreservitarvetta. Toisekseen yhteistyö tehostaa myös reserviin kykenevien teknologioiden käyttöä. Vaikutusten suuruus määräytyy käytettävissä olevan siirtokapasiteetin perusteella.

Suomessa käytössä olevilla reserveilla on kaksi päätehtävää. Ensimmäinen on sähköverkon taajuuden ylläpito sähköjärjestelmän normaalin toimintakyvyn edellyttämässä rajoissa ja toinen taajuuden palauttamiseen liittyvä tehtävä. Osa reserveista on jaettu vielä sen mukaan, käytetäänkö niitä taajuuden laskemiseen eli alassäätöön vai nostamiseen eli ylössäätöön<sup>15</sup>.

Taajuuden ylläpitoa varten on kaksi eri reserviä: taajuusohjattu käyttöreservi (*Frequency Containment Reserve for Normal operation, FCR-N*) ja taajuusohjattu häiriöreservi (*Frequency Containment Reserve for Disturbances, FCR-D*). Käyttöreservillä pyritään pitämään sähköjärjestelmän taajuus lähellä 50 Hz normaalitilaa. Mikäli sähköjärjestelmän taajuus kuitenkin poikkeaa ennalta säädettyjen rajojen (49,9–50,1 Hz) ulkopuolelle, aktivoidaan kapasiteettia myös häiriöreservistä.

Taajuusohjatut käyttö- ja häiriöreservit pyritään mitoittamaan sekä kapasiteetin että teknisten ominaisuuksiensa puolesta niin, että niitä on käytettävissä aina riittävästi. Koko sähköverkon laajuisen sähkökatkon välttämiseksi järjestelmävastaavalla on käytössään pakottavampia, tarvittaessa automaattisesti aktivoituvia keinoja, käytännössä kulutuksen tai tuotannon pakotettua irtikytkemistä, mikäli reservit eivät riitä taajuuden hallintaan. Näiden tilanteiden välttämiseksi järjestelmävastaava voi harkintansa mukai-

<sup>14</sup> Komission asetus (EU) 2017/2195 sähköjärjestelmän tasehallintaa koskevista suuntaviivoista.

<sup>15</sup> Lähde: Fingrid Oyj.

sesti hankkia myös ajoittain hyvin nopeasti reagoimaan kykenevää nopeaa taajuusreserviä (*Fast Frequency Response, FFR*). Tarvittavaan reservien kokoon vaikuttaa koko sähköjärjestelmän tila.

Järjestelmän epätasapainon korjaamiseksi aktivoidut nopeat reservit palautetaan takaisin käyttövalmiuteen seuraavia shokkeja varten mahdollisimman nopeasti käyttämällä taajuudenpalautusreservejä, joita on kahta tyyppiä: automaattinen (*automatic Frequency Restoration Reserve, aFRR*) ja manuaalinen (*manual Frequency Restoration Reserve, mFRR*). Jälkimmäinen reserviin hankintaan Fingrid Oyj ylläpitää yhdessä muiden pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden kanssa nk. säätösähkömarkkinaa.

## 2.3 Kysynnän ja tarjonnan tasapainotus

### 2.3.1 Tuotantoteknologiat

#### 2.3.1.1 Lämpövoima

Lämpövoimalla tarkoitetaan teknologioita, jossa sähköntuotanto perustuu polttoaineiden käytön tuottaman lämpöenergian muuntamiseen sähköksi höyry- tai kaasuturbiinilla tai kaasumootorilla. Lämmöntuotanto voi perustua fossiilisten polttoaineiden tai biopolttoaineiden polttamiseen tai ydinvoimaloissa ydinreaktioon.

Käynnissä oleva lämpövoimala tuottaa sähköä generaattorilla, jonka pyörimisnopeus on synkronoitu vaihtovirtajärjestelmän taajuuden mukaisesti sähköverkkoon. Tämä pyörimisliikkeeseen varastoitunut liike-energia on sähköjärjestelmään pääasiallinen inertian lähde. Perinteisten lämpövoimaloiden alasarjo onkin syynä lisääntyneeseen tarpeeseen turvautua markkinan ulkopuolisiin reserveihin (ks. FFR yllä).<sup>16</sup>

Lämpövoimaloiden tekniset ominaisuudet määrittävät voimalaitoksen tuotantomahdollisuuksia: miten nopeasti voimala voidaan käynnistää ja ajaa alas sekä miten joustavasti voimalaitosta voidaan käyttää osittaisella tuotantoteholla. Kaasu- ja nestemäisiä polttoaineita voidaan polttaa suuressa mittakaavassa kaasuturbiinissa tai hieman pienemmissä yksiköissä kaasumootorissa. Kiinteitä polttoaineita poltetaan höyrykattilassa, joiden höyry pyörittää höyryturbiinia. Yleisesti kaasuvoimaloiden säätökyky on parempi kuin kiinteitä polttoaineita käyttävien voimalaitosten. Suomessa kaasuvoimaloita on kaupallisessa käytössä ollut lähinnä yhteistuotannon yhteydessä.

<sup>16</sup> ENTSO-E, Fast Frequency Reserve – Solution to the Nordic inertia challenge, 13.12.2019.

Ydinvoimaloiden säätömahdollisuuksiin vaikuttaa puhtaasti teknisten kyvykkyyksien lisäksi tarve varmistaa ydinturvallisuus kaikissa käyttöolosuhteissa. Ydinvoimalla on aiemmin tuotettu sähköä tasaisesti huoltoseisokkien ja käyttökatkojen ulkopuolisena aikana. Pitkäkestoissa alhaisten hintojen tilanteissa ydinvoimaloiden tuotantoa on kuitenkin voitu rajoittaa<sup>17</sup> ja ydinvoima osallistuu nykyään myös reserveihin<sup>18</sup>.

### 2.3.1.2 Vesivoima

Vesivoiman tuotanto perustuu virtaavan veden liike-energian muuttamiseen sähköksi vesiturbiinilla. Osa vesivoimaloista on rakennettu padon yhteyteen siten, että vesivoiman tuotantoa voidaan säädellä veden virtausta muuttamalla. Vesivoiman tuotantoa voidaan tyypillisesti muuttaa lämpövoimaloita nopeammin.<sup>19</sup>

Vesivoiman tuotantomahdollisuuksia rajoittavat voimalan tekniset ominaisuudet ja voimalalle asetetut sääntelyrajoitteet. Vesivoimalan tuotantotehoa voidaan teknisesti säätää varsin vapaasti nollan ja maksimituotantokapasiteetin välillä. Vesiturbiinin hyötysuhde kuitenkin heikkenee alemmilla virtaamilla ja aiheuttaa kustannuksia säädöstä.

Vesivoiman säätäminen veden virtausta muuttamalla vaikuttaa suoraan vesivoimalan alapuolisiin virtaamiin. Jokien patoaminen itsessään heikentää virtavesiekosysteemin toiminnan katkaisemalla eliöiden kulkemisen ylä- ja alavirtaan ja aineksen kulkeutumisen alavirtaan. Näiden ekologisten vaikutusten lieventämiseksi vesivoimaloilta voidaan lupaehdoissa edellyttää toimenpiteitä, kuten minimi- tai ympäristövirtaamia ja kalateitä. Nämä rajoittavat vesivoimaloiden kykyä säätää tuotantoaan.

### 2.3.1.3 Tuulivoima

Tuulivoimala muuntaa tuulen liike-energian tuuliturbiinin pyörimisenergiaksi ja edelleen generaattorin kautta sähköenergiaksi. Tuulivoimaloilla on teknisesti hyvät edellytykset muuttaa tuotantomääriä nopeasti tuuliolosuhteiden mahdollistamissa rajoissa<sup>20</sup>. Koska tuulivoimalat on useimmiten kytketty sähköverkkoon taajuusmuuttajan välityksellä, ei tuuliturbiinin pyörimisen liike-energia tuota inertiaa sähköjärjestelmän tarpeisiin<sup>21</sup>.

<sup>17</sup> Esim. Yle uutinen. Sähkö on liian halpaa: Upouusi Olkiluoto 3 jouduttiin laittamaan säästöliekille, 17.5.2023. <https://yle.fi/a/74-20032308>.

<sup>18</sup> Fingrid Oyj, lehdistötiedote, Ydinvoima mukaan reservimarkkinoille, 16.12.2022. <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2022/ydinvoima-mukaan-reservimarkkinoille/>

<sup>19</sup> Teknologioiden ominaispiirteistä, ks. esim. de Souza et al. (1984).

<sup>20</sup> Fingrid Oyj, Tuulivoiman osallistuminen reservimarkkinoille, esittelymateriaali, syksy 2022: ”Teknisesti tuulivoiman säätöominaisuudet ovat hyvät, jopa sekuntitason vaste on mahdollinen.”

<sup>21</sup> Tuulivoimaloiden lisääntymisen säätötarvetta ja sen yhteyttä FFR reserviin ja nk. synteettiseen inertiaan tutkitaan aktiivisesti, esim. Eriksson et al. (2016).

#### 2.3.1.4 Kysyntäjousto

Kysynnän ja tarjonnan tasapainon muuttuessa tarvittava tasapainotus voi tuotannon lisäksi tulla myös kulutuksen tasoa muuttamalla. Sähkömarkkinalla tätä kutsutaan kysyntäjoustoksi. Kysyntäjousto toteutuu useimmiten markkinahintoihin tai järjestelmä-vastaavan erillisiin tilauksiin perustuen.

Teknisesti kysyntäjousto toteutetaan muuttamalla sähkön kulutusta suunnitellusta kulutuksesta joko manuaalisesti tai automaattisesti. Teoriassa kaikki sähkökulutus voi osallistua kysyntäjoustoön. Taloudellisesti kysyntäjouston käytöstä saatavaa hyötyä verrataan sähkön käytön arvoon kulutuskohteessa. Kotitalouksien kokoluokassa kulutuspi- teessä käytetyn sähkön määrä on pieni verrattuna teolliseen käyttöön. Voidaankin aja- tella, että pienissä kulutusyksiköissä kysyntäjouston tehokas toteutus edellyttää tuot- teistettavaa ja automatisoitua palvelua, nk. aggregointia, kun taas teollisen mittaluokan yksiköitä voidaan käyttää suoraan suurten tuotantolaitoksien tapaan eri markkinapai- koilla.

Kysyntä voi joustaa myös ylöspäin, esimerkiksi kaukolämmöntuotannossa voidaan edullisella sähköllä korvata muuta lämmöntuotantoa kaukolämpöverkoston teknisten ominaisuuksien sallimissa rajoissa.

#### 2.3.1.5 Sähkövarastot

Monilla hyödykemarkkinoilla varastot ovat tavanomainen tapa tasata kysynnän ja tar- jonnan vaihtelua. Sähkön laajamittainen kausivarastoinnin lisääminen vastaavalla ta- valla olisi teknisesti haastavaa ja kallista käytössä olevilla teknologioilla. Teknologi- sessä kehityksessä pääpaino on ollut akkujen kehittämisellä. Akkujen käyttöön perus- tuvat varastoteknologiat ovat kustannustehokkaita nykyään pääasiassa lyhyen aikavä- lin tasapainotuksessa. Akkuihin perustuvat sähkönvarastointiteknologiat kehittyvät kui- tenkin nopeasti ja niiden käyttöalueet ovat laajentumassa.<sup>22</sup>

Sähköä voidaan varastoida epäsuorasti tavanomaisilla vesivoimateknologioilla käyt- täen hyödyksi yläjuoksulla olevan veden potentiaalienergiaa. Pumppuvesivoimalat ovat maailmalla koeteltua teknologiaa ja niitä voidaan soveltaa erilaisissa kohteissa. Suo- messa pumppuvesivoimaloita ei ole kaupallisesti otettu käyttöön, vaikka erilaisia suun- nitelmia onkin esitetty.

---

<sup>22</sup> Esim. Lund et al. (2015).

Sähkövaraston lataaminen kuluttaa sähköä ja varaston purkaminen sähköverkkoon rinnastuu sähkön tuotantoon. Latauksen ja purkamisen aikana menetetään osa energiasta häviönä, joten hyötysuhde ei ole 100-prosenttinen. Sähkövarastolla voidaan tasapainottaa sähköjärjestelmää molempiin suuntiin sähkövaraston kapasiteetin puitteissa.

### 2.3.1.6 Rajasiirrot

Tässä selvityksessä tarkastellaan vaikutuksia Suomen sähköjärjestelmän kannalta. Rajasiirtoyhteyksien kautta Suomen sähköjärjestelmä on kytkeytyneenä Norjaan, Ruotsiin ja Viroon sekä aiemmin Venäjään. Osa Suomen kulutuksen ja tuotannon välisestä tasapainotuksesta tapahtuukin naapurimaissamme. Yhteinen sähköjärjestelmä ja markkinarakenteet tarkoittavat myös, että muutokset Suomessa vaikuttavat naapureihimme ja muutokset naapurimaissa voivat vaikuttaa meidän tilanteeseemme, vaikka Suomessa ei tehtäisikään muutoksia. Rajasiirtoyhteyksillä on merkitystä niin tukku- kuin reservimarkkinoiden osalta.

Sähköjärjestelmän teknisen toiminnan kannalta rajasiirtoyhteyksien välillä on eroja vaihtosähkön synkronialueiden perusteella. Suomi kuuluu samaan synkronialueeseen Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan kanssa, kun taas Länsi-Tanska ja Viro kuuluvat eri alueeseen. Nopean säätövoiman ja inertian kannalta erityisesti Pohjois-Ruotsin vaihtosähköyhteys (1500 MW) on Suomen kannalta merkityksellinen. Keski-Ruotsin (1200 MW) ja Viron (1016 MW) tasasähköyhteyksien kautta voidaan hyödyntää hitaampia taajuudenpalautusreservejä (aFRR ja mFRR). Pohjois-Norjan (n. 100 MW) yhteyden merkitys on ollut vähäisempi.<sup>23</sup>

## 2.3.2 Teknologioiden soveltuvuus eri käyttöihin

Kaikkia edellä kuvattuja teknologioita voidaan käyttää sähkön spot-markkinalla ja päivän sisäisillä markkinoilla. Eri reserveillä on teknisten käyttötarkoituksiensa vuoksi erilaisia teknisiä laatuvaatimuksia säätövoimaa tarjoaville teknologioille. Näiden teknisten ominaisuuksien tai reservien yksityiskohtien läheisempi tarkastelu ei ole tämän selvityksen piirissä. Taulukossa 1 esitetään Suomen järjestelmävastaava Fingrid Oyj:n esittämä arvio yllä kuvattujen teknologioiden soveltuvuudesta nykyisille reservimarkkinoille. Vesivoima soveltuu ominaisuuksiensa puolesta kaikkiin reservilajeihin nopeaa taajuusreserviä (FFR) lukuun ottamatta.

Vesivoiman tuotantomahdollisuuksien muutosten kannalta merkillepantavaa on, että teknisesti vesivoima on korvattavissa kaikissa eri reserveissä. Mikäli tuotantoa on lii-

---

<sup>23</sup> Lähde: Fingrid Oyj.

kaa, tarvitaan alassäätöä, jota on saatavilla tuulivoimasta tai ydinvoimasta. Mikäli tuotantoa on liian vähän, tarvitaan ylössäätöä, jota on saatavilla kysyntäjoukon kautta. Myös sähkövarastot voivat korvata vesivoimaa ainakin lyhyen aikajänteen säädössä (FCR-N ja FCR-D).

**Taulukko 1.** Teknologioiden soveltuvuus eri reserveihin.

	Teollinen kulutus	Pien- kulutus	Sähkö- varastot	Lämpö- voima	Vesi- voima	Tuuli- voima
FFR	X	X	X			X
FCR-N	X	X	X	X	X	
FCR-D		X	X		X	X
	alassäätö					
	ylössäätö	X	X		X	
aFRR				X	X	X
	alassäätö					
	ylössäätö	X		X	X	
mFRR				X	X	X
	alassäätö					
	ylössäätö	X		X	X	

Fingrid Oyj:n asiantuntijoiden arvio eri teknologioiden soveltuvuudesta reservituotteisiin (lähde: Fingrid Oyj, esitys työpajassa 31.10.2023).

## 2.4 Taloudellinen tehokkuus

### 2.4.1 Ideaalimalli

Sähkömarkkinoiden nykyisten rakenteiden taustalla on ollut tavoite lisätä sähköjärjestelmän taloudellista tehokkuutta. Sähkön tukkumarkkinoilla voidaan ajatella olevan kaksi keskeistä tehtävää:

1. Tuotannon ja kulutuksen tasapainotus lyhyellä aikavälillä markkinahintojen kautta.
2. Markkinahintojen antama signaali tuotannon ja kysynnän kannattavuudelle ja tätä kautta poistumalle, investoinneille sekä uusille innovaatioille.

Kuten edellä on kuvattu, tuotannon ja kulutuksen tasapainotus tapahtuu sähkön vuorokausimarkkinalla yhteisen algoritmin kautta. Mikäli oletetaan, että vuorokausimarkkinalle annetut tarjoukset ovat kilpailullisia<sup>24</sup>, on tarjouksien perusteella laskettu lyhyen aikavälin markkinatasapaino yhteiskunnan kannalta taloudellisesti tehokas.<sup>25</sup> Tämä tarkoittaa, että sähkön vuorokausimarkkinahinnat antaisivat myös oikean signaalin pitkän aikavälin muutoksille, jossa tasapainotus toteutuu kapasiteettirakenteiden muutosten kautta.

Haasteet kilpailun riittäväälle toteutumiselle ovat suurempia vesivoiman osalta. Vesivoimatuottajan tuotantopäätös nyt tarkoittaa menetettyä tuotantopäätöstä myöhemmin ja vesivoiman tarjoushinnat kuvastavat tätä vaihtoehtoiskustannusta. Teoriassa sähkömarkkinan kautta koordinoitujen vesivoiman tuotantopäätökset voivat edelleen olla tehokkaita, mutta tämä edellyttää, että toimijat jakavat samat näkemykset kaikkien toimijoiden tuotantosunnitelmista, hinnoista ja hintaodotuksista<sup>26</sup>.

Edellä kuvattu sähkömarkkinoiden ideaalimalli on yksinkertaistus, joka ei ota huomioon sähkömarkkinan erityispiirteitä tai markkinatoimijoiden käyttäytymistä. Keskeisiä huolenaiheita ovat markkinoiden ja sähköjärjestelmän resilienssi ulkoisia tapahtumia vasten, mahdollisuus markkinavoiman käyttöön sekä tarve säännellä monopoliasemassa olevaa järjestelmävastaavaa.<sup>27</sup>

## 2.4.2 Resilienssi

Sähkön markkinahinnat heijastelevat niukkuutta tai runsautta sähköstä ja ohjaavat markkinatoimijoiden tekemiä päätöksiä lyhyellä ja pitkällä aikavälillä. Lyhyellä aikavälillä päätökset tehdään olemassa olevan kapasiteetin puitteissa ja pitkällä aikavälillä investoinnit perustuen odotuksiin tulevasta. Sähköjärjestelmän toimivuuden kannalta suurimmat huolenaiheet liittyvät liian vähäiseen sähköntuotantokapasiteettiin.

Lyhyellä aikavälillä kapasiteetin käyttöön liittyy kysymyksiä toimijoiden kyvystä ja halusta allokoida tuotantoaan koko järjestelmän kannalta optimaalisesti. Esimerkiksi harkittaessa yksittäisen tuotantoresurssin tarjoamista spot-markkinalle, tulee markkinatoimijan kyetä ottamaan huomioon tuottomahdollisuudet spot-markkinan jälkeisillä markkinapaikoilla ja kaikissa eri reservimekanismeissa.

<sup>24</sup> Ts. kukaan toimijoista ei pyri omilla tarjouksillaan vaikuttamaan markkinahintoihin.

<sup>25</sup> Markkinamallin kehitystyöstä, ks. esim. Bohn, Caramanis ja Schweppe (1984).

<sup>26</sup> Esim. Kreps (2013).

<sup>27</sup> Wilson (2002) esittää perusargumentit selkeästi.

Yhteiskunnan näkökulmasta riittävän sähköntuotantokapasiteetin ylläpitäminen ei ole yhdenkään yksittäisen markkinatoimijan vastuulla, teoriassa tai käytännössä. Markkinatoimijan investointipäätökset pohjautuvat odotettuihin tuottoihin, jotka määräytyvät sähkön markkinahintojen perusteella. Markkinatoimijoille niukkuus on edellytys investoinneille, mutta liika niukkuus tekee sähköjärjestelmästä haavoittuvamman.

### 2.4.3 Markkinavoima

Yhtenä tavoitteena sähkömarkkinoiden muodostamiselle on ajatus toiminnan tehostumisesta kilpailun kautta. Mikäli markkinoilla on riittävästi tuottajia, saa näiden välinen kilpailu aikaan hintojen asettumisen siten, että sähköntuotantokapasiteetti on tehokkaassa käytössä.<sup>28</sup> Markkinoiden toimintaan voidaankin yleensä luottaa, mikäli markkinoilla on riittävästi kilpailua. Kilpailulla markkinalla yksittäinen tuottaja ei voi omilla toimillaan nostaa hintoja yli kustannustason, koska tällöin kilpailija voisi myydä halvemmalla.

Mikäli kilpailu markkinoilla on vähäistä ja tuotanto on keskittynyt muutamille isoille toimijoille, voivat nämä hyötyä markkinavoimastaan esimerkiksi pidättämällä tuotantoa, mikä nostaa hintoja toimijan muulle tuotannolle. Markkinavoima tarkoittaa, että yksittäiset suuret toimijat voivat toiminnallaan vaikuttaa markkinahintoihin itselleen edullisella tavalla.

EU:n sähkömarkkinamallissa toimijoille on jätetty mahdollisuus hyötyä markkinavoimasta vaiheittaisten markkinamekanismien kautta. Suuri sähköntuottaja voi sitoa ylisuuren osan tuotantokapasiteetistaan reservimarkkinoille, mikä vähentää sähkön tarjontaa spot-markkinalla ja nostaa markkinahintoja. Tämän seurauksena sähköntuottajan kokonaistuotot markkinoilta nousevat, mutta taloudellinen tehokkuus kärsii tuotannon väärän allokaation vuoksi ja kuluttajat kärsivät liian korkeiden hintojen kautta. Sähkömarkkinat ovat poikkeuksellisen alttiita markkinavoiman käytölle keskittyneen tuotantorakenteen ja kulutuksen vähäisen hintajoustavuuden vuoksi ja Euroopassa ja maailmalla on tutkimuksissa löydetty lukuisia esimerkkejä markkinavoiman vaikutuksista hintatasoihin<sup>29</sup>.

---

<sup>28</sup> Esim. Borenstein ja Bushnell (2015); Cicala (2023).

<sup>29</sup> Esim. Ito ja Reguant (2016, Espanja), Graf ja Wolak (2022, Italia), Lundin ja Tangerås (2020, Pohjoismaat) ja Yhdysvalloissa, esim. Borenstein, Bushnell ja Wolak (2002), Puller (2007), Joskow (2008).

Markkinavoiman käyttöä on tutkittu myös vesivoiman ja sähkövarastojen osalta. Vesi-voiman käytössä teoreettiset mahdollisuudet markkinavoiman käyttöön ymmärretään hyvin<sup>30</sup>, mutta empiiriset tutkimukset ovat olleet rajoittuneita dynaamisen käyttäytymisen mallintamisen haasteellisuuden ja dataan liittyvien kysymysten vuoksi<sup>31</sup>. Sähkövarastoissa markkinavoima vääristää sekä sähkövarastojen käyttöä markkinoilla että niihin tehtäviä investointeja. Erityisen pulmallisia voivat olla tilanteet, jossa samalla toimijalla on markkinavoimaa sekä sähköntuotannossa että varastoinnissa.<sup>32</sup>

## 2.4.4 Monopolitoiminnan sääntely

Järjestelmävastaavalla kantaverkonhaltijalla on luonnollinen monopoliasema: viimekätinen vastuu sähköjärjestelmän tasapainotuksesta on tarkoituksenmukaista jättää yhden toimijan tehtäväksi. Koska monopoli ei kohtaa kilpailun tuomia paineita, on vaarana korkeat hinnat ja heikko laatutaso. Monopoliasemaan nimetyn järjestelmävastaavan toimintaa säännelläänkin laajamittaisesti.

Tämän selvityksen kannalta merkityksellisin järjestelmävastaavan tehtävistä on reservien hankkiminen sähköjärjestelmän toimivuuden turvaamiseksi. Reservien hankkimisesta aiheutuu kustannuksia, mutta nämä kustannukset jaetaan sähkön käyttäjien kesken. Yhteiskunnan ja järjestelmävastaavan kannustimien yhteensovittaminen on tässä tilanteessa ongelmallista. Mikäli reservejä ei ole hankittu riittävästi, kohdistuu vastuu puutteellisesta toiminnasta järjestelmävastaavaan. Mikäli taas reservejä hankitaan tarvetta enemmän, vähentää se kapasiteetin tarjontaa markkinoille ja nostaa hintoja.<sup>33</sup>

## 2.5 Sähkömarkkinakehitys vuosina 2015–2023

### 2.5.1 Tuotanto

Suomen sähkömarkkinan tuotantorakenne on vuosien 2015–2023 välisenä aikana muuttunut selvästi kohti päästöttömiä tuotantotapoja. Muutokset tarjoavat mahdollisuuden arvioida vesivoiman roolia nykytilassa ja kehityskulun jatkuessa myös tulevaisuudessa.

<sup>30</sup> Esim. Ambec ja Doucet (2003) sekä Mathiesen, Skaar ja Sørgard (2013).

<sup>31</sup> Esim. Borenstein, Bushnell ja Wolak (2002), Bushnell (2003), Kauppi ja Liski (2008), Lundin ja Tangerås (2020).

<sup>32</sup> Esim. Sioshansi (2011) sekä Andrés-Cerezo ja Fabra (2023).

<sup>33</sup> Joskow ja Tirole (2007).

Tuulivoiman tuotantokapasiteetti Suomessa on kasvanut alle 1 000 MW:ista vuonna 2015 lähes 7 000 MW:iin vuoden 2023 lopussa. Tuulivoiman toteutunut tuotanto on kasvanut likimain samassa suhteessa 1,7 TWh:sta vuonna 2015 14,0 TWh:iin vuonna 2023, mutta vaihtelu eri aikaväleillä on suurta, ks. kuvio 2, paneeli (a). Tuulivoiman vuotuinen keskituotanto on vaihdellut välillä 27,7%–37,7% asennetusta maksimikapasiteetista. Suhteessa asennettuun kapasiteettiin, tuulivoiman tuotanto on suurempaa talvella (loka–maaliskuu) kuin kesällä (huhti–syyskuu), joskin kuukausikeskiarvojen vaihtelu on suurta eritoten kevättalvella. Vuorokauden sisällä tuulivoima tuulivoiman tuotanto on vähäisempää päiväsaikaan.

Aurinkovoiman arvioitu tuotantokapasiteetti oli Suomessa vuoden 2023 loppupuolella hieman yli 1 000 MW. Arvioitu tuotantokapasiteetti on moninkertaistunut vuoden 2017 alusta, ks. kuvio 2, paneeli (b). Nopeasta kasvusta huolimatta aurinkovoiman tuotanto on ollut vuonna 2023 alle 5 prosenttia tuulivoiman tuotannosta.

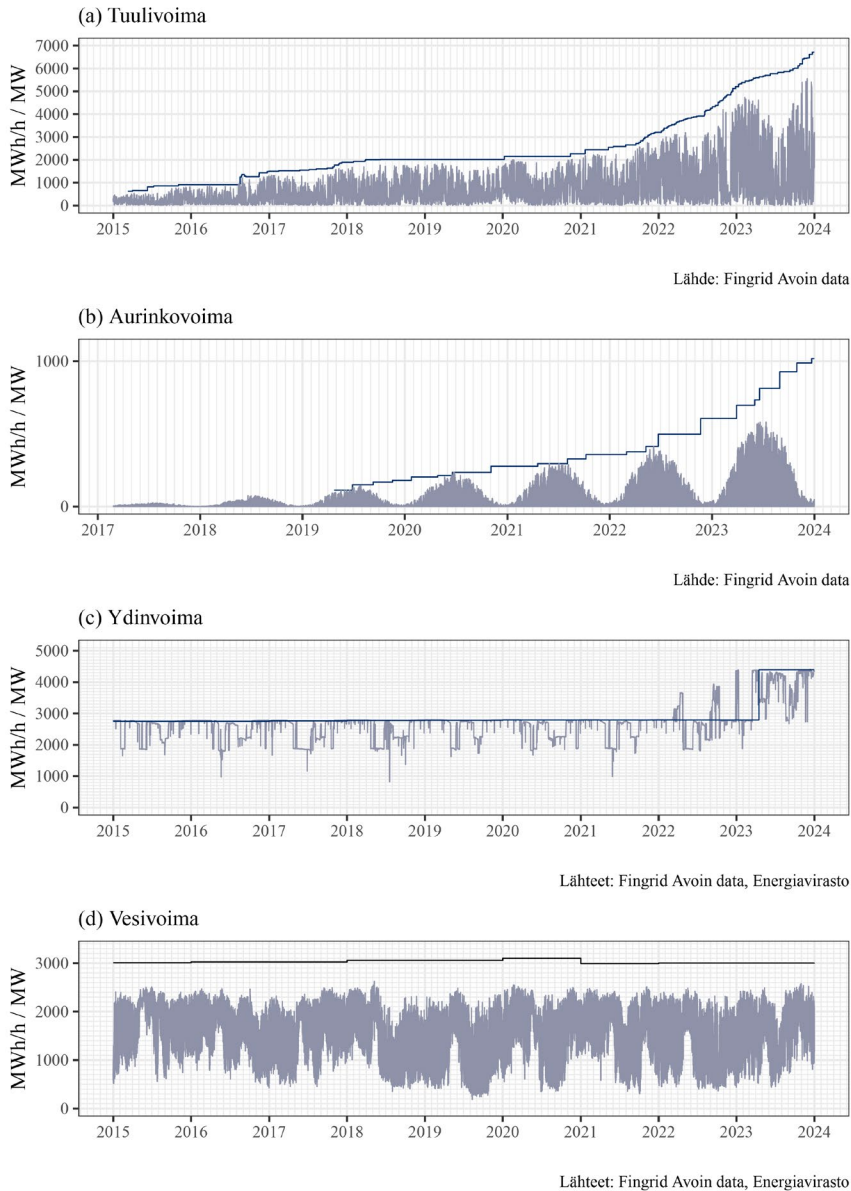
Ydinvoiman tuotanto on Suomessa ollut suhteellisen vakaata viime vuosina lukuun ottamatta Olkiluoto 3:n valmistumisen myötä kasvanutta tuotantokapasiteettia, ks. kuvio 2, paneeli (c).<sup>34</sup> Olkiluoto 3:n myötä ydinvoiman vuosituotanto on kasvanut vuosien 2015–2021 vaihteluvälistä 19,5–22,8 TWh 32,8 TWh:iin vuonna 2023. Ydinvoiman vuosituotanto on ollut Suomessa varsin tasaista, 88,9%–93,7% maksimituotannosta vuosina 2015–2023.

Vesivoiman vuosituotanto on vaihdellut muita päästöttömiä tuotantomuotoja enemmän, ks. kuvio 2, paneeli (d). Vesivoiman vuosituotanto on ollut 42,7%–58,9% maksimituotantokapasiteetista vuosina 2015–2023. Tuotannon voimakasta vaihtelua ajaa mm. vaihtelu sadannassa. Vesivoiman tuotantokapasiteetti on sen sijaan Energiaviraston Voimalaitosrekisterin tietojen mukaan pysynyt vakaana.

---

<sup>34</sup> Olkiluoto 3:n sähköntuotannolla on jatkossa vaikutuksia Pohjois-Ruotsin ja Suomen väliseen sähkönsiirtokapasiteettiin. Mikäli Olkiluoto 3 tuottaa sähköä täydellä teholla (n. 1 600 MW), siirtokapasiteetti Pohjois-Ruotsista Suomeen on normaalissa käyttötilanteessa 1200 MW. Jos Olkiluoto 3 ei jostain syystä tuota sähköä kantaverkkoon tai sen sähköntuotanto on alle 1 000 MW, siirtokapasiteetti Pohjois-Ruotsista Suomeen nostetaan käyttötilanteen sen salliessa 1 500 MW:iin. Lähde: Fingrid Oyj, ”Olkiluoto 3 ja sähkömarkkinat”, verkkosivusto, viitattu 14.8.2023.

**Kuvio 2.** Tuulivoiman (a) aurinkovoiman (b), ydinvoiman (c) ja vesivoiman (d) toteutunut tunneittainen tuotanto (MWh/h) ja asennettu tuotantokapasiteetti (MW) vuosina 2015–2023.

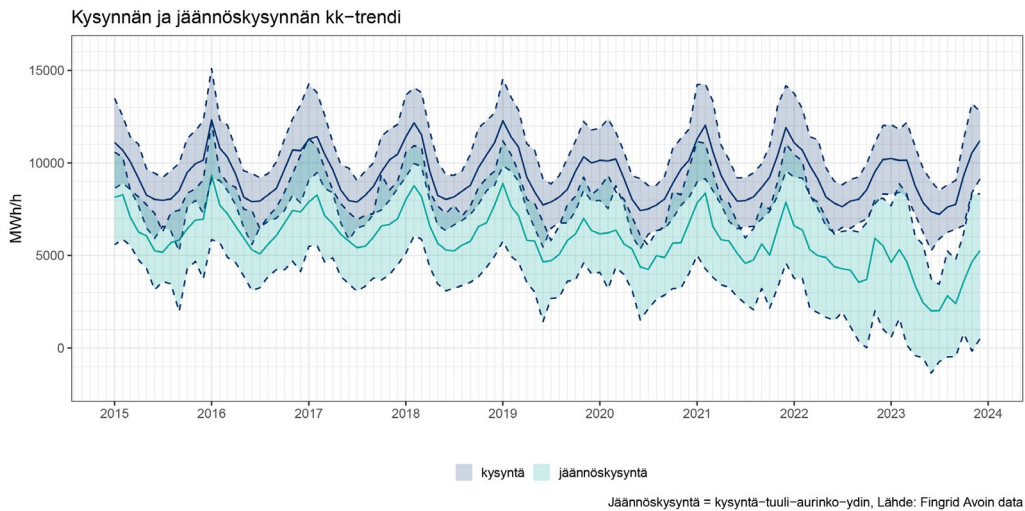


## 2.5.2 Kysyntä ja jäännöskysyntä

Sähkönkulutus Suomessa on vuodesta 2015 vuoden 2023 alkuun ulottuvalla tarkastelujaksolla pysytellyt samalla tasolla, ks. kuvio 3. Sähkön kysyntää määrittää Suomessa eritoten teollinen kysyntä ja sähkölämmitys. Teollinen kysyntä on ollut suhteellisen tasaista, mutta alenee jakson loppupuolella; teollinen kysyntä oli 15 % alhaisempi

vuonna 2023 kuin vuosien 2015–2021 keskiarvo<sup>35</sup>. Sähköä kulutetaan talvella enemmän kuin kesällä, erityisesti sähkölämmityksen vuoksi. Lämpötilat ja lämmityksen tarve vaihtelevat vuosien välillä. Esimerkiksi kylmänä tammikuuna 2016 sähkönkulutus nousi Suomessa toistaiseksi korkeimpaan lukemaansa (15 105 MWh/h, 7.1.2016 klo 17–18), mutta lämpimänä talvena 2019–2020 sähkönkulutus ei ylittänyt 12 500 MWh/h:ia.

**Kuvio 3.** Toteutunut sähkön kysyntä sekä jäännöskysyntä Suomessa vuosina 2015–2023. Kuvaa-  
jan arvot on laskettu tuntitiedoista: kuukauden keskiarvot (viivat) ja kuukauden pienimmän  
ja suurimman arvon vaihteluväli (varjostetut alueet). Yksikkönä MWh/h.



Yksi tapa mitata tarvetta sähköjärjestelmän säätökyvyille on ollut nk. jäännöskysynnän tarkastelu. Jäännöskysynnällä tarkoitetaan sähkön kysyntää vähennettynä sellaisilla tuotantomuodoilla, joiden tuotantomäärä määrittyy ulkoisten tekijöiden vaikutuksesta. Esimerkiksi tuulivoiman tuotantomahdollisuudet riippuvat tuulen määrästä, eivätkä suoraan sähkön kysynnästä. Jäännöskysyntää on ajateltu mittariksi siitä, kuinka paljon sähköjärjestelmässä on tarvetta tuotannolle, jonka määrää voidaan säätää markkinatilanteen mukaan.

Kuviossa 3 esitetään jäännöskysynnän kehitys Suomessa. Siinä toteutuneesta sähkön kulutuksesta on vähennetty sähköntuotanto aurinko-, tuuli- ja ydinvoimalla. Keskimääräinen jäännöskysyntä vuodessa on vähentynyt noin 6 500 MW:ista vuosina 2015–2018 noin 3500 MW:iin vuonna 2023 tuulivoiman ja ydinvoiman lisääntymisen sekä kysynnän vähentymisen myötä. Jäännöskysyntä on vuosien 2022–2023 aikana ollut enimmillään 10 467 MW, joka on samaa suuruusluokkaa kuin jäännöskysynnän korkein arvo vuosina 2015–2018.

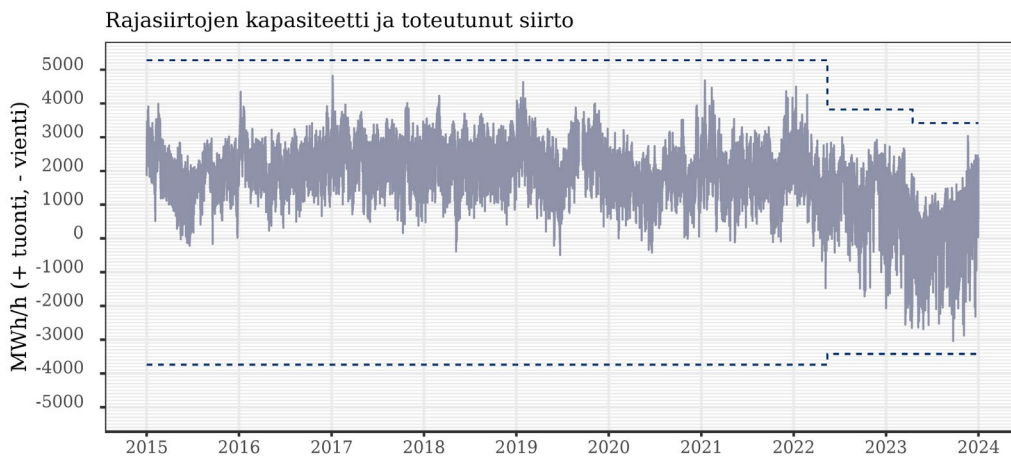
<sup>35</sup> Lähde: Tilastokeskus, Sähkön kulutus sektoreittain, ennakkotieto, viitattu 21.11.2023.

Jäännöskysynnän käyttö sähkömarkkinoiden analyysissä on perustunut oletukseen, että sähkönkulutus ja siitä vähennettävä tuotanto eivät reagoi markkinatilanteeseen ja erityisesti markkinahintoihin. Jos kuitenkin sähkön kulutus muuttuu sähkön markkinahinnan mukaan, niin osa markkinan tasapainottamiseen tarvittavasta säätökyvystä tulee tällöin kysynnän kautta. Samaten mikäli aurinko-, tuuli- tai ydinvoiman tuotanto muuttuu sähkön markkinahinnan mukaan, niin myös ne osallistuvat markkinan tasapainottamiseen. Jäännöskysyntä ei täten enää ole yksikäsitteisesti tulkittavissa. Esimerkkejä tästä ovat vuoden 2022 jälkipuoliskon energiakriisi, jolloin kysyntä on ollut aiempia vuosia alhaisempi ja vuoden 2023 tilanteet, jolloin jäännöskysyntä on ollut hyvin alhainen, jopa negatiivinen.

### 2.5.3 Rajasiirrot

Kotimaisen kulutuksen ja tuotannon välinen tasapainotus tapahtuu osin rajasiirtojen kautta. Kuviossa 4 esitetään sähkön nettosiirto Suomeen sekä siirtoyhteyksien fyysiset rajoitukset. Fyysisten siirtorajoitusten osalta pysyväluonteisista muutoksista suurin on Venäjän kaupankäynnin loppuminen toukokuussa 2022. Lisäksi Olkiluoto 3:n valmistuksen seurauksena osa Pohjois-Ruotsin rajasiirtokapasiteetista varataan Olkiluoto 3:n vikatilanteiden hallintaa varten, mikä vähentää tuontikapasiteettia 300 MW:n verran.

**Kuvio 4.** Kuviossa esitetään rajasiirtoyhteyksien fyysinen kapasiteetti sekä tuntitason toteutunut sähkön kokonaistuonti (+) ja -vientä (+).



Lähde: Fingrid Avoin data

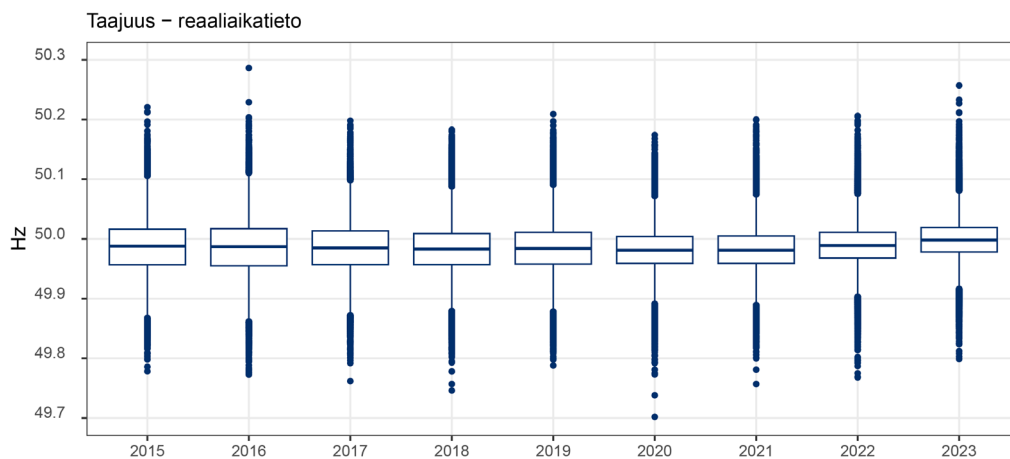
Kuviossa 4 on vuoden 2022 jälkeen nähtävissä kotimaisen sähköntuotannon lisääntymisen vaikutus, kun taas kotimainen sähkönkulutus ei ole lisääntynyt vastaavasti. Vaikka yksittäisten rajasiirtoyhteyksien osalta siirtokapasiteetti rajoittaa siirtoa hinta-alueelta toiselle näyttää tilanne siirtyneen lähes jatkuvasta nettotuonnista vuosina 2015–2021 vaihteluun nettotuonnin ja -viennin välillä.

On tärkeää huomata, että kuvio 4 esittää Suomen ja kaikkien sen naapurimaiden välisen nettosiirron sähkömarkkina-alueella. Siitä ei voida havainnoida yksittäisten siirtolinjojen tuntikohtaisia siirtoja tai Suomen ja yksittäisen naapurimaan välisiä siirtoja erikseen. Kuvio 4. tarjoaa yleiskuvan sähkön nettovaihdosta, mutta siitä ei voida tehdä tarkkoja johtopäätöksiä maakohtaisista tai reaaliaikaisista siirroista.

## 2.5.4 Sähkön laatu

Lisääntyneen tuulivoimatuotannon vaikutuksia sähköjärjestelmään voidaan tarkastella erilaisten mittareiden kautta. Sähkön laadun kannalta keskeinen mittari on sähköjärjestelmän taajuus, ks. kuvio 5. Sähkön laadussa ei näytä tapahtuneen merkittäviä muutoksia vuosien 2015–2023 välisenä aikana.

**Kuvio 5.** Kuvassa esitetään kunkin vuoden sähköjärjestelmän taajuuden tyypillisiä arvoja (laatikot) ja ääriarvoja (viikset) 3 minuutin datasta luettuna.



Lähde: Fingrid Avoin data

Myöskään muilla mittareilla tarkasteluna sähkön laatu ei näytä ainakaan heikentyneen, esimerkiksi sähkön taajuudesta mitattu aikapoikkeama on jopa pienentynyt vuosien 2015–2023 välisenä aikana.

### 3 Virtaamasäännöstelyn ekologiset vaikutukset virtavesissä

Vesivoiman tuotanto aiheuttaa muutoksia joen virtaamassa ja sen dynamiikassa. Vesivoiman optimaalinen tuotanto ja sähköjärjestelmän tasapainottaminen vaativat veden varastointia ja käytön säännöstelyä, minkä vuoksi rakennettujen jokien virtaamaprofiili on tyypillisesti hyvin erilainen säännöstelemättömiin jokiin nähden. Jokien koski- ja virta-alueiden allastaminen patoaltaiden nauhaksi, veden ja sen virtauksen mukana kulkeutuvan orgaanisen ja epäorgaanisen aineksen kulkeutumisen estyminen, muutokset veden lämpötilassa ja eliöstön vaellusyhteyksien häviäminen ovat vesivoiman ilmeisimmät ympäristövaikutukset. Patoamisen jälkeen joen padottu osuus muistuttaa monin osin järvimäistä seisovan veden ekosysteemiä kuin varsinaista virtavesiekosysteemiä. Lisäksi myös virtavesien luontainen vahva yhteys valuma-alueeseen usein heikkenee. Näiden muutosten vuoksi esimerkiksi vaelluskalakannoistamme valtaosa on joko merkittävästi heikentyneitä, kokonaan tai osittain vesiviljelyn varassa tai hävinneet luonnosta kokonaan. Näitä itse patoamisesta johtuvia ekologisia muutoksia on kuvattu aikaisemmin esim. Rinnevalli ym. (2021), ja tässä raportissa keskitytään pääsääntöisesti virtaamasäännöstelyn aiheuttamiin ekologisiin muutoksiin ja mahdollisiin lievennystoimenpiteisiin.

Suomen ilmastollisten ja hydrologisten olosuhteiden vuoksi vuodenaikaiset valunta- ja virtaamaolosuhteet vaihtelevat merkittävästi. Vesivoimatuotannon ja tulvasuojelun nojalla tehtävässä säännöstelyssä vettä varastoidaan luonnon järvialtaisiin tai tekojärviin kevästä syksyyn, ja vettä käytetään erityisesti talvella, jolloin tulovirtaama on tyypillisesti vähäinen ja toisaalta sähkön tarve suurimmillaan. Vuoden yli tapahtuvalla säännöstelyllä voidaan siis merkittävästi parantaa vesivoiman tuotantoedellytyksiä ja vähentää tulvariskejä. Tästä johtuen säännöstelyjen jokien vuodenaikainen virtaamaprofiili voi olla lähes päinvastainen luontaisen joen virtaamaprofiiliin nähden. Joen virtaamaa säädellään myös viikkojen, päivien ja tuntien aikamittakaavoissa sähköjärjestelmän tasapainottamiseksi ja tuotannon optimoimiseksi. Tämän tason virtaamavaihtelua kutsutaan lyhytaikaissäännöstelyksi. Vesivoiman lyhytaikaissäännöstelyn ekologisia vaikutuksia on toistaiseksi tutkittu Suomessa melko vähän (esim. Pohjanen 1991, Sinisalmi ym. 1997), mikä osaltaan vaikeuttaa säännöstelyn haittojen ja toisaalta säädön rajoituksesta syntyvien ekologisten hyötyjen arviointia. Lyhytaikaissäännöstelyn vaikutukset ovat usein kohdekohtaisia ja riippuvaisia paitsi itse säännöstelykäytännöstä, niin myös säännösteltävän joen hydromorfologisista olosuhteista (esim. Elgueta ym. 2021, Tonolla ym. 2022). Lyhytaikaissäännöstelyn vaikutuksia jokien kasvillisuuteen, kalastoon ja selkärangattomiin eläimiin on tutkittu erityisesti vuoristoisissa ja suurempien korkeuserojen maissa kuten Euroopan Alppimaissa (Itävalta, Sveitsi, Ranska, Italia), Norjassa ja Pohjois-Amerikassa (Young ym. 2011, Moreira ym. 2019). Näillä alueilla

ympäristöolosuhteet eroavat Suomen olosuhteista, joten tutkimusten johtopäätökset eivät välttämättä ole suoraan sovellettavissa Suomen säännöstelyolosuhteisiin.

Lyhytaikaissäännöstelyn kannalta merkittävimpiä jokiamme ovat virtaamaltaan suuret ja veden varastointikapasiteettiä omaavat voimatalousjoet, kuten Vuoksi, Kemijoki, Kokemäenjoki ja Oulujoki. Näiden jokien voimakkaan rakentamisasteen ja padotuksen vuoksi valtaosa alkuperäisestä koskielinympäristöstä on menetetty ja joki muodostuu säännöstelyn vaikutusalueella valtaosin järvimäisten patoaltaiden ketjusta. Lyhytaikaissäännöstelyn ekologiset vaikutukset ovat erilaisia allasmaisissa ympäristöissä kuin virta- ja koskialueilla (Riihimäki ym. 1996), joissa vaikutuksia on kansainvälisessä kirjallisuudessa enimmäkseen tutkittu. Sikäli kun lyhytaikaissäännöstely aiheuttaa nopeita virtaamamuutoksia muutoin luonnontilaisen kaltaisilla jokialueilla (kohteissa, joissa on korkeuseroa), voi kansainvälisten tutkimusten johtopäätöksiä pitää samansuuntaisina myös Suomen olosuhteissa.

Lyhytaikaissäännöstelyn vaikutukset kohdistuvat laajemmin koko joen alueella vaelluskaloihin, eli patoaltaiden osalta niiden vaelluskäyttäytymiseen ja mahdollisten koskialueiden osalta kalojen lisääntymis- ja poikastuotantoalueiden määrään ja laatuun. Lisäksi kalastoon kohdistuvien vaikutuksien osalta kappaleessa 3.3 pitäydettiin pääsääntöisesti pohjoismaisissa tutkimuksissa, missä kuvattiin vaikutuksia joko vesivoimatuotantoon keskittyvissä joissa, tai niiden kaltaisissa kokeellisissa olosuhteissa, joten näiden johtopäätöksiä voidaan soveltaa myös Suomen olosuhteissa.

Vesivoiman lyhytaikaissäännöstelyn voimakkuus on Pohjoismaissa lisääntynyt, kun sääolosuhteiden mukaan vaihtelevan tuuli- ja aurinkoenergian tuotannon määrä ja osuus energian tuotannossa on kasvanut (Ashraf ym. 2018; kappale 5). Samalla on myös hyvin todennäköistä, että lyhytaikaissäännöstelyn ekologiset haittavaikutukset ovat lisääntyneet.

## 3.1 Ranta- ja vesikasvillisuus

Jokien vesikasvillisuus luo tärkeitä elinympäristöjä kaloille ja selkärangattomille pohjaeläimille. Boreaalisisissa joissa erityisesti kivien pinnoilla esiintyvät vesisammalet ovat tärkeitä pohjaeläinten ja kalojen elinympäristöjä ja tarjoavat näille suojapaikkoja veden virtaukselta ja pedoilta. Vesikasvillisuus myös vaikuttaa merkittävästi ekosysteemin toimintaan esimerkiksi pidättäen virran `ajeessa`, eli virtauksen mukana kulkeutuvaa eloperäistä ainesta, mikä on tärkeä ravintoresurssi virtavesien ravintoverkoissa (Turunen ym. 2018). Myös rantavyöhykkeen vesi- ja rantakasvit lisäävät elinympäristön rakennepiirteiden vaihtelua ja ovat tärkeä elinympäristö monien kevätkutuisten kalojen kutu- ja poikasalueina sekä myös pohjaeläimille, linnuille ja nisäkkäille.

Rantakasvillisuuden muutokset liittyvät ensisijaisesti joen vuosisäännöstelyyn, eli kevään tulovirtaaman varastoinnista ja tulvasuojelusta johtuvaan virtaamahuippujen pienenemiseen ja tulvimisen vähenemiseen. Tämä vähentää tulvasta riippuvaisten lajien elinympäristöjä, muuttaa rantakasvillisuuden lajirakennetta ja vesistöille tyypillisten eri kasvillisuuden elomuotojen vyöhykkeisyyttä.

Lyhytaikaissäännöstelyissä joissa vesikasvillisuuden täytyy sopeutua nopeisiin vedenkorkeuden muutoksiin, säännölliseen rantojen vettymiseen ja kuivuusjaksoihin. Vedenpinnan nousu ja tulviminen johtaa maaperän huokosrakenteen ja juurakon vettymiseen, mikä heikentää maaperän happipitoisuutta, kasvien kaasujen vaihtoa ja valaistusolosuhteita (Baladrón ym. 2022). Toisaalta alhaisen virtaaman ja vedenkorkeuden aikana rantakasvit voivat kärsiä kuivuudesta ja veden puutteesta, jotka heikentävät kasvien kasvua ja perustuotantoa. Virtaaman ja virrannopeuden äkilliset muutokset heikentävät vesi- ja rantakasvien siementen itämistä, kasvien juurtumista ja voivat aiheuttaa kasvien fyysistä kulumista, irtoamista kasvualustasta ja siten vähentää vesikasvillisuuden määrää uomassa (Madsen ym. 2001, Bejarano ym. 2020). Rantakasveilla on tyypillisesti sopeumia vedenkorkeuden vaihtelusta aiheutuviin stressitekijöihin, mutta voimakkaasti lyhytaikaissäännöstelyissä joissa muutokset vedenkorkeudessa ovat niin säännöllisiä ja äkillisiä, että säännöstely tyypillisesti vähentää tai muuttaa rantakasvillisuutta merkittävästi luonnontilasta (Bejarano ym. 2018).

Lyhytaikaissäännöstelyn aiheuttamat kasvillisuuden muutokset liittyvät myös paikalliseen rantojen eroosioon (Ruohomäki 1984, Bejarano ym. 2020). Rantojen eroosiota syntyy paitsi veden korkeuden vaihtelusta, niin myös virtaamavaihtelun lisäämästä jäiden liikkeestä ja niiden aiheuttamasta rantojen eroosiosta (Bejarano ym. 2018). Säännösteltyjen jokien rannoilla kasvien ominaispiirteissä korostuu kyky kasvulliseen lisääntyminen ja siementen kyky levittäytyä veden virtausten avulla, kun taas hetkellistä ja kerran vuodessa tapahtuvaa tulvaa sietävät lajit häviävät (Jansson ym. 2000, Bejarano ym. 2018)

Putkilokasvien ja vesisammalten ohella lyhytaikaissäännöstelyllä voi olla vaikutusta myös kivien pinnoilla kasvavien päällyslevien tuotantoon ja yhteisökoostumukseen. Kokeellisissa tutkimuksissa on havaittu, että säännöllisesti muuttuva virtaama on stressitekijä päällysleville, joka vähentää levien tuotantoa ja voi heikentää ravinteiden lisäyksen vaikutusta levien kasvuun (Bondar-Kunze ym. 2016). Vaikka ravinnekuormituksen lisäämää vesistöjen rehevöitymistä ja levien kasvua pidetään yleisesti epätoivottuina asioina, on päällyslevien perustuotannolla kuitenkin keskeinen asema virtavesiekosysteemien toiminnassa.

## 3.2 Pohjaeläimet

Selkärangattomat pohjaeläimet, kuten erilaiset vesihyönteiset, nilviäiset ja äyriäiset ovat keskeinen osa virtavesiekosysteemiä. Monet pohjaeläimet käyttävät ravintonaan uomassa syntyvää perustuotantoa, erityisesti eri pinnoilla kasvavia päällyksiviä ja muuta biofilmiä, sekä valuma-alueelta uomaan huuhtoutuvaa eloperäistä ainesta kuten lehtikariketta. Pohjaeläimet toimivat siis keskeisenä linkkinä virtavesiekosysteemien toiminnan ja ravinteiden kierron kannalta yhdistäen virtavesien perustuotannon ja valuma-alueen energiareсурssit virtavesien ravintoverkkoihin.

Lyhytaikaissäätelyllä on havaittu useita haitallisia vaikutuksia virtavesien pohjaeläimistöön (Moog 1993, Kjærstad ym. 2018). Jo muutaman kilometrin matkalla voimalaitoksesta alavirtaan pohjaeläimistön biomassan on todettu vähenevän 75–95 % suhteessa häiriintymättömiin olosuhteisiin (Moog 1993). Samassa tutkimuksessa oli havaittavissa merkittävä biomassan väheneminen (40–60 %) vielä 20–40 km säteellä voimalaitoksesta. Lyhytaikaissäätelyyn on havaittu vaikuttavan haitallisesti myös vesihyönteisten muninnan onnistumiseen, jolloin pohjaeläinyhteisön rakenne muuttuu (Kennedy ym. 2016). Monet vesihyönteiset munivat aivan rantaviivaan tai sukeltavat munimaan kosken pintakiviä tai liekopuita vasten, jolloin korkealla vedellä ja virtaamalla munitut munat jäävät veden äkillisesti laskiessa kuiville ja tuhoutuvat (Kennedy ym. 2016).

Veden korkeuden ja virtaaman äkillinen vaihtelu lisää pohjasedimentin liikettä ja muuttaa äkillisesti pohjaan kohdistuvaa virtausta ja hydraulisia olosuhteita. Luontaisesti tapahtuvaan virtaaman kasvuun ja tulvaan verrattuna muutos on nopea ja se toistuu luonnottomassa rytmissä. Tämä lisää pohjaeläimistön ajetta eli hallitsematonta liikkumista virran mukana ylävirrasta alavirtaan (Tonolla ym. 2022). Äkillinen vaihtelu myös altistaa osan joen pohjasta säännölliselle kuivumiselle, mikä voi vähentää pohjaeläimistön runsautta vaikutusalueella (Parasiewicz ym. 1998, Elgueta ym. 2021). Lyhytaikaissäädöstä johtuva ajeen lisääntyminen on suurinta virtaaman kasvun alkuvaiheessa ja voimakkaasti säännötellyillä alueilla (Bruno ym. 2016). Pohjaeläinlajien välillä on eroa virtaamamuutoksiin liittyvässä ajeherkkydessä: ajeherkkyys on korkeampi lajeilla, joilla ei ole keinoja tarrautua pohjasedimenttiin, ja jotka muutoinkin ovat tyypillisemmin virran ajeessa liikkuvia pohjaeläimiä (Bruno ym. 2016, Tonolla ym. 2022), kuten esimerkiksi sukeltajasurviaiset (Baetidae). Sitä vastoin lajit, jotka voivat kiinnittyä alustaansa erittämänsä silkkiverkon (siiviläsirvikkäät, Hydropsychidae) tai silkkinauhan (mäkärät, Simuliidae) avulla eivät ole yhtä herkkiä virtaamavaihtelun vaikutuksille (Bruno ym. 2016). Vaikutukset ovat kuitenkin hyvin riippuvaisia paikallisista ympäristöolosuhteista, eikä pohjaeläimistön runsaudessa tai lajistokoostumuksessa ole aina systemaattisia eroja luontaisten ja säännötelyjen jokialueiden välillä (Tonolla ym. 2022). Rapujen osalta lyhytaikaissäätelyyn vaikutuksia on tutkittu hyvin vähän, mutta sääntöselvitys voi olla haitallista rapukannoille. Sääntöselvityksen aiheuttama rantojen eroosio ja ajoittainen kuivuminen sekä matalien koskialueiden jäätyminen pienillä talviajan

virtaamalla voi olla heikentää rapujen elinympäristön laatua ja lisätä niiden kuolleisuutta (Pursiainen & Westman 1982). Virtaamavaihtelut voivat lisätä rapujen joutumista virran ajeeseen, mikä voi osaltaan lisätä rapujen kuolleisuutta (Corey ym. 2021).

## 3.3 Kalat ja nahkiainen

### 3.3.1 Nopeat virtaamamuutokset jättävät kalanpoikaset kuiville

Lyhytaikaissäännöstelyyn liittyvä virtaaman ja veden korkeuden äkillinen lasku lisäävät kalojen riskiä jäädä veden nopeasti laskiessa kuiville (Saltveit ym. 2001, Halleraker ym. 2003) tai jumiin pääuomasta erilleen kuroutuviin lammikoihin, joissa kalat altistuvat muun muassa suurille lämpötilan muutoksille ja pedoille. Monien virtakatuisten kalalajien poikasvaiheet suosivat elinympäristönään matalia rantakivikoita, joissa veden virtausnopeus on suhteellisen pieni. Juuri nämä elinympäristöt ovat kuitenkin kaikista alttiimpia lyhytaikaissäännöstelyn vaikutuksille. Esimerkiksi Itävallan Drau-joella lyhytaikaissäännöstelyn vaikutusalueella kalaston biomassassa havaittiin olevan 65 % pienempi häiriintymättömiin olosuhteisiin nähden (Moog 1993). Pääasiallisena syynä kalaston vähenemiseen pidettiin rakenteellisesti monimuotoisten ranta-alueiden säännöllistä kuivumista virtaaman laskiessa.

Kuiville jäämisen riskiin vaikuttaa merkittävästi muun muassa virtaaman ja vedenkorkeuden laskunopeus, veden lämpötila, vuorokauden aika ja uomamorfologia. Mitä nopeampi on virtaaman muutosnopeus ja mitä nuoremmista poikasvaiheista on kyse, sitä helpommin poikaset kuiville jäävät (Bradford 1997). Erityisesti lohen ja taimenen keväällä kuoriutuneet varhaispoikaset (0+) ovat alttiita virtaamamuutoksille, kun taas hieinan vanhemmat poikaset (>1+) jo hakeutuvat suojaan vesitetyille alueille virtaaman jälleen kasvaessa (Harby ym. 2001). Kalojen uinti- ja reagointinopeus tyypillisesti laskee kylmässä vedessä, mikä tekee kaloista alttiimpia jäämään kuiville (Bradford 1997, Saltveit ym. 2001). Virtaaman nopeat muutokset pakottavat kaloja, kuten lohen ja taimenen poikasia, vaihtamaan säännöllisesti paikkaa suotuisampiin virtausolosuhteisiin, mikä altistaa ne saalistukselle, sekä lisää kalojen energian kulutusta ja heikentää kasvua (Korman & Campana 2009, Puffer ym. 2015).

Kalalajien väliset erot niiden vuorokauden sisäisessä aktiivisuudessa vaikuttavat myös merkittävästi siihen, miten säännöstely vaikuttaa niihin. Esimerkiksi lohikalajien, kuten lohen ja taimenen poikaset ovat tyypillisesti aktiivisimpia iltahämärässä ja yöllä, jolloin äkillisestä virtaaman laskusta johtuva kuivumisriski voi olla suurempi päivällä kuin yöllä, erityisesti kylmän veden aikaan (Bradford ym. 1995, Harby ym. 2001, Saltveit

ym. 2001, Halleraker ym. 2003). Sen sijaan harjuksen poikaset ovat päiväaktiivisia, joten riski kuiville jäämiseen voi olla suurempi yöllä (Auer ym. 2017).

Kuiville jäämisen riski on yleisesti suurempi loivilla sora- ja kivikkorannoilla, missä on myös enemmän virtakutuisten kalojen poikasille soveltuvaa elinympäristöä, ja vähäisempi jyrkemmillä rannoilla (Bradford ym. 1995, Tuhtan ym. 2012). Rantavyöhykkeen monimuotoisuutta lisäävät rakenteet, kuten huokoinen kivien kerrostuneisuus, rantapoukamat ja montut voivat lisätä kalojen kuiville jäämisen riskiä, sillä kalat jäävät herkästi suojaan näihin rakenteisiin veden äkillisesti laskiessa (Scruton ym. 2008, Moreira ym. 2019). Virtaaman heikkeneminen voi lisätä koskielinympäristön lammikoitumista, jolloin esimerkiksi lohen ja taimenen poikasiin voi kohdistua tavanomaista suurempi predaatiopaine (Magoulick & Kobza 2003).

### 3.3.2 Kalanpoikaset voivat huuhtoutua alavirtaan

Virtaaman äkillinen nousu voi lisätä myös kalanpoikasten hallitsematonta huuhtoutumista alavirtaan (Auer ym. 2017), mikä altistaa poikaset saalistukselle tai ne voivat päätyä virran mukana niille heikosti soveltuviin elinympäristöihin. Tällainen ajeherkkyys riippuu mm. vuorokaudenajasta ja kalojen aktiivisuustasosta sekä myös kalojen elinkierron vaiheesta (Auer ym. 2017). Huuhtoutumista on todettu erityisesti lohikalojen pienemmillä poikasilla (Heggenes 1988, Bell ym. 2001), kun taas smolttiutumisvaiheessaan poikaset käyvät läpi fysiologisia muutoksia hakeutuessaan makeasta vedestä merivaellukselleen, jolloin ne luonnollisesti hakeutuvat nopeampaan virtaukseen (Katzman ym. 2010).

Erilaisten abioottisten tekijöiden ohella lohen- ja taimenen poikastuotantoa joessa säätelevät voimakkaasti kalojen tiheydestä riippuvaiset tekijät. Lohen ja taimenen poikaset ovat reviiरिकaloja, ja lajien poikasille soveltuvan elinympäristön pinta-ala on rajallinen, mikä voi johtaa voimakkaaseen lajin sisäiseen resurssikilpailuun. Säännöstelystä johtuva virtaaman pieneneminen tai säännöllinen vesitetyn pinta-alan vaihtelu voi merkittävästi vähentää poikasille soveltuvan elinympäristön määrää ja siten voimistaa lajin sisäistä kilpailua resursseista ja lisätä kuolleisuutta (Forseth & Harby 2014). Nopeat virtaamamuutokset vaikuttavat myös kuhan liikkumiseen patoaltaassa (Vehanen & Lahti 2003).

### 3.3.3 Kalojen lisääntymismenestys heikkenee

Säännöstelystä johtuva virtaamavaihtelu vaikuttaa yleensä kielteisesti virtakutuisten kalojen mädin kehittymiseen ja kalojen lisääntymismenestykseen. Esimerkiksi lohikalat valitsevat kutupaikan kututilanteessa vallitsevan pohjan raekoon ja paikan muiden hydroaulisten ominaisuuksien suhteen (syvyys, virrannopeus), eikä niillä ole kykyä ennakoida lyhytaikaisäännöstelyn aiheuttamia muutoksia olosuhteissa. Virtaamavaihteluiden ilmeinen kielteinen vaikutus on kalojen mädin tai alkioiden tukehtuminen tai jäätyminen niiden jäädessä kuiville alivirtaamahuippujen aikana, sekä toisaalta kutupesän rakenteellinen tuhoutuminen ja mädin huuhtoutuminen huippuvirtaamien aikana (Forseth & Harby 2014).

Säännöstelystä johtuva virtaaman ajoittainen heikkeneminen voi johtaa kutupesän lietymiseen ja altistaa mätimunat sedimentaation haitallisille vaikutuksille, soran sisäisen veden virtauksen heikkenemiseen, ja siten hapen loppumiseen (Casas-Mulet ym. 2015). Vaikka lohikalojen mätimunat voivatkin kosteissa ja suojaisissa olosuhteissa selviytyä jopa viikkoja ilman suoraa veden virtausta (Becker ym. 1983, Becker & Neizel 1985), kuoriutuneet poikaset yleensä kuolevat joko virtaamavaihteluihin (Reiser & White 1985) tai sedimentaatiolle altistuessaan niiden elinkyky voi olla selvästi heikompi (Louhi ym. 2023).

Lyhytaikaisäännöstely voi lisätä myös rantojen eroosiota, jäiden painumista rantavyöhykkeellä tai muuttaa jääolosuhteita joessa (Ojutkangas ym. 1995, Weber ym. 2013). Jääolosuhteet, kuten suppojään muodostuminen, hyydepadot ja muut jäiden virtausvastusta lisäävät muodostelmat voivat kohdistaa rantapenkkeihin ja pohjasedimenttiin voimakkaan veden virtauksen ja siten aiheuttaa niiden syöpymistä. Virtaaman säännöstely voi lisätä hyyde- eli suppojään muodostumisriskiä (Alfredsen & Tesaker 2002, Nafziger ym. 2017). Kaikki nämä tekijät voivat heikentää erityisesti syyskutuisten lohikalojen lisääntymismenestystä lisäämällä kutupesien mädin kuolleisuutta sekä mahdollisesti myös suoraan tai välillisesti pohjakivikoissa talvehtivien kalojen, kuten lohien- ja taimenen poikasten tai simppujen, kuolleisuutta (Weber ym. 2013).

Lyhytaikaisäännöstelyn kielteiset vaikutukset pohjaeläimistön runsauteen voivat heijastua kaloihin ravintoresurssien ja siten kasvun heikkenemisenä (Moog 1993, Korman & Campana 2009). Valtaosa virtavesien lohikaloista saalistaa virran ajeessa kulkevia vesihyönteisiä ja muita pohjaeläimiä sekä saaliskaloja. Virtaamavaihtelun lisäämä pohjaeläimistön aje saattaakin tietyissä olosuhteissa lisätä helposti saatavilla olevan ravinnon tarjontaa, joka kompensoi virtaamavaihteluun ja lisääntyneeseen liikkumiseen liittyviä energettisiä kustannuksia (Bond ym. 2016, Kelly ym. 2017).

Vedenkorkeuden muutosnopeuden vaikutuksista on vain vähän tietoa olemassa, mutta luonnonjoissa yli 0,5 cm/min vedenkorkeuden laskunopeuden on havaittu olevan yhteydessä heikkoon kalaston ekologiseen tilaan (Schmutz ym. 2015). Vastaavasti alle 0,25 cm per minuutti vedenkorkeuden laskunopeuden on havaittu lisäävän korkeamman ekologisen tilaluokan todennäköisyyttä ja pienentävän kalojen kuiville jäämisen riskiä (Halleraker ym. 2007, Schmutz 2015). Raja-arvoja voidaan kuitenkin tulkita vain suuntaa antavasti, koska ne lienevät vahvasti laji- ja kontekstiriippuvaisia. Jelovica ym. (2023) raportoivat Kuusinkijoen taimenen ja harjuksen habitaattikartoituksiin pohjautuvalla todennäköisyysmallilla lajien löytävän helpommin suojapaikan virtaaman las-  
kiessa kuin sen nopeasti kasvaessa. Samankaltaisen tuloksen päätyivät myös Hedger ym. (2023) mallintaessaan lohien varhaispoikasten selviytymistä Norjan Nidelvalla.

### 3.3.4 Kalojen vaellukset estyvät tai hidastuvat

Vesivoimatuotanto on aiheuttanut haitallisia muutoksia erityisesti vaelluskaloille, joiden elinkierto on riippuvainen kutu- ja syönnösalueiden kytkeytyneisyydestä ja vaelluksen esteettömyydestä näiden alueiden välillä. Joen säännöstely vaikuttaa voimakkaasti kalojen käyttäytymiseen, sillä virtaaman, ja virrannopeuksien muutokset saavat kalat liikkeelle ja hakeutumaan lajille suotuisiin virtausolosuhteisiin. Esimerkiksi virtaaman ajoittainen lakkaaminen tai voimakas heikkeneminen voivat aiheuttaa virtahakuisten lohikaloiden harhailua voimalaitoksen alapuolella tai vähentävän kalojen nousuhalukkuutta (Vehanen ym. 2020). Mikäli patojen yhteyteen rakennetut kalatiet mahdollistavat jälleen lohikaloiden vaellusyhteyden, voi kasvanut lyhytaikaissäännöstely heikentää kalateiden sisäänkäynnin löytämistä tai sen houkuttelevuutta. Lisääntymisen onnistumiseksi vaelluskalojen olisi kuitenkin tarpeellista päästä kutualueilleen mahdollisimman nopeasti luontaista vauhtiaan noudattaen, koska kaikki ajalliset viiveet lisäävät nousukalojen kokemaa stressiä sekä viivettä kutuajankohdassa.

Esimerkiksi Kemi- ja Lijoella seurattiin radiotelemetrialla nousulohien vaellusta vuosina 2011–2013 (Vehanen ym. 2020). Yksittäisten kalojen nousuyrityksien lukumäärät vaihtelivat nollan ja 1553 yrityksen välillä mediaanin ollessa 277. Kalat viipyivät alakanavissa keskimäärin 5,6 päivää. Nousuaktiivisuuteen ja kestoon vaikuttivat noin kesäkuusta marraskuulle tehdyn seurannan mukaan tuntivirtaamien lisäksi myös päivänpituus ja valon määrä. Oulujoen Montan voimalaitoksen alakanavassa elo-lokakuussa 2021 tehdyssä akustisessa lohien noususeurannassa lohet tekivät keskimäärin 20 nousuyritystä ja yksittäisen nousun kesto oli 40 minuuttia (Louhi ym. 2024). Nousujen vuorokauden aikainen ajoittuminen oli verraten tasaista nousuhuippujen ajoituksessa keskiyön (klo 22–01) ja varhaisen aamun (klo 5–8) tunneille. Lohet eivät suosineet Montassa mitään tietyn suuruista virtaamaa hakeutuessaan alakanavaan, mutta useimmiten lohet aloittivat nousun ala-kanavaan, kun virtaamamuutokset olivat olleet

pieniä muutaman tunnin ajan ennen nousun aloitusta. Lohien nousuhiippujen ajankohdat olivat yhteneviä Oulujoen Merikosken ja Montan alueilla.

Nousukalamääriä tarkasteltiin myös Merikosken voimalaitoksen juoksutuksien määriin vuoden 2020 aikana. Etenkin lohien nousumäärät vaikuttaisivat seuraavan voimalaitoksen keskimääräisten ohijuoksutuksien vuorokausimäärää, mutta ei keskimääräistä kokonaisjuoksutusta (Louhi ym. 2024). Aikaisempina vuosina 2010–12 Merikosken kalatien on havaittu hakeutuvan vain alle puolet kalatien alapuolella käyneistä lohista ja taimenista, ja kalat hakeutuivat kalatiehen noin 20–25 vuorokauden viiveellä (Orell ym. 2014).

Vertailun vuoksi edellisiin esimerkkeihin Suomen rakennetuilta joilta mainittakoon, että nousulohien on havaittu vapaana virtaavissa joissa uivan 1,6–31 km päivässä veden virtausnopeudesta riippuen (Thorstad ym. 2011). Esimerkiksi Tornionjoessa vuosina 2018–2019 tehdyssä lohien ja taimenten radiotelemetriaseurannassa lohut uivat keskimäärin 25 km päivässä ja taimenilla 150–300 kilometrin matka kutualueilleen taittui 3–5 viikossa (Huusko ym. 2023).

Vesivoimatuotantoon keskittyvissä joissa myös lohien vaelluspoikasten alasvaelluksessa on havaittu ongelmia, kuten niiden vaelluksen hidastuminen, korkea predaatio patoaltaissa, turbiinikuolleisuus sekä kalojen vahingoittuminen ja stressaantuminen (Huusko ym. 2014). Ongelmien vähentämiseksi vaelluspoikaset pitäisi pystyä ohjaamaan nopeasti ja tehokkaasti turbiinit kiertävää reittiä pitkin voimalaitoksen alapuolelle – siis samaan tapaan kuin aikuiset nousukalat voimalaitoksen yläpuolelle. Iijoella keväällä 2016 tehdyssä lohismolttien akustisessa telemetriaseurannassa virtaamalla havaittiin olevan selvä vaikutus vaelluspoikasten käyttäytymiseen Haapakosken voimalaitoksen seuranta-alueella: virtaaman laskiessa ja virrannopeuden hidastuessa vaelluspoikasten käyttäytyminen muuttui suoraviivaisesta etenemisestä edestakaiseksi liikkedinnäksi. Kaikissa virtaamatilanteissa vaelluspoikasten havaittiin välttelevän hitaimman virrannopeuden alueita ja reagoivan virrannopeuden muutoksiin (Huusko ym. 2018).

### 3.3.5 Nahkiainen

Tukinuitto, vesivoimarakentaminen sekä vesistöjen säännöstely ja veden laadun heikkeneminen ovat merkittävimpiä syitä myös ympyräsuisiin kuuluvan nahkaisen väheneemiseen rannikkojoistamme (Rinnevalli ym. 2024). Nahkiaista pyydettiin vielä 1980-luvun alussa 33 Suomen joella, mutta nykyään 80–90 prosenttia maamme nahkiaissaa- liista saadaan Perämereen laskevista joista (Hiltunen ym. 2013). Monissa maamme joissa padot pysäyttävät nahkiaisten kutuvaelluksen, mutta myös äärevöityneet virta- maolosuhteet vaikeuttavat nahkaisen selviytymistä. Nahkaisen toukat suosivat verrattain pieniä virrannopeuksia ja matalia alueita (Taverny ym. 2012), ja kaloihin verrattuna

ne ovat tiukemmin elinympäristöönsä sidottuja, joten ne altistuvat helposti virrannopeuden muutoksille tai jäävät kuivilleen lyhytaikaissäätelyn vaikutusalueilla.

Perhonjoella tehdyssä tutkimuksessa selvitettiin Kaitforsin voimalaitoksen vaikutusta nahkiaisien likomato-toukkien runsauteen tutkimalla toukkien runsautta jokialueella ennen Kaitforsin voimalaitoksen rakentamista (1982) ja kahtena ajankohtana sen jälkeen (1985 ja 1993) (Ojutkangas ym. 1995). Ennen voimalaitoksen rakentamista toukkien määräksi vaikutusalueella arvioitiin noin 1,4 miljoonaa, kun vuoden 1993 arvio oli enää 155 000 yksilöä. Toukkien määrän vähenemisen arvioitiin johtuvan lyhytaikaissäätöstelystä ja erityisesti sääntelyn lisäämästä rantapenkkojen jäätymisestä, sekä vedenkorkeuden vaihtelun ja jäiden liikkeiden lisäämästä eroosiosta rantapenkoissa, jotka ovat tärkeitä nahkiaisien toukkien elinympäristöjä. Sääntely voi myös lisätä kutualueina toimivien soralaikkujen eroosiota ja huuhtoutumista, mikä heikentää kudun onnistumista. Perhonjoella lyhytaikaissäätelyä on rajoitettu nahkiaisien kutuajana alkukesästä, mutta sillä ei ole ollut havaittavaa vaikutusta nahkiaisien toukkien runsauteen joessa (Aronsuu ym. 2019). Sääntelyn rajoittaminen on saattanut parantaa kudun onnistumista sekä mädin ja alkiodien säilyvyyttä, mutta sääntely muina vuodenaikoina kuten talvella, jolloin kutuajaa odottavat aikuiset nahkiaiset talvehtivat joessa, voi olla nahkiaiselle hyvin haitallista. Talvehtivat aikuiset nahkiaiset eivät syö joessa ollessaan mitään ja niiden aineenvaihdunta toimii säästöliekillä, jolloin virtaamamuutokset ja poikkeukselliset jääolosuhteet voivat lisätä niiden tarvetta liikkua joessa suotuisampiin virtausolosuhteisiin ja siten lisää energian kulutusta ja predaatoriskiä (Aronsuu ym. 2019).

Toisin kuin lohella ja taimenella, jotka pääsääntöisesti palaavat synnyin jokeensa kudulle, nahkiaisella ei esiinny vastaavaa kotijokiuskollisuutta, vaan ne hakeutuvat jokiin kudulle niiden virtaamatilanteen ja joessa elävien nahkiaisien likomato-toukkien feromonien houkuttelemina. Nahkiaisien vaellusaktiivisuus merestä jokeen on havaintojen mukaan korkeampi silloin kun joki on tulvassa tai virtaama suuri (Hiltunen ym. 2012). Koska nousevat nahkiaiset liikkuvat pääasiassa hämärän aikaan ja yöllä, jolloin sääntelyssä joessa virtaamaa säädetään usein alas, voi lyhytaikaissäätelyllä olla merkittävää vaikutusta nahkiaisien nousuaktiivisuuteen.

### 3.4 Lyhytaikaissäätelyn muutoksien ekologiset hyödyt

Renöfält ym. (2010) ovat koostaneet yhteen useita suosituksia vesivoimatuotannon aiheuttamien haittojen vähentämiseksi vesistöissä, joista useat liittyvät virtaamaan: sääntelyn rajoittaminen yleisesti, vuodenaikaisten huippujen vähentäminen tai li-

sääminen, luonnonmukaisemman virtaamasyklin tulvien noudattaminen. Rakennettujen jokien virtaamasäännöstelyn rajoittamista ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi kutsutaan usein ympäristövirtamaan määrittämiseksi. Ympäristövirtamalla tarkoitetaan määrällisesti, laadullisesti ja ajallisesti riittävää virtamaa, jota tarvitaan virtavesien ekosysteemien sekä ekosysteemeistä riippuvaisten elinkeinojen ja hyvin voinnin ylläpitämiseen (Brisbanen julkilausuma, 2007). Määrittelyssä huomioidaan myös veden yhteiskunnalliset käyttötarpeet ja sosioekonomiset vaikutukset. Ekologisella virtaamalla tarkoitetaan vesipuidedirektiivin yhteydessä sellaista virtamaa, joka ei estä luonnollisten pintavesimuodostumien ympäristötavoitteiden saavuttamista (Euroopan yhteisö 2015). Ekologinen virtaama siis on puhtaasti ekologisista tarpeista käsin määritelty vesistön hydromorfologinen tila, joka ei heikennä vesistön ekologista tilaa tai rajoita vesistön hyvän ekologisten tilan saavuttamista. Ekologista virtaamaa ei siis sovelleta keino- tekoisten tai voimakkaasti muutettujen vesien ekologisten jatkumon ja tilatavoitteiden määrittelyssä. Ympäristövirtaaman määrittelykeinoja ja toimeenpanoa on kuvattu aiemmin kansallisissa selvityksissä (Koljonen ym. 2016, Koljonen ym. 2017, Turunen ym. 2023). Yleisesti ympäristövirtaaman vaikuttavuustutkimukset ovat edenneet yksittäisistä, taloudellisista merkittävistä kalalajeista laajempiin, virtavesiyhteisöä käsitteleviin ja ekologisiin prosesseihin sekä kokonaisuun valuma-alueisiin (Arthington ym. 2018).

Lyhytaikaissäännöstelyn ekologisten vaikutusten tutkiminen *in situ* edellyttäisi seuranta kohteella lyhytaikaissäännöstelyn aikana sekä myöhemmin tilanteessa, missä kohteessa on toteutettu ympäristövirtaama tai kohteessa, missä siirryttäisiin luonnontilasta lyhytaikaissäännöstelyyn. Tällaista selkeää kohdetta ei toistaiseksi ole Suomessa olemassa, joten päätelmiä joudutaan tekemään joko mallinnuksien tai kansainvälisten kokemuksien perusteella. Ympäristövirtaaman toimeenpano voi myös koskea voimallistosten ohjauksutuskäytössä olevien vanhojen uomien vesittämistä minimivirtaamalla tai juoksutettavan virtaaman määrän kasvattamista vanhassa uomassa tai pääuomassa tiettyinä vuodenaikoina (esim. Irijoen kevään virtaamatasosta sopiminen, Irijoen kalatalousalue 2021). Toistaiseksi näiden toimenpiteiden vaikuttavuudesta on rajallisesti tutkimusnäyttöä. Ala-Koitaajoella muutettiin lupamääräyksiä koskien vanhaan uomaan johdettavaa virtaaman määrää. Kesäajan virtaamaksi määrättiin 6 m<sup>3</sup>/s ja talviajan virtaamaksi 4 m<sup>3</sup>/s Vuoksen vesistön järvilohen ja taimenen lisääntymisen edistämiseksi. Ylisiirretyt emokalat lisääntyivätkin alueella toimenpiteen jälkeen hyvin ja kudesta syntyi melko suuriakin poikastiheyksiä, mutta poikaset selviytyminen jokipoikasvaiheesta vaelluspoikaseksi asti osoittautui heikoksi. Varkauden Ämmäkoski on viimeisimpiä kohteita, jossa Huruskosken voimalaitokselta on johdettu Ämmäkoskeen pysyvä 10 m<sup>3</sup>/s virtaama vuodesta 2022 lähtien.

Koska toteutettuja ympäristövirtaamahankkeita on hyvin rajallisesti, on viime aikoina julkaistu useita, erilaisiin mallinnuksiin pohjautuvia arvioita lyhytaikaissäätönsäätelyn aiheuttamista haitoista sekä tehty suosituksia, miten haittoja voitaisiin vähentää. Esimerkiksi Bakken ym. (2023) suosittelevat Atlantin lohelle kehittämänsä sääntöstelyhaittojen luokittelun soveltamista jatkossa vesipuitedirektiivin mukaisiin ympäristövirtaama-kohteisiin.

Uumajanjoki on Ruotsin kolmanneksi suurin vesivoimatuotantoon valjastettu joki, jonka keskivirtaama on 465 m<sup>3</sup>/s (Widén ym. 2022). Joen koko putouskorkeus on valjastettu 19 vesivoimalaitoksella, mitkä tuottavat vuosittain keskimäärin 7,7 TWh sähköä. Rakentamisen ja sääntöstelyn haittoja vesiekosysteemille on toistaiseksi lievennetty lohen, taimenen, harjuksen ja nieriän istutuksilla. Joen alaosalla sijaitsevaan Storforseniin on rakennettu kalatie, mikä mahdollistaa kalojen kulun Uumajanjoen sivujokeen Vindel-joelle. Widén ym. (2022) selvittivät mallintamalla ympäristövirtaaman käyttömahdollisuuksia Uumajanjoella ja havaitsivat, että nollavirtaamia rajoittamalla ja ohjaamalla vuodenaikaan vaihteleva virtaama (1–12 % joen säännöstelemättömästä keskivirtaamasta) ohijuoksualueisiin koko jokialueella, vähentäisi keskimäärin 2,1 % sähkön vuosituotantoa. Mikäli näiden toimenpiteiden lisäksi ohjattaisiin riittävä virtaama kalateihin (3 % joen säännöstelemättömästä keskivirtaamasta), menetys kasvaisi 3,1 prosenttiin. Leikkaus koko voimalaitosketjun vuosituotannossa olisi näillä toimenpiteillä 158 GWh ja 240,6 GWh. Jos koko joessa otettaisiin vielä käyttöön luonnonmukaisempi virtaama nykyisen lyhytaikaissäätönsäätelyn sijaan, menetykset olisivat 3,8 % vuodessa. Toimenpiteet yhdessä mahdollistaisivat harjukselle soveltuvan elinympäristön kolminkertaistamisen kunnostamalla sekä rantavyöhykkeen kasvillisuudelle lisäämisen 66 prosentilla. Lisäksi he ehdottivat kunnostustoimenpiteiden sekä kalateiden toteuttamisen priorisointia joen eri kohteilla. Valuman kasvaessa ilmastonmuutoksen myötä, laskennalliset menetykset tulisivat olemaan vähäisemmät vuonna 2030 (Widén ym. 2024). Mahdollisuutta hyödyntää kasvavia sademääriä ja valuntaa ympäristövirtaamana vesivoimatuotannon sijaan voitaisiin selvittää myös Suomessa.

Noin 6 km pitkä, sääntöstelty Gullspång-joki yhdistää Vänern ja Skagern järvet Etelä-Ruotsissa (Bjørnås ym. 2021), missä lisääntyi rajatuilla alueilla aikaisemmin harvalukuisena järvivaelainen taimen ja lohi. Jokea on kunnostettu 2000-luvulla ja sen vanhaan sivu-uomaan on määrätty luovutettavaksi 3m<sup>3</sup>/s jatkuva virtaama. Toimet ovatkin parantaneet kalojen poikastuotantoa huomattavasti ja sivu-uoma on ollut yksi parhaimpia joessa olevia poikastuotantoalueita Gullspångin padon alapuolella. Mallintamalla (inSTREAM) Bjørnås ym. (2021) havaitsivat taimenten määrän kasvavan, jos virtaama kasvatettiin kolminkertaiseksi, mutta loheen toimella ei ollut vastaavaa vaikutusta. Syyksi tähän arveltiin olevan lisääntyvä sympatristen lajien välinen ja sisäinen kilpailu tiheyden kasvaessa. Myöhemmin Hajjesmaeli ym. (2023) käyttivät samaa inSTREAM-mallinnusta ja raportoivat nykyisen tasaisen virtaaman olevan mahdollista luon-

nollisen kaltaista virtaamaa parempi kalastolle Gullspångin vanhassa uomassa. Tulkinassa on kuitenkin pidettävä mielessä, että mallinnus käsittää vaikuttavuuden vain taimeneen ja loheen, ja jättää ulkopuolelleen muun vesieliöstön ja fysikaalisen ympäristön (Hajiesmaeili ym. 2023).

Samaan tapaan kuin Gullspångin vanha uoma, myös Pielisjoen Kuurnan voimalaitoksen yhteyteen rakennettu Laurinvirta toimii voimalaitoksen ohijuoksutuskanavana. Laurinvirrassa ovat järvilohi ja taimen lisääntyneet, mutta alueen poikastuotanto on ollut erittäin heikkoa todennäköisesti voimakkaiden ohijuoksutuksien vuoksi (Louhi ym. 2024). Turunen ym. (2023) esittävätkin kriteerit, miten ja minkälaisissa kohteissa ympäristövirtaamalla voitaisiin saavuttaa suurimmat ekologiset hyödyt.

### 3.4.1 Lohen populaatiomallinnus ja kalateiden toimivuus

Ympäristövirtaaman hyötyjä lohikaloille on Suomessa tarkasteltu ja mallinnettu esimerkiksi lijoella (Orell ym. 2016). Lohen populaatiomallinnuksen mukaan esimerkiksi Raasakan vanhan uoman poikastuotantoalueiden merkitys lijoen vaelluskalakantojen elvyttämisyrittämisille olisi poikkeuksellisen suuri ja alue voisi laskennallisesti tuottaa jopa 23 prosenttia koko lijoen vesistön smolttituotannosta, mikäli alueelle johdettaisiin noin 20 m<sup>3</sup>/s virtaama. Raasakan vanhalla uomalla on poikkeuksellisen suuri merkitys, koska alue sijaitsee voimalaitospatojen alapuolella aivan merialueen tuntumassa ja sinne kudulle vaeltavien ja sieltä mereen laskeutuvien kalojen ei tarvitsisi ohittaa yhtään voimalaitosta tai patoallasta, jolloin näistä aiheutuvat tappiot voitaisiin välttää.

Populaatiomallilla voidaan konkretisoida lohen elinkierron eri vaiheiden kuolevuuksien vaikutuksia lohikannan kehittymiseen ajan funktiona. Mallissa seurataan lohen vuosiluokkia kuoriutumisen lisääntymiseen asti siten, että vuosiluokan siirtyessä elinvaiheesta toiseen populaatiosta leikataan tähän elinvaiheeseen liittyvä kuolevuus. Osaan näistä kuolevuusarvoista voidaan ihmisen toimenpiteillä vaikuttaa, toisiin ei. Lohen populaatiomallinnusta on hyödynnetty mm. Oulujoen vesistöalueella (Härkönen ym. 2023), Kymijoen (Mäki-Petäys ym. 2013) sekä Ii- ja Kemijoen (Mäki-Petäys ym. 2012).

Lyhytaikaisäännöstelystä johtuva virtaaman ja vedenkorkeuden vaihtelu voi vaikuttaa kalatien suuaukon virtausolosuhteisiin niin, että kalatien houkuttelevuus ja siten toimintatehokkuus vaelluskaloille heikkenevät (Sutela ym. 2018). Kalatien houkutusvahvuutta ja löydettävyyttä voidaan tehostaa myös turbiinien käytön säätelyllä ja virtausolosuhteita optimoimalla (Louhi ym. 2024). Kalateiden toimivuuden optimointi on erityisen tärkeää vesistöissä, joissa on useita kalateiden avulla ohitettavia patorakennelmia. Tällaisissa olosuhteissa jo yksikin heikkotehoinen kalatie voi estää vaelluskalakantojen palauttamisen. Myös kumulatiiviset kalatietappiot voivat nousta huomattavan

korkeiksi, vaikka yksittäiset kalatiet toimisivatkin kohtalaisen tehokkaasti. Näissä vesistöissä toimivien kalateiden tai ohitusuomien rakentaminen, minimivirtaaman käyttäminen ja lyhytaikaissäännöstelyn sekä ohjuoksutuksien ohjaaminen kalojen nousu tai -laskuvaellusta tukevaksi voisivat vähentää voimalaitospatojen ohittamisesta kaloille aiheutuvia tappioita.

### 3.5 Tutkimustarpeet

Koska lyhytaikaissäännöstelyn ekologisiin vaikutuksiin liittyvä kansainvälinen tutkimus painottuu koski- ja virta-alueisiin, olisi säännöstelyn vaikutuksia syytä selvittää tarkemmin myös patoaltaiden osalta, sillä kansallisesti merkittävä osa lyhytaikaissäännöstelyn vaikutuksista koskee näitä ympäristöjä. Toisaalta kansallista tutkimusta on myös erittäin rajallisesti vaikutuksista koskihabettaattien osalta.

Vanhojen uomien vesittämisen tai eri vuodenaikojen koskevan säännöstelyn muutosten vaikutuksista on viime aikoina saatu lisää tutkimustietoa (kappale 3.4). Pitkäaikaista seurantatutkimusta siitä miten lyhytaikaissäännöstelyn rajoittaminen vaikuttaa virtavesien ekologiseen tilaan on kuitenkin hyvin vähän (Charmasson & Zinke 2011, Bruno ym. 2023), eikä kansallista tietoa ole käytännössä olemassa. Ekologisten hyötyjen arvioimiseksi olisikin tärkeää, että vaikutuksia pystyttäisiin tutkimaan edustavissa kohteissa edes kokeiluluontoisesti ennen laajamittaista toimeenpanoa.

Kuten aikaisemmin jo todettiin, lyhytaikaissäännöstelyn ekologisten vaikutusten tutkiminen *in situ* edellyttäisi seuranta-kohteella lyhytaikaissäännöstelyn aikana sekä myöhemmin tilanteessa, missä kohteessa on toteutettu ympäristövirtaama tai kohteessa, missä siirryttäisiin luonnontilasta lyhytaikaissäännöstelyyn. Tällaista selkeää kohdetta ei toistaiseksi ole Suomessa olemassa, joten päätelmiä joudutaan tekemään joko mallinnuksien tai kansainvälisten kokemusten perusteella. Yksinomaan ekohydraulisiin mallinnoihin perustuviin arvioihin liittyy epävarmuuksia toimenpiteiden hyötyjen arvioinnin kannalta. Tarkempi tieto siitä kuinka merkittäviä ekologisia hyötyjä voidaan saavuttaa, millaisissa olosuhteissa vaikutukset ilmenevät ja kuinka voimakkaasti säännöstelyä tulisi rajoittaa hyötyjen saavuttamiseksi olisi tärkeää toimenpiteiden kustannustehokkaan kohdentamisen kannalta. Tiedolla olisi myös suurta merkitystä voimakkaasti muutettujen jokien ekologisen potentiaalin ja tila-arvioinnin kannalta.

## 4 Ympäristötoimenpiteiden tarkastelu esimerkivoimalaitoksissa

Tässä raportissa mallinamme kaksi edustavan vesivoimalaitoksen tapaista: pienen 10 MW ja suuren 50 MW voimalaitoksen. Esimerkivoimalaitosten avulla havainnollistetaan skenaarioitujen vesienhoitotoimien, eli 'Keskivirtaama –2 %', 'Minimivirtaama +10 %' ja 'Keski- ja minimivirtaama', vaikutuksia vesivoimalaitoksen tuotantotuloihin ja reservitarjontaan Suomen sähkömarkkinaympäristössä. Hankkeen resursseilla ei ole mahdollista mallintaa useiden todellisten vesivoimalaitosten toimintaa eri skenaarioissa, eikä hanke keskity vain tietyn voimalaitoksen tai vesistön vesienhoitotoimiin. Lisäksi hanketoimijoilla ei ole käytettävissä yksittäisten vesivoimalaitosten tarjontapäätöksiä eri reservimarkkinatuotteisiin. Tästä syystä tarkastelu tehdään esimerkivoimalaitoksia hyödyntäen mallikehikolla, jossa vesivoimalaitosten toimintaympäristö yleistetään koko Suomen vesivoima-aineiston pohjalta.

Skenaarioiden tarkastelussa simuloituja tuloksia verrataan 'Nykysäätökyky' – skenaarioon. Kyseiseen skenaarioon verrattuna 'Keskivirtaama –2 %' -skenaariossa vesivoiman kokonaistuotanto vähenee 2 %, koska 2 % sisäänvirtaamasta tulee ohjata ohi turbiinien. Vesivoimatuottaja voi edelleen hyödyntää samoja tuotantorajoja kuin 'Nykysäätökyky' – skenaariossa. 'Minimivirtaama +10 %' – skenaariossa voimalaitoksen minimivirtaamavaatimusta nostetaan siten, että minimi- ja maksimituotantotasojen erotus kapenee 10 %. Minimivirtaaman nosto ei vähennä käytettävissä olevaa energiamäärää, mutta muuttaa osan energiasta tasaiseksi *base load*-tuotannoksi, jota ajetaan samalla tasolla läpi vuoden. 'Keski- ja minimivirtaama' – skenaariossa käytettävissä oleva tuotantoenergiamäärä vähenee 2 % ja vesivoiman käytettävissä oleva maksimi- ja minimi-tuotantorajojen välinen tuotantoalue rajoittuu 10 % minimivirtaaman noston vuoksi.

Säätöreservien varaamisen vaihtoehtokustannus vesivoimatuottajalle on menetetty tulo päivää edeltäviltä sähkön vuorokausimarkkinoilta (Hirth ja Ziegenhagen, 2015). Koordinoitu vuorokausi- ja reservimarkkinatarjonta johtaa korkeampiin tuotantorajoitukseen alhaisilla sähköhinnoilla ja alhaisempiin tuotantorajoitukseen korkeilla sähköhinnoilla päivää edeltävillä vuoromarkkinoilla, lisäten siten tuottajan joustavuutta tarjota alas- ja ylössäätöä tunnin sisäisillä reservimarkkinoilla (Klæboe ym., 2022). Klæboe ym. (2022) laskevat koordinoidun vuorokausi- ja reservimarkkinatarjonnan hyödyn vesivoimatuottajalle eri skenaarioissa. He osoittavat, että koordinoitu tarjonta johtaa vain vähäiseen 0,1 % tulojen lisääntymiseen nykyisissä markkinaolosuhteissa. Kuitenkin skenaarioissa, joissa tasapainotusta tarvitaan nykyistä enemmän, koordinoitu tarjonta johtaa 3,9–6,0 % tulojen lisääntymiseen. Koordinoidun monimarkkinatarjonnan kannattavuus voi täten parantua tulevaisuudessa, jos säätökykyisten reservien tarve sähköjärjestelmässä kasvaa.

Vesivoimalaitosten toiminta muuttaa virtaamaolosuhteita vesistöissä. Schillinger ym. (2020) jakavat vesivoiman vaikutukset luonnon virtaamiin kolmeen tasoon. Ensimmäinen taso on vesivoiman vaikutus luonnon virtaamiin patoamisen ja veden varastoimisen vuoksi. Toinen taso on vesivoiman toiminnan vaikutus virtausdynamiikkaan, kun turbiinivirta vapautetaan sähkömarkkinaolosuhteiden perusteella. Ympäristövirtausrajoitusten vaikutuksia vesivoimaloiden vesivaraston käyttöön ja turbiinivirtauksen purkamiseen on tutkittu laajasti (Schäffer ym., 2020).

Kolmas taso poikkeamisessa luonnollisista virtaamista aiheutuu vesivoiman toiminnasta sekä vuorokausi- että reservimarkkinoilla (Schillinger ym., 2020). Yleisesti ympäristötoimien vaikutuksia vesivoiman reservimarkkinatarjontaan on tutkittu akateemisessa kirjallisuudessa vielä vähän (Rand, 2018). Shillinger ym. (2020) tutkivat ympäristövirtausrajoituksen vaikutusta tapauksessa, jossa vesivoimalatuottaja tarjoaa energiaa ainoastaan päivää edeltävillä sähkön vuorokausimarkkinoilla, sekä tilanteessa, jossa vesivoimalatuottaja toimii sekä vuorokausimarkkinoilla että tunnin reservimarkkinoilla. Saksan sähkömarkkinoiden tapaustutkimuksella he osoittavat, että ympäristötoimista johtuva tulojen menetys on suurempi monimarkkinatilanteissa, jossa vesivoimalatuottaja tarjoaa sekä vuorokausi- että reservimarkkinoille. Rand (2018) tutkii ympäristövirtaamarajoitusten vaikutuksia vesivoimalaitoksen toimintaan Kaliforniassa. Mallinnettu ympäristövirtaamarajoitus vähensi voimalaitoksen keskimääräistä tuotantoa 6 %, mutta lisäsi voimalaitoksen ylös- ja alassäädön tarjontaa 2 %.

## 4.1 Edustava vesivoimalaitos

Mallinamme kahden esimerkkivoimalaitoksen toimintaa eri markkinaskenaarioissa (Kuvio 1). Pienemmän vesivoimalaitoksen skenaariossa tuotantolaitoksen nimellistehoksi asetetaan 10 MW. Oletamme, että vesivoimalaitos tarjoaa kapasiteettia FCR-N-reservien tuntimarkkinoille ja energiaa vuorokausimarkkinoille. Suuremman vesivoimalaitoksen skenaariossa tuotantolaitoksen nimellistehoksi asetetaan 50 MW. Oletamme, että vesivoimalaitos tarjoaa kapasiteettia automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) ja säätösähkömarkkinoiden (mFRR) markkinapaikoille sekä energiaa vuorokausimarkkinoille.

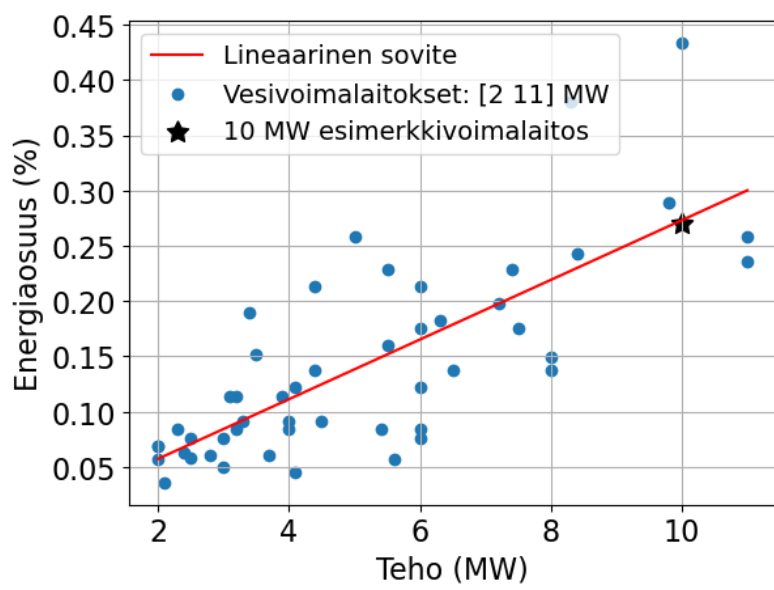
Mallinnetut esimerkkivoimalaitokset eivät kuvaa yksittäistä olemassa olevaa vesivoimalaitosta. Suomen vesivoimalaitokset voivat erota suuresti kyvyssään tarjota lyhytaikais-säätöä johtuen eroista esimerkiksi järvien vedenpinnan säännöstelyrajoissa, jäädytysajojen tarpeesta tai lyhytaikaissäännöstelylupien sallivuudesta. Edustavien voimalaitosten vuosienenergiamäärät ja säätökyky on johdettu yleisesti saatavilla olevan sähkömarkkina- ja vesivoimatuoantoinen pohjalta. Arviot kuvastavat täten Suomen ve-

sivoimatuotantoa yleisellä tasolla. Vesistö- tai voimalaitoskohtainen analyysi vaatii tarkempaa tietoa laitosten todellisista energian säännöstelyrajoista vuositason tasolla aina tunnin sisäiseen säätökykyyn. Arviot edustaville vesivoimalaitoksille esitetään seuraavissa alaluvuissa.

### 4.1.1 Energiaosuus

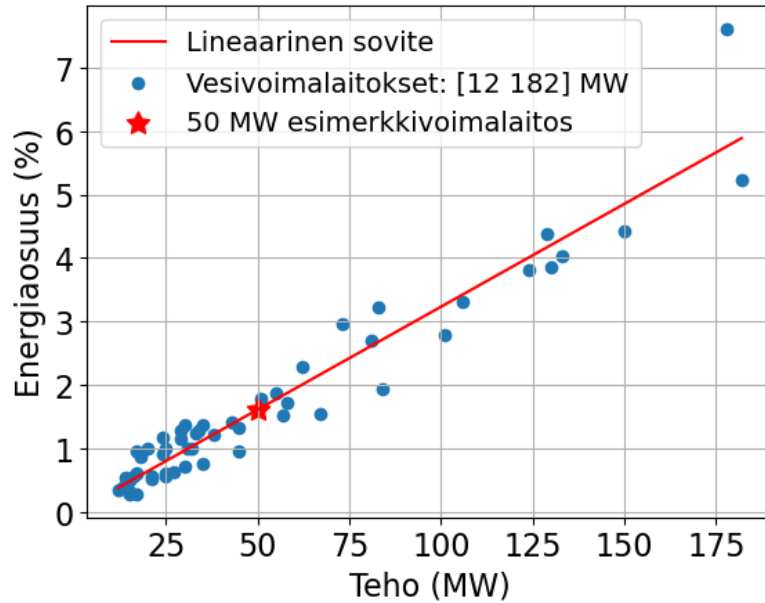
Käytämme vesivoimalaitoskohtaisia arvioita voimalaitosten vuosienenergialle ja nimellisteholle edustavan voimalaitoksen energiaosuuden arviointiin (Vesirakentaja, 2019). Kuviossa 6 esitetään lineaarinen sovite 2 MW – 11 MW vesivoimalaitosten tehon ja energiaosuuden välillä. Aineiston perusteella arvioidaan lineaarisen soviteen avulla 10 MW voimalaitoksen osuudeksi Suomen vesivoimatuotannosta 0,27 %.

**Kuvio 6.** Suomen 2 MW – 11 MW vesivoimalaitosten teho ja osuus vesivoimalla tuotetusta energiasta. Mallinnetun 10 MW voimalaitoksen energiaosuus merkitty mustalla tähdellä. Aineisto: Vesirakentaja (2019).



Lineaarisen soviteen avulla arvioidaan myös edustavan 50 MW voimalaitoksen energiaosuus hyödyntäen 12 MW - 182 MW vesivoimalaitosten teho- ja vuosienenergia-arvioita (Vesirakentaja, 2019). Kuvion 7 mukaisesti 50 MW voimalaitoksen osuudeksi Suomen vesivoimatuotannosta sovitetaan 1,61 %.

**Kuvio 7.** Suomen 12 MW – 128 MW vesivoimalaitosten teho ja osuus vesivoimalla tuotetusta energiasta. Mallinnetun 50 MW voimalaitoksen energiaosuus merkitty mustalla tähdellä. Aineisto: Vesirakentaja (2019).



#### 4.1.2 Vesivoimatuotannon säätökyvyn arviointi

Hyödynnämme vuoden 2021 3 minuutin vesivoimatuotantoaineistoa Suomen vesivoimaloiden tunnin sisäisen säätökyvyn arviointiin (Fingrid Avoin data, 2024). Jakaumat tuotantomuutoksille (MW) 3, 6 ja 15 minuutin tasolla esitetään Taulukossa 2 eri persentiilitasoilla. Persentiili ilmaisee, kuinka suuri osa aineistosta asettuu kyseisen arvon alapuolelle. Esimerkiksi 2,5 persentiiliin alapuolelle sijoittuu 2,5 % aineistosta. Taulukosta 2 nähdään, että 95 prosenttia vesivoimatuotannon muutoksista 3 minuutin aikavälillä sijoittuu alueelle  $[-39,8 \ 42,3]$  MW. Vastaavasti 15 minuutin aikavälillä vesivoimatuotannon muutoksista 95 prosenttia sijoittuu alueelle  $[-125,0 \ 134,5]$  MW.

**Taulukko 2.** Suomen vesivoimatuotannon muutos (MW) 3, 6 ja 15 minuutin aikavälein vuonna 2021.

	Persentiili:					
	0,1	2,5	25,0	75,0	97,5	99,9
3 minuutin aikavälein	-113,1	-39,8	-8,5	8,2	42,3	108,4
6 minuutin aikavälein	-173,2	-65,8	-14,4	13,7	70,3	173,1
15 minuutin aikavälein	-291,3	-125,0	-29,0	27,1	134,5	293,8

Suhteutamme Taulukon 2 tuotantovaihtelut arvioon säätökykyisen vesivoimatuotantokapasiteettiin Suomessa. Oletamme, että noin 1750 MW Suomen vesivoimatuotantokapasiteetista kykenee säätöön (Pöyry, 2018a). Taulukon 2 muutokset 3, 6 ja 15 minuutin aikavälein suhteessa säätökykyiseen kapasiteettiin esitetään Taulukossa 3. Jakauman hännissä 0,1 ja 99,9 persentiilitasoilla vesivoima on vaihdellut 3 minuutin aikavälillä noin 6 % nimellistehostaan alas- ja ylöspäin. Vastaavasti vesivoimatuotannon vaihtelu on ollut noin 10 % säätökykyisestä kapasiteetista 6 minuutin aikavälillä ja noin 17 % säätökykyisestä kapasiteetista 15 minuutin aikavälillä.

Oletamme Taulukon 3 säätöarvion mukaisesti varmuusmarginaalia jättäen, että yksittäinen vesivoimalaitos kykenee tarjoamaan FCR-N-reservimarkkinapaikalle (3 minuutin aktivointiaika) säätökykyistä kapasiteettia 5 % nimellistehostaan ja aFRR-markkinapaikalle (5 minuutin aktivointiaika) 8 % nimellistehostaan. mFRR-markkinapaikalle (15 minuutin aktivointiaika) oletamme Pöyry (2018a) raportin mukaisesti, että vesivoimatuottaja voi tarjota maksimissaan 25 % nimellistehosta. On huomattava, että käytetty arvio on korkeampi kuin Taulukon 3 havaitusta vesivoimatuotannon muutoksista laskettu arvio vesivoimatuotannon muutokselle suhteessa säätökykyiseen kapasiteettiin.

**Taulukko 3.** Suomen vesivoimatuotannon muutos suhteessa (%) säätöön kykenevään kapasiteettiin\* vuonna 2021.

	Persentiili:					
	0,1	2,5	25,0	75,0	97,5	99,9
3 minuutin aikavälein	-6,5	-2,3	-0,5	0,5	2,4	6,2
6 minuutin aikavälein	-9,9	-3,8	-0,8	0,8	4,0	9,9
15 minuutin aikavälein	-16,6	-7,1	-1,7	1,5	7,7	16,8

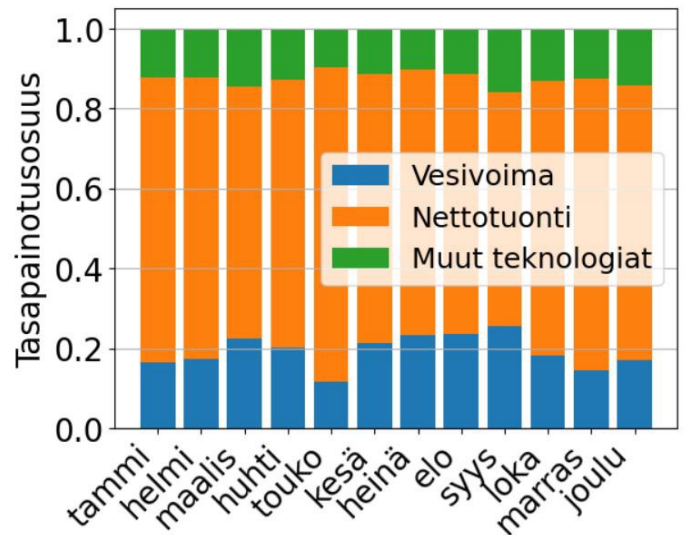
Taulukossa 2 esitetyn tunnin sisäisen vesivoimatuotannon vaihtelun roolia sähköjärjestelmän tasapainottajana voidaan mitata tasapainotusosuuden  $C_{k,h}$  avulla. Vektori  $\mathbf{X}_h = (\mathbf{X}_{h,1}, \mathbf{X}_{h,2}, \dots, \mathbf{X}_{h,20})'$  kuvaa tuotantoteknologian tai nettotuonnin  $k$  keskimääräistä tehoa (MW) 3 minuutin ajanjaksolla vuoden tunnille  $h$ . Havaintoja per tunti on 20 kappaletta. Tuotantoteknologian  $k$  tunnin  $h$  tasapainotusosuus lasketaan seuraavasti:

$$C_{k,h} = \frac{\text{cov}(\mathbf{X}_h, \mathbf{R}_h)}{\text{var}(\mathbf{R}_h)}, \forall h \in \{1, \dots, H\}, \quad (1)$$

missä kovarianssi  $\text{cov}(\mathbf{X}_h, \mathbf{R}_h)$  mittaa kuinka läheisesti tuotannon arvo  $\mathbf{X}_h$  ja jäännöskysyntä  $\mathbf{R}_h$  tunnin  $h$  sisällä vaihtelevat yhdessä. Tuotantoteknologian  $k$  tasapainotusosuutta  $C_{k,h}$  laskettaessa kovarianssi normalisoidaan jäännöskysynnän varianssilla (Lönnerberg ja Bladh, 2016).

Kuviossa 8 esitetään vesivoiman, nettotuonnin ja -viennin sekä muiden teknologioiden tasapainotusosuudet vuodelle 2021. Vesivoimatuotannon vaihtelu 3 minuutin tasolla tasapainotti Suomen sähköjärjestelmän jäännöskysynnän (kulutus – tuulivoimatuotanto) tunnin sisäisestä vaihteluista noin 19,3 % vuonna 2021 (Kuvio 8). Pääosan, 68,2 %, jäännöskysynnän tunnin sisäisestä tasapainotuksesta kattoi nettotuonti ja -vientit.

**Kuvio 8.** Vesivoiman, nettotuonnin ja muiden teknologioiden tunnin sisäinen jäännöskysynnän tasapainotusosuus vuonna 2021. Aineisto: Fingrid, Avoin data (2024).



Vesivoima edustaa kuitenkin suurinta osaa Suomessa tilatusta reservituotteista (Fingrid, 2022a). Vuoden 2021 vesivoiman kuukausittaisen eri reservituotteiden energiaosuuksien, reservituotteiden tilattujen määrien ja hintojen, sekä sähkön tuntimarkkinahintojen perusteella voidaan arvioida vesivoimatuotannon korvaus sähkön vuorokausimarkkinoilta sekä eri reservimarkkinapaikoilta (Taulukko 4). Vesivoiman tuotantotuloista 96 % koostui vuorokausimarkkinatuloista ja noin 4 % reservimarkkinatuloista.

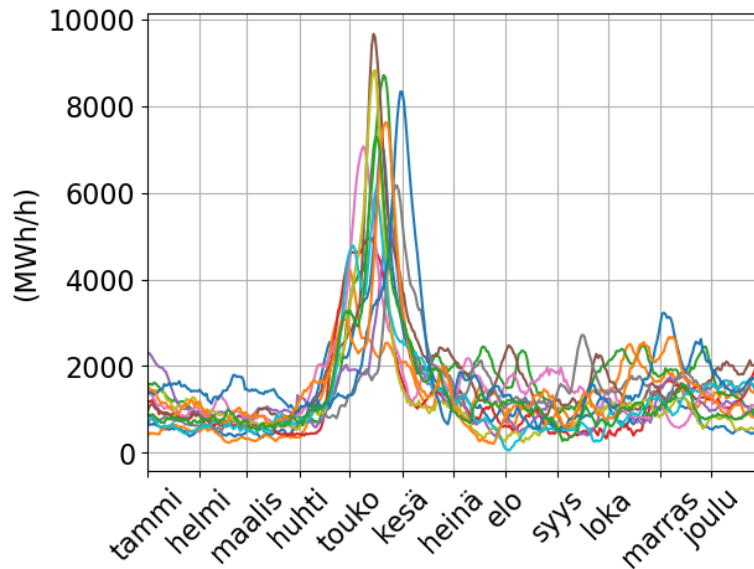
**Taulukko 4.** Vesivoimatuotannon korvaus eri markkinapaikoilta (vuosi 2021).

	Vuorokausimarkkina	Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)	Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR)	Säätösähkömarkkinat (mFRR)
Tulot (M€)	1194,4	8,4	22,2	17,2
Osuus kokonaistuotosta (%)	96,1	0,7	1,8	1,4

### 4.1.3 Tulovirtaama ja varastointirajoitukset

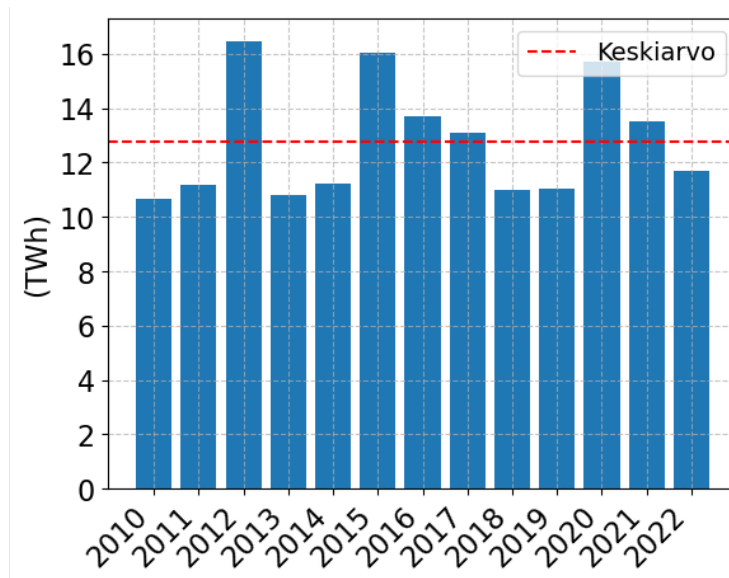
Mallinnetut vesivoimalaitokset kohtaavat tulovirtaamaprofiilin yläaltaaseen, johon liittyy epävarmuutta. Käytämme Suomen vesivoimalle arvioituja tulovirtaamaprofiileja vuosilta 2010–2022 kuvaamaan mallinnettujen esimerkkivoimalaitosten toimintaympäristöä tulovirtaaman suhteen. Skaalaamme tulovirtaamat pienelle 10 MW voimalaitokselle ja suurelle 50 MW voimalaitokselle hyödyntäen arvioituja energiaosuuksia laitoksille (katso Kuvio 6 ja Kuvio 7).

**Kuvio 9.** Tulovirtaamaprofiilit vuosina 2010–2022. Aineisto: Ympäristöhallinnon verkkopalvelu (2024).



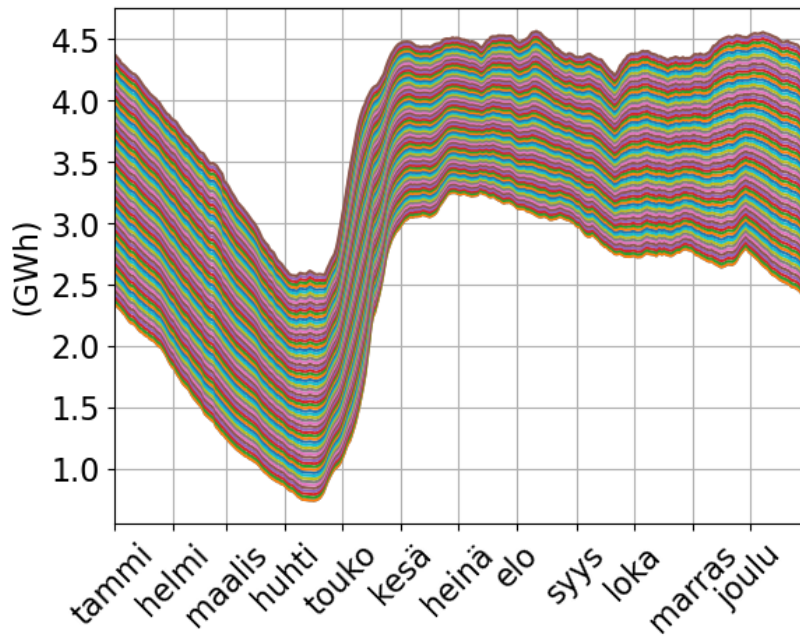
Käytetyt tulovirtaamaprofiilit kuvaavat erilaisia vesivuosisia (Kuvio 9). Keskimääräinen tulovirtaaman vuosienenergia on ollut 12,78 (TWh). Minimissään tulovirtaaman vuosienenergia on ollut 10,66 (TWh) ja maksimissaan 16,46 (TWh).

**Kuvio 10.** Tulovirtaamaprofiilien vuosisumma vuosina 2010–2022. Aineisto: Ympäristöhallinnon verkkopalvelu (2024).



Yläaltaan energiamäärän rajat perustuvat Suomen vesivoimaloiden yläaltaiden energiamäärän vaihteluun vuosina 2010–2022. Energiamäärärajoitukset skaalataan energiaosuusarvioiden mukaisesti pienelle ja suurelle voimalaitokselle.

**Kuvio 11.** Altaiden energiamäärä vuosina. Vuosien 2010–2022 minimi- ja maksimiarvot, sekä 75 pistettä ääriarvojen välissä. Aineisto: Ympäristöhallinnon verkkopalvelu (2024).



#### 4.1.4 Reservimarkkinapaikat

Mallinamme reservituotteiden  $r \in \{FCR - N, aFRR, mFRR\}$  hinnat  $p^r$  eri skenaarioissa sähkön vuorokausimarkkinoiden tuntihinnan  $p^s$ , tilatun reservimäärän  $q^r$  ja kuukauden funktiona. Reservituotteen tuntihintaa selitetään lineaarisen regressiomallin avulla seuraavasti:

$$p^r = \beta_0 + \beta_1 q^r + \beta_2 p^s + \sum_{i=1}^{11} \gamma_i \text{kuukausi}_i + \epsilon, \quad (2)$$

missä  $\beta_0$  on regressioyhtälön vakiotermi,  $\beta_1$  on tilatun säätömäärän  $q^r$  kerroin,  $\beta_2$  on sähkön vuorokausimarkkinoiden tuntihinnan  $p^s$  kerroin,  $\gamma_i$  on kuukausien ( $\text{kuukausi}_1, \dots, \text{kuukausi}_{11}$ ) kerroin ja  $\epsilon$  on regressioyhtälön virhetermi.

Regressioyhtälö (2) sovitetaan vuoden 2023 sähkömarkkina-aineiston avulla. Taulukko 5 esittelee kertoimet eri reservituotteiden hintamalleille. Tilattu reservimäärä,  $q^r$ , on tilastollisesti merkitsevä 1 %:n tasolla kaikissa hintamalleissa. Tilatun määrän lisäys kasvattaa reservituotteen hankinnan kustannusta, eli mFRR markkinoiden ylös- ja alassäätohintojen erotus kasvaa sekä aFRR- ja FCR-N-markkinoiden kapasiteettihinta kasvaa, kun reservituotetta tilataan enemmän markkinapaikalta. Vuorokausimarkkinoiden -tuntihinta,  $p^s$ , selittää reservihintoja 1 %:n merkitsevyystasolla kaikilla muilla markkinoilla paitsi FCR-N tuntimarkkinoilla.

**Taulukko 5.** Lineaarisen regressiomallin kertoimet mFRR, aFRR ja FCR-N markkinoiden hinnoille.

Suunta	mFRR (MWh)		aFRR (MW)		FCR-N (MW)
	alas	ylös	alas	ylös	tuntimarkkina
Määrä (itseisarvo)	-0,258* (0,009)	0,598* (0,027)	0,165* (0,013)	0,301* (0,016)	1,196* (0,023)
Tuntihinta	0,469* (0,014)	1,621* (0,055)	-0,024* (0,002)	0,252* (0,004)	-0,008 (0,008)
Kuukaudet kontrolloitu	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Selitysaste ( $R^2$ )	0,470	0,375	0,456	0,426	0,425

\*Tilastollisesti merkitsevä 1 %:n tasolla.

Regressioyhtälöiden avulla tuotetaan hintasarjat eri reservituotteille mallinnetuille skenaarioille. Sähkön vuorokausimarkkinoiden tuntihintojen osalta käytetään sähkömarkkinamallin tuntihintaprofiileja (katso Luku 4). Tilatun reservimäärän osalta hyödynnetään vuosien 2020–2023 hankintaprofiileja. '2023 Toisinto' – skenaariossa hyödynnetään alkuperäisiä hankintamääriä. Tulevaisuuden skenaarioissa reservimäärien suhteen olettamme, että hankitut reservimäärät aFRR ja mFRR markkinapaikoilla kasvavat tasaisesti 134 %:lla 'Tuuli 36' -skenaarioon mentäessä. Täten, verrattuna '2023 Toisinto' – skenaarioon reservimäärät kasvavat 45 %:lla 'Tuuli 12' – skenaariossa ja 89 % :lla 'Tuuli 24' – skenaariossa. Skenaarioihin valittu reservimäärien kasvuprosentti perustuu kantaverkkoyhtiö Fingridin arvion reservien kasvutarpeista tuleville vuosille (Fingrid, 2024). FCR-N markkinoille emme oleta kasvua hankintamäärissä, koska hankittuun määrään liittyy epävarmuutta tulevien vuosien suhteen. FCR-N markkinoiden hintojen

suhde vuorokausimarkkinoiden keskihintaan pidetään samalla tasolla kaikissa skenaarioissa.

Taulukossa 6 esitetään reservituotteiden keskihintojen kehitys eri skenaarioissa. FCR-N reservituotteelle mallinnetaan vain 2023 pienen 10MW voimalaitoksen tapauksessa mallinnettavat vesienhoitoskenaariot 'Nykysäätökyky' ja 'Keskivirtaama -2 %'. Reservituotteiden keskihinoista huomataan, että kapasiteetista (MW) maksettava korvaus kasvaa FCR-N- ja aFRR-markkinapaikoilla tulevaisuuden sähköjärjestelmäskenaarioissa. Samoin mFRR-markkinapaikalla ylös- ja alassäätöenergiasta maksettavien hintojen erotus suurenee, eli markkinatuotteen tarjoamisen kannattavuus paranee tulevaisuuden sähköjärjestelmäskenaarioissa.

**Taulukko 6.** Reservituotteiden keskihinnat vuonna 2023 ja mallinnetuissa skenaarioissa. Viimeisessä sarakkeessa esitetään negatiivisten mFRR alasäätohintojen prosenttiosuus kaikista alassäätohintien hinnoista..

	FCR-N tunti- markkina (€/MW)	aFRR (€/MW)		mFRR (€/MWh)		mFRR alas (neg. hintojen osuus)
Suunta		alas	ylös	alas	ylös	
Data 2023	47,1	29,5	40,9	19,7	85,5	25,5 %
<b>2023 Toisinto</b>						
Nykysäätoiky	34,3	30,0	38,3	20,4	100,5	26,2 %
Keskivirtaama -2 %	34,6	30,0	38,4	20,5	100,8	26,1 %
Minimivirtaama +10 %	---	30,0	38,3	20,4	100,6	26,4 %
Keski- ja minimivirtaama	---	30,0	38,4	20,5	100,9	26,2 %
<b>Tuuli 12</b>						
Nykysäätoiky	33,6	33,6	44,7	10,9	121,1	34,8 %
Keskivirtaama -2 %	33,7	33,6	44,7	11,0	121,4	34,8 %
Minimivirtaama +10 %	---	33,6	44,7	10,9	121,2	34,9 %
Keski- ja minimivirtaama	---	33,6	44,8	11,1	121,6	34,8 %
<b>Tuuli 24</b>						
Nykysäätoiky	42,0	36,8	55,3	8,4	167,6	39,2 %
Keskivirtaama -2 %	42,2	36,8	55,4	8,5	168,0	39,1 %
Minimivirtaama +10 %	---	36,8	55,4	8,5	167,8	39,2 %
Keski- ja minimivirtaama	---	36,8	55,5	8,6	168,7	39,1 %
<b>Tuuli 36</b>						
Nykysäätoiky	49,3	40,1	65,5	5,0	211,4	43,9 %
Keskivirtaama -2 %	49,6	40,1	65,6	5,2	212,0	43,9 %
Minimivirtaama +10 %	---	40,1	65,5	5,1	211,8	43,9 %
Keski- ja minimivirtaama	---	40,1	65,7	5,4	212,5	43,8 %

On huomattava, että käytetty reservimarkkinahintojen mallinnustapa (Kaava 1) olettaa lineaarisen yhteyden tilatun säätömäärän ja säätötuotteen hinnan välillä. Skenaarioiden reservimarkkinahintojen tasot perustuvat oletukseen, että sama yhteys pätee myös tulevaisuuden sähköjärjestelmäskenaarioissa, joissa tilatut säätömäärät kasvavat. Käytetty 134 % kasvuoletus mFRR-markkinapaikalle tilatulle säätöenergialle tarkoittaa ääritapauksissa noin 482 MWh lisäystä ylös- ja allassäätöenergian tarpeeseen<sup>36</sup>. aFRR-markkinapaikalle vastaava kasvuoletus tarkoittaa noin 107 MW säätökykyistä kapasiteettia alaspäin ja 141 MW säätökykyistä kapasiteettia ylöspäin<sup>37</sup>.

Uusina säätöresursseina voivat toimia esimerkiksi kaukolämpöverkon sähkökattilat, joissa kapasiteetin kasvu julkistettujen investointipäätösten perusteella on noin 1500 MW lähivuosien aikana (Heikkilä, 2024). Erityisesti sähkökattilat lämpövaraston kanssa yhdistettynä soveltuvat hyvin lyhytaikaissäätöön. Myös suuren mittakaavan akkujärjestelmät soveltuvat hyvin taajuudensäätöön. Akkujärjestelmien investointikustannusten on skenaarioitu laskevan tasolta 290 \$/kWh tasolle 175 \$/kWh vuosin 2022 ja 2030 välillä (IEA, 2024). Suomen kantaverkkoon onkin jo liittynyt satoja megawatteja (MW) akkuvarastoja, ja rakenteilla on saman verran lisää (Yle, 2024). Samoin pumppuvoimalaitokset kykenevät teknisesti auttamaan sähköverkon vakauden ylläpidossa tasapainottamalla kysynnän ja tarjonnan vaihteluita (IRENA, 2020). Mahdolliset investoinnit pumppuvoimalaitoksiin, esimerkiksi Kemijoella Ailangantunturin 550 MW ja Askanaavan 500 MW hankkeet tai Pyhäsalmen maanalainen 75 MW pumppuvoimalaitos, tulisivat toteutuessaan mahdollistamaan säätöresursseja sähköverkon vakauden ylläpitoon (Fingrid, 2024b). Tuulivoiman mahdollisuudet toimia säädettävänä reservinä ovat teknisesti hyvät (Fingrid, 2022b). Tuulivoima voi tarjota allassäätöä rajoittamalla hetkellistä tuotantotehoa. Myös ylössäätö on mahdollista, jos osa ennustetusta tuotantotehosta on jätetty tarjoamatta vuorokausimarkkinoille. Sähköjärjestelmässä voi olla myös säätösähkömarkkinoiden ulkopuolista joustopotentialia, joka markkinaolosuhteiden muuttuessa tai teknisen kehityksen myötä voi aktivoitua tarjoamaan säätökapasiteettia reservimarkkinapaikoille. Fingridin sähköjärjestelmän vapaaehtoisen tuen mekanismiin ilmoitettiin 500 MW joustopotentialia syksyllä 2022. Fingridin tavoitteena on saada joustoresurssit laajasti eri markkinapaikoille (Fingrid, 2023b).

Säätömäärien lisäys voidaan täyttää mahdollisesti usean erilaisen joustokykyisen resurssin toimesta. Reservimarkkinoiden hintatasoon tulevaisuudessa liittyikin paljon epävarmuutta, koska yllä luetellut erilaiset säätökykyiset resurssit voivat tarjota reservi-

<sup>36</sup> Vuosien 2020-2023 aineistossa 99 prosenttia hankitusta säädöstä mFRR-reservituotteessa asettuu  $\pm 360$  MWh:n haarukkaan. Näin ollen  $1,34 \cdot 360$  MWh = 482 MWh vastaa tarvittavaa lisäsäätöresurssia 134 %:n kasvuoletuksella.

<sup>37</sup> Vuosien 2020-2023 aineistossa 99 prosenttia hankitusta kapasiteetista aFRR-reservituotteessa asettuu -80 – 105 MW:n haarukkaan. Näin ollen  $1,34 \cdot (-80)$  MWh = -107 MW ja  $1,34 \cdot 105$  MW = 141 MW vastaa tarvittavaa lisäsäätöresurssia 134 %:n kasvuoletuksella.

markkinapalveluita hyvin erilaisin kustannuksilla. Tässä raportissa emme arvioi eri teknologioiden taloudellista kannattavuutta tulevaisuuden skenaarioiden markkinapaikoilla. Oletamme, että aiempi yhteys tilatun reservimäärän ja hinnan välillä pätee tulevaisuuden sähköjärjestelmäskenaarioissa. Taulukon 6 reservituotteiden hintatulemat kuvaavat siten skenaario-oletusten, eli tilatun reservimäärän kasvun ja lineaarisen yhteyden reservimäärän ja -hinnan välillä, vaikutusta reservihintoihin. Yleisesti tilatun määrän lisääntyessä tulovirtapotentiali reservimarkkinapaikoilta paranee tulevaisuuden skenaarioissa.

## 4.2 Voimalaitoskohtaiset parametrit

Oletetaan, että mallinnettavalla pienellä 10 MW esimerkivoimalaitoksella on käytössä yksi Kaplan-turbiini. Oletamme, että pienellä vesivoimalaitoksella käytettävissä oleva virtaama turbiinikoneiston läpi on rajallinen, jolloin yksi turbiini voi hyödyntää saatavilla olevan vesimäärän tehokkaasti. Yhden Kaplan-turbiini laitoksia ovat esimerkiksi Palokki (7,4 MW), Katerma (12,5 MW) ja Kallioinen (13,5 MW) (Viialainen, 2022; ARVOVESI, 2022). Yhden Kaplan-turbiinin tapauksessa maksimihyötysuhdealue turbiinivirtaamalle on noin 30 % – 100 % rakennevirtaamasta. Mallinnettu voimalaitos voi siten tarjota tuotantoa sähkön vuorokausituntimarkkinoille tuotantoalueella  $q \in [\underline{q} = 3.0, \bar{q} = 10.0]$  (MWh). Pieni voimalaitos voi myös valita nollavirtaamapäivän, jolloin vettä ei ajeta turbiinien läpi lainkaan<sup>38</sup>. Tällöin voimalaitos ei voi tarjota kapasiteettia FCR-N -reservimarkkinapaikalle.

Oletetaan, että mallinnettavalla suurella 50 MW esimerkivoimalaitoksella on käytössä useampi Kaplan-turbiini, jolloin vesivoimatuotannon hyötysuhde voidaan pitää korkeana laajalla virtaama-alueella. Useamman kuin yhden Kaplan-turbiinin voimalaitoksia on yleensä suuremman virtaaman vesistöissä, joissa saatavilla oleva vesimäärä riittää jaettavaksi 2–3 turbiinille. Useampi Kaplan-turbiini on käytössä esimerkiksi Kemijoella mereltä katsottuna alimmilla Kemijoki Oy:n voimalaitoksilla (3 kpl), lijoella PVO-Vesivoima Oy:n voimalaitoksilla (2 tai 3 kappaletta) sekä Oulujoen pääuoman Fortum Oy:n voimalaitoksilla (Lähde: Yritysten verkkosivut). Juoksutusrajoitukset ja käytännöt vaihtelevat vesivoimaloiden välillä. Tässä mallinnuksessa oletamme, että 50 MW voimalaitos ei aja koskaan nollavirtaama-alueella, ja asetamme voimalaitokselle minimivirtaamarajoitteen, joka on 5 % nimellisvirtaamasta. Voimalaitos voi siis tarjota tuotantoa sähkön vuorokausimarkkinoille tuotantoalueella  $q \in [\underline{q} = 2.5, \bar{q} = 50.0]$  MWh.

<sup>38</sup> 1–10 MW vesivoimalaitoksista 29 prosentilla ei ole lupaehtoissa minimivirtaamamääräystä, ja näillä laitoksilla esiintyy nollavirtaamia. Vastaavasti yli 10 MW voimalaitoksista 47 prosentilla ei ole lupaehtoissa minimivirtaamamääräystä (AFRY, 2020).

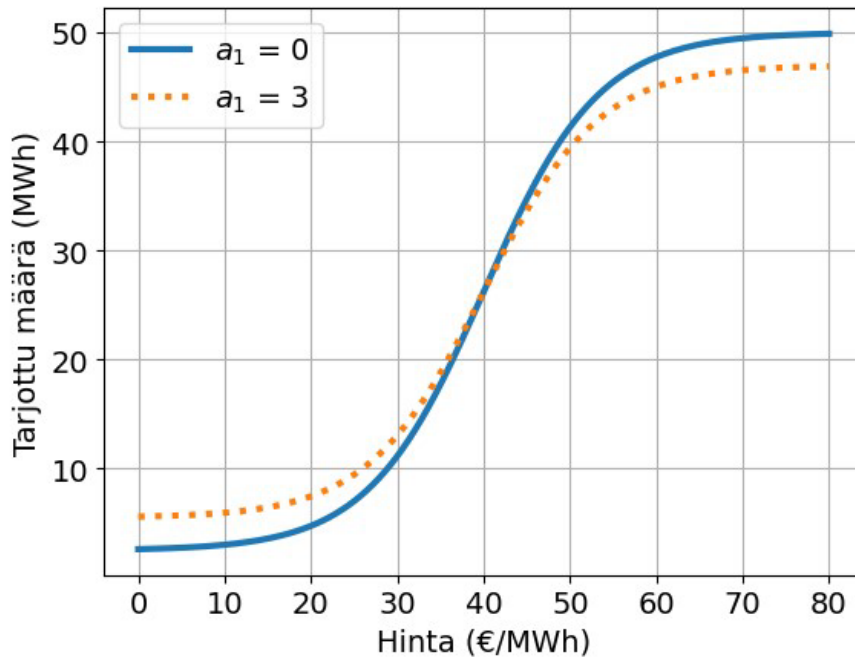
Vesivoimatuottajan valinta on toimintavektori  $\mathbf{a} = [a_1, a_2, a_3] \in \mathbf{A}$ , jonka mukaisesti määräytyy seuraavan päivän tuotantotaso sähkön vuorokausimarkkinalla tarjousfunktion  $q(\mathbf{a}, p_s)$  mukaisesti:

$$q(\mathbf{a}, p_s) = \minTarjous(a_1) + \frac{\maxTarjous(a_1) - \minTarjous(a_1)}{1 + e^{-a_2(p_s - a_3)}}, \quad (3)$$

missä  $\minBid(a_1) = \underline{q} + a_1$  and  $\maxBid(a_1) = \bar{q} - a_1$ .

Parametri  $a_1$  määrittää tason, joka jätetään minimi- ja maksimituotantojen ylä- ja alapuolelle päivää ennen tarjontakäyrään. Kuviossa 12 havainnollistetaan parametrin  $a_1$  vaikutusta tarjontakäyrän muotoon suuren voimalaitoksen tapauksessa. Parametri  $a_2$  vaikuttaa tarjontakäyrän jyrkkyyteen ja parametri  $a_3$  asettaa tarjontakäyrän hintatason, jolla tarjotaan puolet maksimikapasiteetista.

**Kuvio 12.** Esimerkki sähkön vuorokausimarkkinoiden tarjontafunktiosta. Tuotantolaitoksen maksimituotanto per tunti on 50 (MWh) ja minimituotanto per tunti on 2.5 (MWh).



Vesivoimatuotannon allokointi tapahtuu mallissa seuraavasti. Vuoden päivä  $t \in \{1, \dots, T = 365\}$  toimii ensimmäisenä tilamuuttujana. Vesivoimatuottaja huomioi päivälle  $t$  sisäänvirtaavan energian määrän  $i_t$  ja vertaa tätä ajanjakson keskiarvoon  $\bar{i}_t$ . Reali-soituneen sisäänvirtaavan energian suhde ajanjakson keskiarvoon  $i_t^s = i_t / \bar{i}_t$  toimii toisenä tilamuuttujana. Vesivoimatuottaja havainnoi varastoituneen energian määrän ylä-

altaassa  $e_t$  (MWh). Varastoitunut energia toimi kolmantena tilamuuttujana. Lisäksi vesivoimatuottaja ottaa huomioon edellisen päivän viimeisen tunnin vesivoimatuotannon määrän  $q_{H,(t-1)}$  (MWh), joka toimii neljäntenä tilamuuttujana.

Huomioiden tilan  $s = [t, i_t^s, e_t, q_{H,(t-1)}]$ , vesivoimatuottaja tekee päätöksen varauksesta säätökapasiteetille  $c_{t+1}^r$  (MW). Vuorokausimarkkinoiden tarjontafunktion parametrit  $\alpha_{t+1}$  seuraavan vuorokauden  $(t + 1)$  tunneille  $h \in \{1, \dots, H = 24\}$  määritetään säätökapasiteettivaraus huomioiden siten, että vuorokausimarkkinoiden tunneittaisen tuotantoprofiilin lisäksi vesivoimatuottaja varautuu tarjoamaan säätökapasiteettia ylös tai alaspäin ainakin  $c_{t+1}^r$  verran. Suuren voimalaitoksen tapauksessa voimalaitos tarjoaa mFRR säätöenergiaa, jos se on mahdollista vuorokausimarkkinoiden tuontituotantoprofiili ja säätökapasiteettivaraus huomioiden. Päättyessään vuorokausimarkkinoiden tarjontafunktion parametrit vesivoimatuottaja tekee päätöksen, että paljonko tuottaja varaa itselleen joustovaraa tarjota tunnin sisäisille reservimarkkinoille säätökapasiteettia ja -energiaa. Mallissa reservien varaamisen vaihtoehtoiskustannus siis sisäistetään vuorokausimarkkinoiden tarjontaparametrien optimoinnin avulla.

Vesivoimatuottaja valitsee tuotantoparametrit siten, että odotettu tuotantotulo yli vuoden ajanjakson maksimoituu. Tuotantotulo koostuu energiatulosta sähkön vuorokausimarkkinoilta, kapasiteettitulosta (FCR-N reservimarkkinoilta pienen voimalaitoksen tapauksessa ja aFRR reservimarkkinoilta suuren voimalaitoksen tapauksessa) sekä säätöenergiatulosta mFRR reservimarkkinoilta (suuren voimalaitoksen tapauksessa). Optimointiongelmassa vesivoimatuottaja ottaa lisäksi huomioon voimalaitoksen yläpuolisen altaan maksimi- ja minimirajat varastoituneen veden energialle. Altaan ylärajan ylittyessä ylimääräinen vesi ohivirtaa ohi turbiinien. Dynaamisen optimointiongelman malliyhtälöt esitetään raportin lopussa kappaleessa Laskentamallien kuvaukset, Edustavan voimalaitoksen mallinnus.

## 5 Markkinavaikutukset

### 5.1 Tavoitteet

Markkinavaikutuksien arvioinnin tavoitteena on selvittää vesienhoidon toimenpiteiden vaikutuksia eri markkinapaikoilla ja reservimekanismeissa. Yleisesti ajatellen vesivoiman ympäristörajoitteet vaikuttavat vesivoiman tuotantomahdollisuuksiin ja vaikutukset näkyvät myös markkinoilla. Markkinavaikutuksien suuruus on empiirinen kysymys ja niitä tarkastellaan tässä luvussa historiatietojen ja spot-markkinalla markkinoiden toimintaa kuvastavan rakenteellisen mallin avulla.

Vesivoiman ympäristörajoitteiden muutokset vaikuttavat vesivoiman tuotantomahdollisuuksiin ja tuotantomahdollisuuksien muutokset edelleen sähkömarkkinaan. Vaikutukset voivat kohdentua sähkön spot-markkinalle, päivän sisäiseen kaupankäyntiin sekä järjestelmävastaava Fingrid Oyj:n ylläpitämiin reservimarkkinoihin.

Markkinatason vaikutusten kvantitatiivisessa arvioinnissa pääpaino on tässä selvityksessä sähkön spot-markkinalla Suomessa. Spot-markkinan kautta tapahtuva kaupankäynti määrittää lähes koko sähkökaupan arvon sekä sähkön kuluttajille että tuottajille. Spot-markkinavaikutuksien suuruutta eri skenaarioissa tarkastellaan käyttäen rakenteellista mallia. Muita markkinavaikutuksia arvioidaan selvityksessä enimmäkseen kvalitatiivisesti historiatietojen perusteella, koska hankkeen käytössä ollut tietopohja ei ole mahdollistanut yksityiskohtaisempaa analyysiä.

Selvityksen kohteena olevat muutokset vesivoiman tuotantomahdollisuuksiin tapahtuvat viiveellä. Samanaikaisesti energiamarkkinat ovat historiallisen suurten muutosten keskellä ja onkin tarkoituksenmukaista muodostaa käsitys vesivoiman roolista erilaisissa sähkömarkkinaskenaarioissa.

### 5.2 Tuleva kehitys

#### 5.2.1 Pitkän aikavälin tasapaino

Tulevan kehityksen arvioinnin lähtökohtana tässä tarkastelussa on markkinaehtoinen kehitys. Pitkällä aikavälillä kulutus ja -tuotanto hakeutuvat tuotannon ja kulutuksen rakenteiden osalta tasapainoon, mikäli markkinat toimivat kilpailullisesti ja markkinoille

pääsulle ei ole esteitä<sup>39</sup>. Tasapainotus tapahtuu tulevaisuuden hinta oletusten kautta. Jos odotukset sähkön hinnasta ylittävät sähköntuotannon kokonaiskustannukset, kannattavat lisäinvestoinnit uuteen sähköntuotantoon. Jos hintaodotukset puolestaan jäävät tuotantokustannusten alle, ei uusia tuotantoinvestointeja kannata tehdä. Vastaava markkinaehtoinen tasapainotus toimii samanaikaisesti sähkön kulutuksen osalta. Uusiin sähköä kuluttaviin teknologioihin kannattaa investoida, mikäli sähkön hinta alittaa investoijan maksuhalukkuuden ja liian korkeilla sähkön hinnoilla investointeja ei kannata tehdä.

Sähkömarkkinoihin merkittävästi vaikuttavat tuotanto- tai kulutusinvestoinnit ovat tyypillisesti aikaa vieviä ja sääntely- ja lupaprosessit voivat viivyttää investointien toteuttamista entisestään<sup>40</sup>. Sähkömarkkinoiden voimakkaan muutoksen aikana onkin mahdollista, että kysynnän ja tarjonnan muutokset eivät ole tahdistettuja keskenään ja tällöin markkinahinnat voivat olla joko suhteellisen matalia tai korkeita ennen pitkän aikavälin tasapainon saavuttamista.

Sähkömarkkinoilla tehtävät investoinnit ovat usein pitkäkestoisia ja peruuttamattomia, tehtyjä investointeja ei voida helposti siirtää muuhun käyttöön. Suurempi epävarmuus tulevasta kehityksestä voi myös ylläpitää epätasapainoa ja viivästyttää investointipäätöksiä, koska ennen lopullisten päätösten tekemistä kannattaa odottaa mihin suuntaan markkinat ovat kehittymässä.

Markkinoiden tasapaino voi vääristyä myös, mikäli markkinat eivät toimi kilpailullisesti<sup>41</sup>. Suomessa ja lähialueillamme sähkömarkkinoille tyypillinen keskittynyt tuotantorakenne antaa sähköntuottajille markkinavoimaa, jonka käyttö voi nostaa sähkönhintoja yli kilpailullisen tason, mikä vääristää markkinatoimijoiden investointipäätöksiä. Toisaalta uusien toimijoiden tekemät investoinnit lisäävät kilpailua markkinalla ja alentavat vanhojen toimijoiden markkinavoimaa.

Sähkömarkkinalla suurten tuottajien markkinavoima ei kuitenkaan välttämättä alene täysimittaisesti kilpailullisten mekanismien kautta. Pitkien investointiaikojen lisäksi nykyisen sähköntuotantorakenteen muuttumista rajoittaa teknologiakohtainen sääntely erityisesti vesivoiman ja ydinvoiman osalta. Vesivoimatuotannon omistusoikeudellinen suoja on Suomessa vahva ja investointien kautta merkittävä kilpailun lisääminen on vesivoiman tuotannossa käytännössä mahdotonta.

---

<sup>39</sup> Esim. Mas-Colell, Whinston & Green (1995), s. 334-.

<sup>40</sup> Esim. Skjærseth et al. (2023).

<sup>41</sup> Esim. Fabra (2021).

Sähkömarkkinoille tehtäviin investointeihin ovat historiassa vaikuttaneet erilaiset tukimekanismit. Esimerkiksi tuulivoiman tuotantoa on tuettu pohjoismaisella markkina-alueella voimakkaasti, mutta pohjoismainen kysyntä ei ole kasvanut vastaavasti.<sup>42</sup> Saman vuosien 2021–2022 energiakriisin aikana Euroopassa käytettiin energian kulutuksen tukemiseen satoja miljardeja euroja<sup>43</sup>. Myös tulevan kehityksen osalta vastaava sähkökulutuksen ja -tuotannon poliittinen ohjaus näyttää voimistuneen Euroopassa<sup>44</sup>.

Pitkän aikavälin tasapainotusta tapahtuu paitsi ajan yli myös maantieteellisesti. Investointeja tekevät toimijat arvioivat sähkön tulevia hintatasoja eri hinta-alueilla ja tekevät valintoja, minne investoinnit kohdistuvat tai tehdäänkö niitä lainkaan<sup>45</sup>. Jälleen on mahdollista, että muut kilpailukytekijät, poliittinen ohjaus tai markkinavoima, vaikuttavat sähkömarkkinoihin siten että eri markkina-alueiden välillä on pitkäkestoisesti hintaeroja.

Markkina-alueiden väliset hintaerot ovat seurausta hinta-alueiden välisestä rajallisesta sähkön siirtokapasiteetista<sup>46</sup>. Sähköjärjestelmän toimivuus voi edellyttää investointeja sähkön siirtoverkkoon, mikäli tuotannossa tai kulutuksessa tapahtuu muutoksia. Markkinaehtoisesti tuotantoon ja kulutukseen tehtävien investointeihin ja sähköverkkoon tehtävien investointien välinen koordinaatio ajallisesti ja eri alueiden välillä voi aiheuttaa poikkeamia tasapainosta. Koska sähköverkkoihin tehtäviä investointeja suunnitellaan pitkälle etukäteen, voivat markkinatoimijat kuitenkin ennakoida verkkojen rakenteessa tapahtuvia muutoksia omissa investointipäätöksissään<sup>47</sup>.

## 5.2.2 Skenaariot

### 5.2.2.1 Lähtökohdat skenaarioille

Sähkömarkkinan tulevan kehityksen arviointiin liittyy yksityisten markkinatoimijoiden lisäksi laajempaa yhteiskunnallista kiinnostusta ilmasto- ja energiapolitiikan ja sähkön-siirtoyhteyksien kehittämisen näkökulmista. Tarjolla onkin runsaasti erilaisia kehitysnäkymiä, skenaarioita ja visioita tulevasta kehityksestä. Näiden selvitysten tavoitteena on tyypillisesti joko 1) kuvata miten normatiivisesti määritetty tavoitetila voidaan saavuttaa,

<sup>42</sup> Esim. Liski ja Vehviläinen (2020).

<sup>43</sup> Bruegel (2023).

<sup>44</sup> Esim. Reuters, 5.2.2024, "Germany outlines \$17 bln plan to subsidise gas-to-hydrogen shift", <https://www.reuters.com/business/energy/germany-agrees-subsidy-plans-hydrogen-ready-gas-power-plants-2024-02-05/>

<sup>45</sup> Esim. Lundin (2022) Ruotsin tuulivoimainvestointien osalta.

<sup>46</sup> Siirtokapasiteetin rajoitteet määrittävät pitkälti hinta-alueet.

<sup>47</sup> Esim. Gonzales, Ito ja Reguant (2023).

2) ennustaa tulevaa kehitystä tai 3) tarkastella erilaisia mahdollisia tulevaisuuden kehityspolkuja.<sup>48</sup>

Suomessa ei ole määritetty kansallisessa sähkömarkkinoita koskevassa päätöksenteossa yleisesti käytettäviä ajantasaisia skenaarioita, eikä yhtenäisiä menettelyjä tällaisten laatimiseksi. Aiemmat selvitykset ovat vanhentuneita tai eivät käyttötarkoituksiensa puolesta suoraan vastaa tämän hankkeen tavoitteisiin. Viimeaikaiset selvitykset ovat kuitenkin informatiivisia mietittäessä, mitkä tulevaisuuden kehityskulut voisivat vaikuttaa vesivoiman tuotantomahdollisuuksien muutoksen arvoon sähkömarkkinalla ja mitkä ovat kuviteltavissa olevat muutoksien mittasuhteet. Suurimmat muutokset näissä selvityksissä liittyvät sähkön kulutuksen kasvuun ja samanaikaiseen uusiutuvan energia, erityoten tuulivoiman, kasvuun.<sup>49</sup>

Skenaarioiden luomiseksi on lukemattomia tapoja, eikä tutkimustiedon perusteella voida ottaa kantaa, miten skenaariot tarkalleen ottaen tulisi laatia. Skenaarioiden valinnalla voidaan kuitenkin korostaa keskeisiä tulevaisuuden epävarmuuksia niiden kysymysten osalta, joiden vaihtelun vaikutusta halutaan ymmärtää tarkemmin.<sup>50</sup>

Lähtökohtana tässä selvityksessä käytettävissä skenaarioissa on edellä kuvattu pitkän aikavälin tasapaino sähkönkulutuksen ja tuotannon välillä. Vesivoiman säätökyvyn markkinavaikutuksien arvioimisen kannalta aiemmista skenaariotarkasteluista esille nousseita keskeisiä tekijöitä ovat vaihtelevan uusiutuvan energian lisääntyminen ja tähän kytkeytyvä sähkönkulutuksen kasvu<sup>51</sup>.

Tässä selvityksessä skenaariot rakentuvat oletuksiin tuulivoiman tuotannon ja samanaikaisen sähkönkulutuksen ja muun tuotannon määrien kehittymisestä. Tulevaisuuden skenaariossa tuulivoimatuotannon kapasiteetti kiinnitetään tasolle 12 GW, 24 GW ja 36 GW. Tehty valinta on enimmäkseen käytännöllinen ja luo selkeästi eroteltavat ja ymmärrettävät skenaarioiden lähtökohdat. Yhtäläillä voitaisiin kysyntä kiinnittää jollekin tietylle tasolle ja sen jälkeen määrittää kysynnän tasolle riittävä tuotantokapasiteetti.

Vertailukohtana analyysissä käytetään vuotta 2023, jonka lopussa tuulivoiman tuotantokapasiteetti Suomessa oli noin 7 GW. Skenaarioiden tuulivoiman tuotantokapasiteetti

---

<sup>48</sup> Chen et al. (2019) esittävät koonnan pohjoismaisen sähkömarkkinan pitkän aikavälin kehitystä arvioineista selvityksistä.

<sup>49</sup> Ks. Liite 1

<sup>50</sup> Esim. Börjeson et al. (2006), Trutnevyte et al. (2016).

<sup>51</sup> Ks. Liite 1

teja voi suhteuttaa Fingrid Oyj:n vuoden 2024 alussa esittämään, kantaverkon kehittämiseen liittyvässä suunnittelussa käytettävään, lähiajan ennusteeseen, jonka mukaan tuulivoimakapasiteettia olisi vajaa 12 GW vuonna 2027 ja noin 21 GW vuonna 2030<sup>52</sup>.

Skenaarioissa muutetaan sähkönkulutuksen määrää ja aurinko- ja tuulivoiman tuotantokapasiteettia. Uusien tuulivoimainvestointien osalta toteutuvan sääriippuvan tuotannon määrä perustuu vuoden 2023 sääolosuhteisiin. Toteutunutta tuntitason tuulivoiman tuotantoa Suomessa skaalataan kussakin skenaariossa ylöspäin skenaariokohtaisen tuotantokapasiteetin kasvun suhteessa.<sup>53</sup> Vastaavaa menettelyä käytetään aurinkosähkön tuotannon osalta. Lisäksi skenaarioissa on mukana mahdollisuus investoida lyhyen aikavälin sähkövarastoihin, mikäli nämä tulevat kannattaviksi.

Sähkömarkkinan muiden tuotantoon ja kulutukseen vaikuttavien tekijöiden oletetaan säilyvän lähtövuoden 2023 tilanteen mukaisina. Näitä tekijöitä ovat esimerkiksi vallinneet sääolosuhteet, ydinvoiman ja yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon tarjoukset spot-markkinalle sekä fossiilisten polttoaineiden ja sähkön päästöoikeuksien hintatasot sekä kaikki muut sellaiset tekijät, joita ei nimenomaisesti muuteta skenaarioissa. Näiden muiden tekijöiden varioiminen ei ole tämän tutkimushankkeen resurssien puitteissa ole ollut mahdollista.

Selvityksessä ei oteta kantaa skenaarioiden toteutumisen todennäköisyyksiin eikä niiden välillä tehdä arvovalintoja. Tarkoituksena on kuvata vesivoiman tuotantomahdollisuuksien muutoksien merkityksen kannalta keskeistä vaihtelua. Skenaariot kattavat pääpiirteittäin aiemmissa selvityksissä esillä olleen tuulivoimatuotannon ja sähkönkulutuksen vaihtelun.

Kussakin skenaariossa sähköjärjestelmän kehityksen oletetaan päätyvän kilpailulliseen tasapainoon. Investointipäätöksiä uuteen sähköntuotantoon ja sähkövarastoihin tehdään niin paljon, kuin se on kannattavaa. Investointipäätöksiä tarkastelussa on käytetty yksinkertaistavaa oletusta markkinoiden täydellisestä kilpailusta<sup>54</sup>.

---

<sup>52</sup> Fingrid Oyj, Sähkön tuotannon ja kulutuksen kehitysnäkymät Q1 2024.

<sup>53</sup> Tuulivoiman tuotantokapasiteetin kasvu vuonna 2023 otetaan huomioon perustuen Fingridin Avoimen datan tuotantokapasiteettitietoon. Mikäli tuulivoiman tuotantoa on rajoitettu esimerkiksi alhaisten hintojen vuoksi, vaikuttaa tämä myös tuotantomääriin. Tällä ei kuitenkaan ole suurta merkitystä mallinnuksessa, koska tuulisissa oloissa sähkön hinnat rajautuvat skenaarioissa kuitenkin nollassa.

<sup>54</sup> Tarkempi tarkastelu markkinoille tulon esteiden, epävarmuuden ja markkinavoiman vaikutuksista edellyttäisi rakenteellista mallinnusta, joka on rajattu tämän selvityksen ulkopuolelle. Skenaarioissa ei myöskään arvioida Suomen tai lähialueiden politiikkatoimia tai suoraan niiden vaikutuksia sähkömarkkinamallinnukseen.

Skenaarioissa uuden sähköntuotannon ja sähkövarastoiden kapasiteetit määräytyvät perustuen oletuksiin niiden kustannuksista. Tuotantolaitosten teknologiakustannukset otetaan selvityksessä annettuna. Teknologiakehitys on maailmanlaajuista ja Suomen omat toimet voivat vaikuttaa teknologiakustannuksiin vain vähän. Tarkasteluun on valittu ne teknologiat, jotka tuotantokustannuksista saatavilla olevien tietojen perusteella voisivat olla nyt tai lähitulevaisuudessa olla kilpailukykyisiä sähkömarkkinoilla.

Suomessa tapahtuvien muutoksien lisäksi myös lähialueittemme sähköntuotannon ja -kulutuksen rakenteissa voi tapahtua sähkömarkkinamme vaikuttavia muutoksia. Selvityksen lähestymistavalla ei käytettävissä olevan datan perusteella kuitenkaan voida yksityiskohtaisesti eritellä esimerkiksi Pohjois-Ruotsin ja Keski-Ruotsin mahdollisesti muuttuvien tilanteiden vaikutuksia sähkömarkkinaan Suomessa. Käytetty lähtödata kerää kysyntä- ja tarjoustiedot kaikista pohjoismaista, mutta muutoksia tarkastellaan vain Suomen vesivoiman osalta. Näin esimerkiksi ruotsalaisen vesivoiman säätökykyä ei käytetä vastaamaan muutoksiin Suomessa, mutta toisaalta siirtorajoitteiden vaikutuksia ei mallinnuksessa oteta huomioon.

### 5.2.2.2 Oletukset tuotantokustannuksista ja kysynnän maksuhalukkuudesta

Eri lähteistä tarkasteltuna aurinko- ja maatuulivoima sekä fossiilisten polttoaineiden käyttö ovat globaalisti edullisimmat tuotantoteknologiat nyt ja lähitulevaisuudessa<sup>55</sup>. Lisäinvestoinnit fossiilisten polttoaineiden käyttöön on kuitenkin rajattu selvityksen ulkopuolelle. Fossiilisten polttoaineiden osalta kivihiilen käyttö energiantuotantoon on Suomessa kielletty lailla vuoden 2029 jälkeen<sup>56</sup> ja maakaasun käyttöön liittyy merkittäviä epävarmuuksia Venäjän hyökkäyssodan vaikutuksesta ja myös ilmastopoliittisista syistä. Myös turpeen energiakäyttöä on Suomessa oltu ajamassa alas<sup>57</sup>. Bioenergian lisääntymistä sähköntuotannossa ei ole sisällytetty tarkasteluun korkeiden kokonaistuotantokustannusten ja metsien käyttöön liittyvien laajempien kysymyksien luoman epävarmuuden vuoksi<sup>58</sup>. Myöskään merituulivoima tai ydinvoima ei tarkasteluissa skenaariossa olisi kilpailukykyinen uusiutuviin tuotantolähteisiin verrattuna. Sähkön varastoinnin osalta selvityksessä rajoitaudutaan tarkastelemaan tyyllitellyllä tavalla sähkön varastointia käyttäen teollisen kokoluokan (*utility scale*) sähköakkujen kustannustietoja.

Kokonaistuotantokustannuksiin Suomessa vaikuttavat tuotantoteknologioiden kustannusten lisäksi paikalliset tekijät. Tuotantokustannusten määrittämisessä on käytetty julkisista lähteistä saatavilla olevia tietoja todellisista teknologioiden hintatasoista. Aurinko- ja tuulivoiman tuotantokustannukset on kiinnitetty Suomen markkinahintatasoon

<sup>55</sup> Esim. U.S. EIA, Annual Energy Outlook 2023 ja Lazard LCOE 4/2023.

<sup>56</sup> Laki hiilen energiakäytön kieltämisestä (416/2019).

<sup>57</sup> Pääministeri Petteri Orpon hallituksen ohjelma, 20.6.2023.

<sup>58</sup> Esim. Danish Energy Agency (2023); Seppälä et al. (2022).

vuonna 2023 pitkän aikavälin sopimusten (nk. *Power Purchase Agreement, PPA*) hintatietojen perusteella. Aurinkosähkön kokonaishintana on käytetty 54 €/MWh:ia<sup>59</sup> ja tuulivoiman kokonaishintana 46 €/MWh:ia<sup>60</sup>. Sähkövarastoiden osalta vastaavia kustannustietoja ei ole julkisesti saatavilla ja investointikustannuksena on käytetty 180 €/kW/vuosi neljän tunnin akkuvarastolle perustuen julkisesti saatavilla oleviin arvioihin tulevista kustannuksista<sup>61</sup>.

Suhteessa sähköntuotantoon, sähkönkulutuksen rakenne ja joustomahdollisuudet tunnetaan huonommin. Hankkeessa ei ole luotu skenaariokohtaista erillistä yksittäisten toimijoiden tasolle vietyä mallinnusta joustavan kysynnän lähteistä<sup>62</sup>. Lisääntyvän kysynnän maksuhalukkuus on määritetty skenaarioissa skaalaamalla toteutuneisiin kysyntätarjouksiin perustuvaa joustavan kysynnän osuutta<sup>63</sup>.

### 5.2.2.3 Skenaarioiden yhteenveto

Kussakin skenaariossa joustava kysynnän määrää on kasvatettu riittävästi kattamaan lisääntyvän aurinko- ja tuulivoimatuotannon oletetut tuotantokustannukset. Tuulivoiman saama sähkön keskihinta on skenaariossa 46 €/MWh ja aurinkosähkön 54 €/MWh. Lisäksi sähkövarastoiden kapasiteettia kasvatetaan, mikäli niiden saama tuotto riittää kattamaan oletetut kokonaiskustannukset 180 €/kW/vuosi.<sup>64</sup>

Kussakin skenaariossa suomalaisen vesivoiman käyttö optimoidaan uudelleen vuorokausitasolla perustuen skenaarion mukaisiin muutoksiin sähköntuotannossa ja -kulutuksessa<sup>65</sup>. Muiden tuotantomuotojen tuotantomäärissä ei oleteta tapahtuvan sellaisia muutoksia, jotka vaikuttaisivat toimijoiden tarjouskäyttäytymiseen. Sähkön nykyisen kysynnän mahdollisten muutoksien voidaan ajatella sisältyvän joustavan kulutuksen kasvuun, mutta muutoksia ei ole eritelty tarkemmin.

Taulukossa 7 esitetään edellä kuvattujen skenaarioiden mukaiset kysynnän ja tarjonnan kapasiteetti- ja tasapainotulemat. Tuulivoiman vuosituotanto nousee vuonna 2023

<sup>59</sup> LevelTen Energy, Suomen hinta Q4/2022 päivitettyä kehityksellä Euroopassa Q4/2023.

<sup>60</sup> Montel, Qwatt data, 7/2023.

<sup>61</sup> Lazard (2023) nykytilan kustannusten ja Cole ja Karmakar (2023) kustannuskehityksen osalta.

<sup>62</sup> Tuoreissa Suomea koskeissa selvityksissä on tarkasteltu kysynnän rakenteen kehittymistä yksityiskohtaisten teknologiavalintojen tasolla, mutta näiden vaikutusta kokonaiskysyntään ei ole dokumentoitu vertailukelpoisella tavalla, ks. liite 1

<sup>63</sup> Ks. liite 2

<sup>64</sup> Tuotannon tai sähkön akkuvarastojen mahdollisesti muilta markkinapaikoilta tai reserveistä saamia tuloja ei ole otettu huomioon.

<sup>65</sup> Jotta skenaarioiden tulokset säilyvät vertailukelpoisina vuoden 2023 tilanteeseen, myös vertailuvuoden 2023 suomalaisen vesivoiman tuotanto optimoidaan käyttäen samaa mallia. Tällä on pieniä vaikutuksia vuoden 2023 vertailukohtien hintatasoihin.

toteutuneesta 14 TWh:ista enimmillään 87 TWh:iin. Lisääntyvän sähkötuotannon vastinparina sähkön vuosikulutus nousee 79 TW:ista vuonna 2023 jopa yli kaksinkertaiseksi verrattuna nykytilaan suurimman tuulivoimatuotannon skenaariossa. Sähkön kysynnän kasvaessa myös aurinkosähkön tuotantoon kannattaa investoida, mikä nostaa aurinkosähkön tuotantokapasiteettia ja vuosituotantoa. Sähkön akkuvarastot eivät tehdyillä kustannusoletuksella tule skenaariossa kannattaviksi.

**Taulukko 7.** Sähkömarkkinan arvioitu rakenne vuonna 2035 verrattuna vuoden 2023 toisintoon eri skenaarioissa.

Skenaario	Tuuli	Aurinko	Tuuli	Aurinko	Kulutus
	GW	GW	TWh	TWh	TWh
2023 toisinto	7	1	14	1	79
Tuuli 12	12	2	29	2	90
Tuuli 24	24	5	58	5	127
Tuuli 36	36	13	87	13	163

Skenaarioista ”2023 toisinto” vastaa muutoin vuoden 2023 toteumaa, mutta suomalaisen vesivoiman tuotanto on optimoitu uudestaan. Muut skenaariot perustuvat oletukseen tuulivoiman tuotantokapasiteetista ja tämän perusteella haettuun tasapainoon joustavan sähkönkulutuksen ja aurinkovoiman tuotantokapasiteettien välillä. Kunkin skenaarion osalta taulukossa esitetään tuuli- ja aurinkovoiman tuotantokapasiteetti sekä mallilaskelman tuottamista tunneittaisista sähköntuotannon ja kulutuksen arvioista lasketut vuositaso energiamäärät.

Valittu lähestymistapa tuottaa uusiutuvan energian ja kysynnän kokonaismääriä, jotka eivät kvalitatiivisesti merkittävästi poikkea sellaisista skenaariomallinnuksista, joissa on käytetty vastaavia lähtöoletuksia ja tehty tarkempia oletuksia kysynnän rakenteesta ja joustoista<sup>66</sup>.

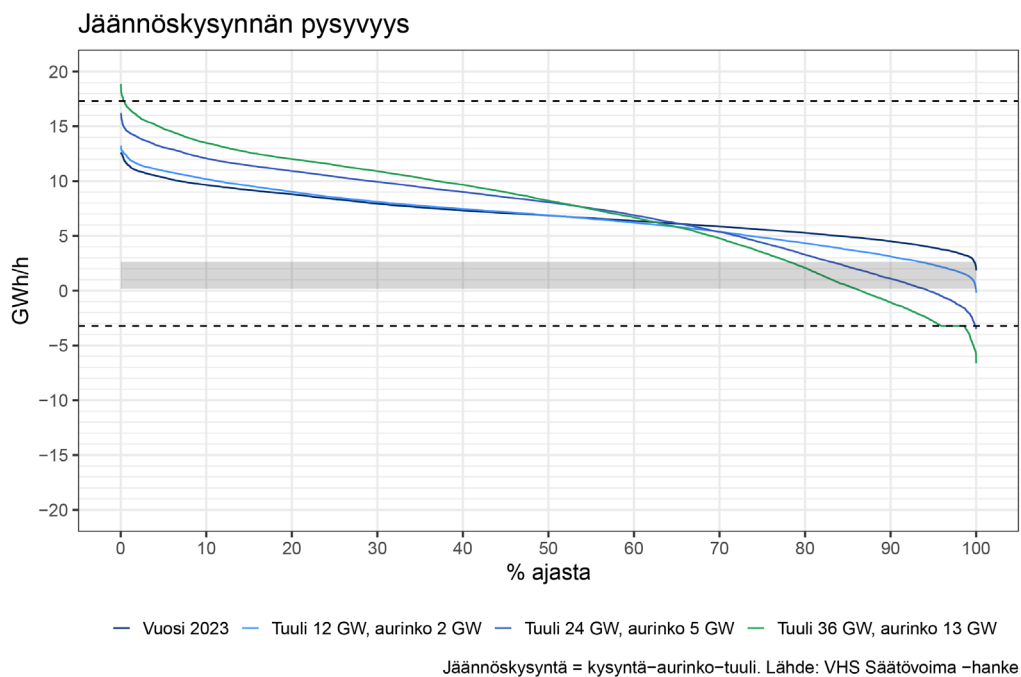
#### 5.2.2.4 Kysynnän ja tarjonnan rakenne skenaariossa

Skenaarioiden vuosittaiset kokonaistuotanto- ja kulutusmäärät perustuvat mallinnukseen, joka ottaa huomioon sääriippuvan tuotannon ja joustavan kulutuksen lisääntymisen tuntitasolla. Sähkömarkkinavaikutuksien kannalta näiden yhteisvaikutusta voidaan tarkastella sähkön kulutuksen ja ”joustamattoman” tuotannon välisen erotuksen eli jäännöskysynnän kautta.

<sup>66</sup> Vertailukohtana Fingrid, Sähköjärjestelmävisio 2023 ja Sitra, Enabling cost-efficient electrification in Finland, 2021.

Kuviossa 13 esitetään eri skenaarioiden jäännöskysynnän tuntitason jakauma pysyvyyskäyrien muodossa. Jäännöskysyntä on tässä laskettu vähentämällä skenaariokohtaisesti Suomen sähkönkulutuksesta tuuli- ja aurinkovoiman tuotanto. Kuvion katkoviivat kuvastavat Fingrid Oyj:n arviota vuoden 2035 enimmäisrajasiirtokapasiteetista ( $\pm 6,7$  GW) täydennettynä ylärajan osalta vesivoiman (2,6 GW), kaukolämmön tuotannon yhteydessä tuotetun yhteistuotantosähkön (3,2 GW) ja ydinvoiman (4,4 GW) toteutuneilla enimmäismäärillä. Kuviossa otetaan huomioon tuotannon rajoittaminen lähellä nollaa olevilla hintatasoilla voimakkaasti negatiivisen jäännöskysynnän aikoina.

**Kuvio 13.** Jäännöskysynnän määrä osuutena ajasta vuoden verrattuna vuoteen 2023 eri skenaarioissa ilman muutoksia vesivoiman säätökykyyn. Katkoviivat kuvastavat Fingridin skenaarioiden mukaisten vuoden 2035 rajasiirtoyhteyksien ja vuosien 2015–2023 toteumatietojen perusteella arvioidun kaukolämmön yhteistuotannon, ydinvoiman ja vesivoiman tuotannon yhteismäärien rajoja. Harmaalla väritetty alue kuvastaa vesivoiman toteutunutta vaihteluväliä (0,2–2,6 GW).



Ottaen huomioon mallinnuksesta pois jätetyt maiden väliset siirtorajoitteet, yllä esitetyn tarkastelun perusteella mallinnuksen tuottamat tasapainotulemat vaikuttavat Suomen oloissa nykyisillä ja suunnitteilla olevilla ratkaisuilla mahdollisilta lukuun ottamatta korkeimman tuulivoimakapasiteetin skenaariota. Kuviossa 14 esitettyssä analyysissä jäännöskysyntä ylittää korkeimman tuulivoimakapasiteetin skenaariossa siirtoyhteyksien, kotimaisen tuotantokapasiteetin ja lisäjoustopuolteen määrän noin 34 tunnin aikana. Tämän

ylijäämäkysynnän arvo sähkön markkinahinnalla mitattuna olisi noin 1,5 miljoonaa euroa. Vastaavasti aurinko- tai tuulivoiman tuotantoa jouduttaisiin rajoittamaan 342 tunnin aikana, mikä vähentäisi tuottajien tuloja 2,7 miljoonalla eurolla. Nämä vaikutukset ovat vähäisiä verrattuna aurinko- ja tuulivoiman kokonaistuottoihin korkeimman tuulivoima-tuotannon skenaariossa (aurinkovoima noin 0,7 miljardia euroa ja tuulivoima 4,0 miljardia euroa).

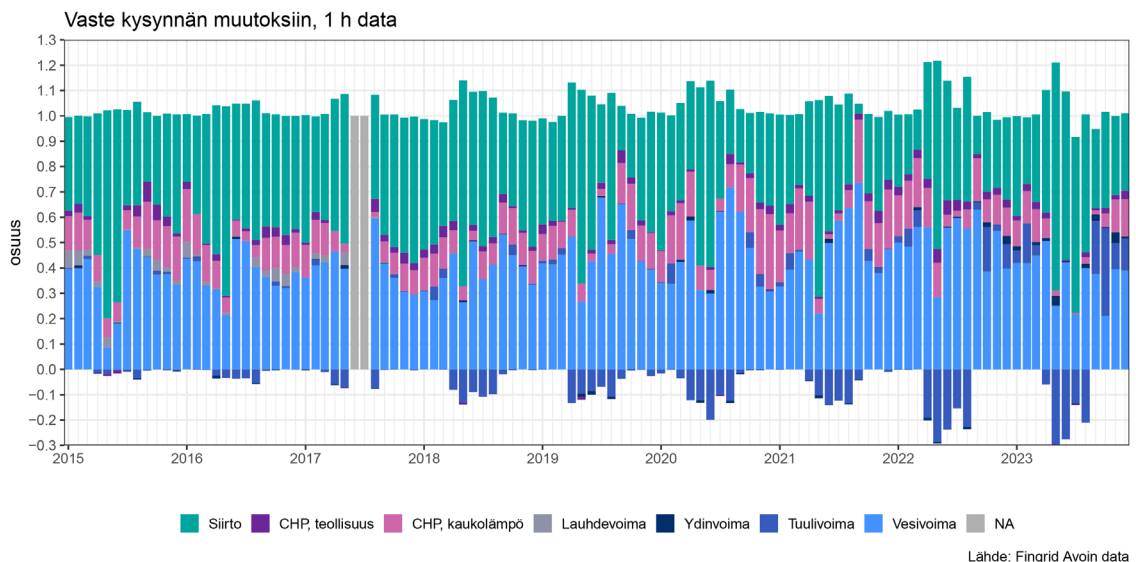
## 5.3 Markkinavaikutusten mallintaminen

### 5.3.1 Vesivoiman rooli tasapainotuksessa

#### 5.3.1.1 Vesivoiman merkitys tuntitason tasapainotuksessa

Vesivoiman tuotantomahdollisuuksien muutoksilla voi olla vaikutusta eri aikajänteillä. Säätokyvyn muutoksien kannalta oleellisia muutoksia voidaan arvioida perustuen historiallisiin toteumatietoihin. Avoimeen dataan perustuvien teknologiakohtaisten kokonaistuotanto- ja rajasiirtotietojen perusteella voidaan muodostaa käsitys siitä, mitkä teknologiat vastaavat sähkönkulutuksen muutoksiin eri aikajänteillä.

**Kuvio 14.** Kysynnän muutoksiin vastaaminen teknologioittain tuntitasolla.

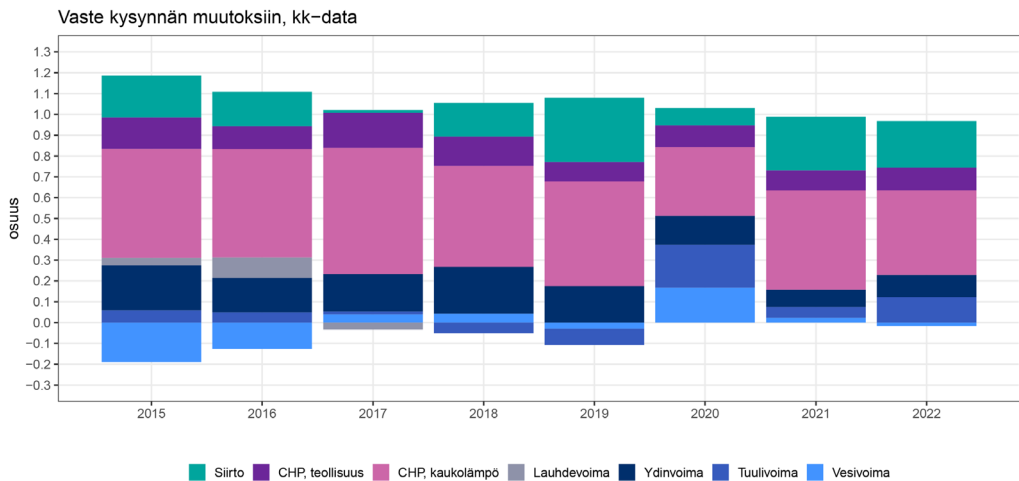


Tuntitason tasapainotuksessa vuosina 2015–2023 rajasiirtojen ja vesivoiman osuus on likimain yhtä suuri. Muista teknologioista vain kaukolämmön yhteistuotannon muutokset ovat vastanneet kulutuksen muutoksiin merkittäväällä tavalla, ks. kuvio 14. Kuviossa esitetään keskimääräiset muutososuudet kuukausitasolla. Jos osuus on esimerkiksi 0.5, tarkoittaa tämä, että jos kulutus on muuttunut yhdeltä kolmen minuutin jaksolta seuraavalle 1.0 megawattituntia, on kyseinen teknologia muuttunut keskimäärin samaan suuntaan 0.5 megawattituntia. Kuvion osuudet eivät summaudu tasan yhteen, koska osa muutoksista menee vastakkaiseen suuntaan sähkönkulutuksen muutoksien kanssa.

Tuulivoiman kasvu näkyy kuviossa kahdella tavalla: talviaikaan tuulivoiman muutokset ovat samansuuntaisia kulutuksen muutosten kanssa ja kesäaikaan tuulivoiman muutokset ovat erisuuntaisia. Vesivoiman keskimääräinen vuotuinen osuus kulutuksen tuntitason tasapainottamisesta on vaihdellut välillä 0.36–0.51.

### 5.3.1.2 Vesivoiman merkitys vuoden yli tapahtuvassa tasapainotuksessa

**Kuvio 15.** Kysynnän muutoksiin vastaaminen teknologioittain kuukausitasolla.



Eri teknologioiden osuudet kysynnän muutoksiin vastaamisessa vuoden yli on esitetty kuviossa 15. Kaukolämmön yhteistuotannon osuus on selkeästi suurempi, koska sekä kaukolämpöä että sähköä kulutetaan eniten talviaikaan. Ydinvoimaloiden ja teollisuuden yhteistuotanto tasapainottaa myös kulutusta kuukausien yli, mikä selittyy ainakin osin huoltoseisokkien ajoituksella.

Sääriippuvien tuotantomuotojen, vesivoiman ja tuulivoiman vaikutukset menevät osin ristiin. Tuulivoimatuotannon voimakkaan kasvun myötä lukujen tulkinta ei ole yksikäsitteistä, mutta tuulisuuden keskimääräinen ajoittuminen enemmän talviaikaan pitää keskimääräisen tasapainotusosuuden hieman positiivisena ajanjaksolla 2015–2023. Vesivoiman ja kulutuksen kuukausitason muutokset menevät joinakin vuosina voimakkaasti ristiin, tasapainotus osuus vaihtelee välillä -0.19–0.17. Tämä voi olla seurausta esimerkiksi suomalaisen vesivoiman tuotannon rajoitteista tai markkinavoiman käytöstä.

Vesivoiman tuotantomahdollisuuksien osalta edellä <esitettyihin toteumatietoihin perustuvan säätökyvyn muutoksia mallinnetaan tarkemmin tuntitason markkinalla, mutta vaikutuksia vuodenaikojen yli ei tässä selvityksessä tarkastella. Vesienhoidon toimenpiteiden vaikutus olisi vuoden yli ulottuvassa tarkastelussa vähäinen, mutta eri skenaarioiden välillä voisi syntyä eroja, koska vesivoiman marginaalinen arvo voi muuttua.

## 5.3.2 Sähkömarkkinamallin kuvaus

### 5.3.2.1 Sähkömarkkinan historiallisten hintojen replikaatio

Selvityksessä spot-markkinoiden toimintaa kuvataan rakenteellisella mallilla, joka jäljittelee eurooppalaisella sähkömarkkinalla spot-hinnat määrittävää EUPHEMIA-algoritmia<sup>67</sup>. Malli ratkaisee vuorokausi kerrallaan tunti tunnilta markkinatasapainon spot-markkinalla, kun otetaan annettuna markkinapaikoilta kerätyt kysyntä- ja tarjoustiedot<sup>68</sup>. Vesivoiman tuotantomahdollisuuksien muutosten vaikutusten arviointi tehdään käyttäen yksityiskohtaisia tietoja toteutuneista todellisista markkinatarjouksista.

### 5.3.2.2 Lähtötiedot

Mallinnuksessa käytetyt spot-markkinan kysyntä- ja tarjoustiedot perustuvat pohjoismaista hintatasoa kuvastavaan nk. systeemihintaan liittyvään laskelmaan. Systeemi-hinta lasketaan ottamalla kysyntä- ja tarjoustiedot kaikilta hinta-alueilta Norjasta, Ruotsista, Suomesta ja Tanskasta ja laskelmalla näistä erikseen pohjoismainen markkinatasapaino. Tässä laskennassa ei välitetä maiden välisistä todellisista siirtorajoituksista, mutta siirrot ympäröivien alueiden kanssa tulevat otetuksi huomioon tarjoustiedoissa.

<sup>67</sup> EUPHEMIA-algoritmin yksityiskohtainen replikointi ei julkisesti saatavilla olevien tietojen pohjalta ole mahdollista.

<sup>68</sup> Tätä lähestymistapa on hiljattain kehitetty useissa tutkimushankkeissa, joista on löydettävissä mallinnustavan yksityiskohtainen dokumentaatio, erityisesti Vehviläinen (2023) sisältää myös vesivoiman optimoinnin kuvauksen. Sähkömarkkinan replikoivaa mallia on käytetty myös hankkeissa Gerlagh, Liski ja Vehviläinen (2022) ja Liski ja Vehviläinen (2023).

Sähköpörssin kautta saaduista tarjoustiedoista ei käy ilmi tarjoajien identiteettiä tai käytettyä tuotantoteknologiaa, joten tarjoustietoja täydennetään Fingrid Oyj:n Avoin data -palvelun kautta kerätyillä tiedoilla aurinko- ja tuulivoiman tuotannosta sekä sähkön kokonaiskulutuksesta Suomessa. Fingrid Oyj:n tiedoista käy ilmi sähkön kokonaiskulutus ja sähköntuotanto tuotantoteknologioittain jaoteltuna tuntitasolla.

Vesivoiman tuotannosta ei Suomessa julkisista, eikä myöskään tutkimuskäyttöön ole saatavilla, kokonaistuotantotietoja tarkempia tietoja. Vesivoiman toteutunut kokonaistuotanto poikkeaa spot-markkinalle tarjotusta tuotannosta, koska vesivoiman tuotantoa on voitu muuttaa spot-markkinan jälkeisillä päivän sisäisillä markkinoilla ja erilaisten reservien käyttöön liittyen. Lisäksi kaikkea vesivoimaa ei välttämättä tarjota spot-markkinan kautta, mutta tällä on arvonmuodostuksen kannalta pienempi merkitys, koska markkinahinnat antavat vaihtoehtoiskustannuksen veden mahdolliselle muulle käytölle.

Skenaarioiden lähtötiedot pohjautuvat vuoteen 2023. Empiirisessä analyysissä vuosien 2021–2022 käyttö olisi ongelmallista Venäjän hyökkäyssodan käynnistämän Euroopan laajuisen energiakriisin vuoksi ja vuoden 2020 toteumiin vaikuttaa koronapandemia. Tätä aiemmat vuodet alkavat olla markkinaolosuhteiltaan heikommin tulevaa kehitystä kuvaavia, koska tuulivoiman tuotanto-osuus on ollut vielä suhteellisen alhainen. Fingridin Avoimen datan perusteella vesivoimantuotanto vuonna 2023 on ollut 14,3 TWh, mikä on hieman korkeampi kuin vuosien 2015–2023 keskiarvo, 13,7 TWh.

### 5.3.2.3 Skenaariokohtainen numeerinen laskenta

Spot-markkinamallin avulla voidaan toistaa historialliset markkinatulemat, eritoten sähkön markkinahinnat, varsin tarkasti. Hankkeen tavoitteena on arvioida vesienhoitotoimien vaikutusta myös tulevaa kehitystä haarukoivissa skenaariossa. Tämä toteutetaan muokkaamalla sähkön kysyntää ja tarjontaa pitkän aikavälin tasapainossa määritettyjen skenaarioiden mukaiseksi. Lisääntyvä aurinko- ja tuulivoiman tuotanto lisää tarjontaa ja lisääntyvä kulutus kysyntää. Muokattujen tarjouskäyrien perusteella lasketaan uudet tasapainohinnat ja niitä käytetään vesivoiman säätökyvyn muutosten arvioinnissa.<sup>69</sup>

Edellä kuvattu menetelmä skenaarioiden rakentamiseksi pohjautuu tuntikohtaisten lähtötietojen muokkaamiseen siten, että vuositason toteumat ovat skenaarioiden oletusten mukaisia. Menetelmä tuottaa samalla päivitettyjä tuntikohtaisia kysyntä- ja tarjoustietoja, jotka ovat sisäisesti johdonmukaisia. Kulutuksen ja tuotannon väliset monimutkai-

<sup>69</sup> Ks. esimerkki liite Laskentamallien kuvaukset.

set vuorovaikutussuhteet tulevat kuvattua todellisten tarjoustietojen perusteella. Erityisesti aurinko- ja tuulivoimatuotannon sekä sähkönkulutuksen välinen voimakas korrelaatorakenne määräytyy skenaarioissa toteumatietojen mukaisesti.

### 5.3.3 Vesivoiman säätökyvyn muutokset

#### 5.3.3.1 Vesivoimatuotannon optimointi nykyisillä rajoitteilla

Hankkeen tavoitteiden kannalta oleellisten vesivoiman tuotantomahdollisuuksien muutosten spot-markkinavaikutusten arviointi tehdään perustuen vesivoiman kilpailulliseen optimointiin kunkin skenaarion kysyntä- ja tarjontadataa vasten.

Vesivoiman tuotantomahdollisuuksien muutosten vaikutukset mallinnetaan jokaisessa skenaariossa sekä vertailuvuoden 2023 osalta samalla tavalla. Spot-markkinan tarjontakäyristä poistetaan tunti tunnilta toteutunut suomalaisen vesivoimatuotannon määrä. Kunkin vuorokauden aikana vesivoiman käyttö optimoidaan perustuen kysyntä- ja tarjontakäyrien sisältämään informaatioon vesivoiman yhteiskunnallisesta arvosta eri ajanhetkinä. Tämä vastaa ajatusta vesivoiman kilpailullisesta käytöstä täydellisen informaation olosuhteissa.

Mallissa vesivoiman käytön tuotantomahdollisuuksia rajoitetaan perustuen havaittuihin tuotannon maksimi- ja minimiarvoihin kunkin vuorokauden aikana. Lisäksi vesivoimatuotannon muutoksia tunnilta toiselle rajoitetaan enintään 500 MW:iin, mikä kuvastaa historiatietojen valossa tunneittaisten muutoksien suuruutta<sup>70</sup>.

Vesivoiman optimointi tehdään yhdessä sähkön tuntimarkkinahintojen laskennan kanssa vuorokausi kerrallaan. Kunkin vuorokauden aikana mallinnuksessa käytetty vesivoiman kokonaismäärä pidetään samana, kuin mitä se on ollut historiassa kyseisen vuorokauden aikana<sup>71</sup>.

Vesienhoitotoimenpiteiden markkinavaikutuksia arvioidaan kahden erillisen vaikutuskanavan kautta: keskimääräisen vesivoimatuotannon rajoittamisella ja vesivoiman minimivirtaamarajoitteita tiukentamalla. Lisäksi mallinnetaan näiden toimien yhteisvaikutus. Arviointi toteutetaan muokkaamalla edellä kuvatun vesivoiman optimointimallin rajoitteita.

<sup>70</sup> Fingridin Avoimen datan mukaan vuosina 2015–2023 vesivoiman tuntitason muutoksista 0,1% on ollut alle -525 MW ja 0,1 % yli 584 MW.

<sup>71</sup> Suomalaisen vesivoiman optimointi vuoden yli on historiatietojen perusteella varsin rajoitettua.

Yksittäisten laitoksien tuotantomääriä ei käytettävissä olevan datan perustella voida määrittää, eikä rajoitusten muutoksia voida kohdentaa kuin keskimääräisen vesivoimatuotannon tarkkuudella. Kokonaistuotantomäärien tarkastelu kuvastaa kuitenkin vesivoiman säätökyvyn muutoksien keskimääräisiä vaikutuksia. Koska kaikki vesivoiman tuottajat kohtaavat samat markkinahinnat, voidaan olettaa laitosten tuotantopäätösten olevan ainakin jossain määrin koordinoituja. Vesivoiman kokonaistuotantoon kohdistuvan vähennyksen suuruutta on pyritty arvioimaan yksittäisten laitosten rajoitusten muutosten kautta (ks. luvut 3 ja 4).

### 5.3.3.2 Veden ohjaaminen voimalaitoksen ohi

Mikäli muuttuvan ympäristösäätelyn seurauksena määrätty osa vedestä ohjataan kalateiden tai luonnonmukaisten uomien kautta, vähenee keskimääräinen vesivoimalan läpi virtaavan veden määrä. Tällainen keskivirtaamarajoite vähentää voimalaitoksen tuotetun energian kokonaismäärää, mutta voimalaitoksen säätökyky ei kuitenkaan muutu (ks. luku 4).

Vesivoiman tuotantoon käytössä olevan energiamäärän vähentäminen toteutetaan mallinnuksessa pienentämällä mallille optimoitavaksi annettavaa kokonaisenergiämäärää. Vähennys toteutetaan kullekin vuorokaudelle suhteellisesti samansuuruisena.

Vähennyksen suuruudeksi on oletettu 2 % vesivoiman kokonaistuotannosta. Koska säädettävä vesivoima tuottaa vain osan Suomen vesivoiman kokonaistuotannosta, tarkoittaa oletus tätä suurempaa vähennystä patojen alapuolisille säädettäville voimalaitoksille. Esimerkiksi mikäli säädettävän vesivoiman osuus kokonaistuotannosta on puolet, vastaisi rajoite 4 % rajoitetta näille laitoksille<sup>72</sup>. Mallinnuksesta saatavat vaikutukset kuvastavatkin ylärajaa säätökykyisille laitoksille asetettavasta 2 % kokonaisvirtaamarajoitteesta.

### 5.3.3.3 Minimivirtaamarajoitteen mallintaminen

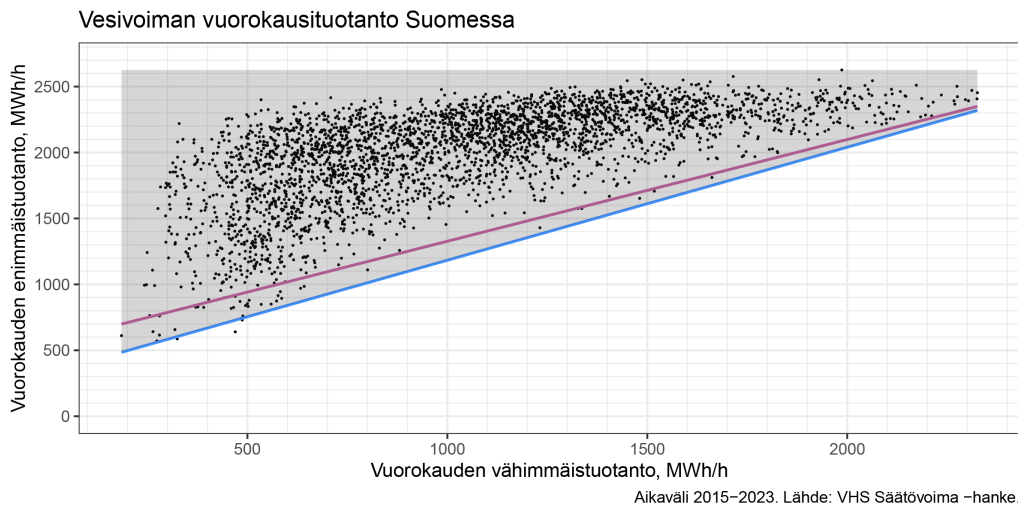
Ympäristösäätelyn muutokset voivat edellyttää muutoksia myös voimalaitosten vähimmäistuotantomääriin. Voimaloilla on nykyisten ympäristölupien puitteissa mahdollisuus säädellä tuotantomääriä joidenkin asetettujen rajoitusten puitteissa tai joillakin voimaloilla rajoitteita ei välttämättä ole lainkaan. Voimalaitoksille asetettava minimivirtaamarajoite voi pakottaa voimalat tuottamaan enemmän sähköä sellaisina aikoina, joina ne eivät olisi halukkaita näin toimimaan (ks. luku 4).

<sup>72</sup> Koska säädettävän vesivoiman osuus kokonaistuotannosta vaihtelee tunti tunnilta ja käytössä ei ole mitään tuntikohtaista tietoa yksittäisten voimaloiden tuotannosta, ei rajoitetta ole voitu mallintaa tarkemmin.

Yksittäisille voimalaitoksille kohdistuva minimivirtaamarajoite ei välttämättä vaikuta vesivoiman kokonaistuotantoon, mikäli muut voimalaitokset voivat mukauttaa tuotantoaan. Saatavilla olevasta kokonaistuotantodatasta ei kuitenkaan voida eritellä, miten yksittäiset laitokset olisivat voineet sopeuttaa tuotantoaan.

Mallinnuksessa yksittäisten laitosten minimirajoitteiden vaikutuksia kokonaistuotantoon arvioidaan käytettävissä olevan tietopohjan puitteissa. Lähtökohtana käytetään päivittäisiä tietoja vesivoiman kokonaistuotannon vähimmäis- ja enimmäismääristä. Minimivirtaamarajoite nostaa vähimmäistuotantomääriä, mutta ei vaikuta vesivoiman enimmäistuotantomäärään.

**Kuvio 16.** Vesivoiman minimituotantorajoitteen mallintaminen markkinatasolla. Kukin piste kuvastaa yhden vuorokauden toteuma-arvoa. Sininen viiva on pisteparven alarajaan sovitettu lineaarinen malli ja punaisen ja sinisen viivan erotus kuvastaa minimituotantorajan muutoksen suuruutta.



Kuviossa 16 havainnollistetaan minimirajoituksen muutoksen mallintamista. Toteumatiedoista lasketaan vesivoiman päiväkohtaisen vähimmäis- ja enimmäistuotantomäärien erotus, joka kuvastaa kuinka paljon vesivoiman tuotantoa on säädetty kunakin vuorokautena. Näistä vuorokautisista erotuksista lasketaan vuorokautisen säättökyvyn enimmäismäärä suhteessa vesivoiman vuorokautisiin vähimmäistuotantoihin, kuvioissa vesivoiman tuotantomahdollisuuksia havainnollistetaan harmaalla alueella.

Minimivirtaamarajoite vähentää säätökykyä ja nostaa tuotantomahdollisuuksien aiempaa alarajaa. Selvityksessä on arvioitu vuorokauden vähimmäistuotantomäärän nostoa 10 %:illa. Edellä kuvattu menettelytapa nostaa vesivoiman optimoinnissa käytettävää vähimmäistuotantorajoitetta kuviossa 16 sinisen ja punaisen viivan välisen erotuksen verran. Jos esimerkiksi vuorokauden vähimmäistuotanto on toteumatiedoissa ollut tasolla 500 MWh/h ja enimmäistuotanto 2370 MWh/h, on näiden välinen erotus 1870 MWh/h. Mallinnuksessa minimirajoitusten kiristämisen myötä vähimmäistuotantorajoitetta nostetaan 10 %:illa eli 187 MWh/h:lla 687 MWh/h:iin. Jos vähimmäistuotantorajoite on ollut 2 000 MWh/h, niin päivän sisäisen säätö on ollut vähäisempää ja vähimmäistuotantoa nostetaan 2 059 MWh/h:iin. Kuten edellä veden ohjuoksituksen osalta, kokonaistuotantotietojen perusteella näin mallinnettu minimituotantorajoitteen muutos tuottaa suurempia vaikutuksia, kuin vain säätökykyisille voimalaitoksille asetettava minimituotantorajoite.

## 5.4 Tulokset sähkömarkkinavaikutuksista

### 5.4.1 Vaikutukset vuorokausimarkkinalla

Suomalaisen vesivoiman säätökyvyn muutoksilla on hyvin vähäisiä muutoksia skenaarioissa esitettyyn sähkömarkkinan kokonaistilanteeseen Suomessa, ks. taulukko 8 alla. Kunkin skenaarion osalta esitellään mallinnuksen tulokset nykyisellä vesivoiman säätökyvyllä sekä keskivirtaamarajoituksen ja minimivirtaamarajoituksen aiheuttamat markkinamuutokset. Oletettujen keskivirtaamarajoitusten muutoksien myötä markkinalta poistuu energiantuotantoa, mutta päivän sisäiseen säätökykyyn minimi- ja maksimituotannon osalta ei tule muutoksia. Minimivirtaamarajoitteet kiristävät tuntikohtaista minimituotantorajoitetta, mutta eivät muuta vesivoimatuotannon määrää. Lisäksi tarkastelussa on näiden toimenpiteiden yhteisvaikutus.

**Taulukko 8.** Vesivoiman säätökyvyn muutoksien mallinnetut vaikutukset vuorokausimarkkinalla Suomessa eri skenaarioissa (2023 toisinto, Tuuli 12, 24 ja 36).

	keskihinnat					vesivoima	
	kulutus	markkina	tuuli	aurinko	vesi	tuotanto	arvo
	TWh	€/MWh	€/MWh	€/MWh	€/MWh	TWh	M€
<i>2023 toisinto</i>							
Nykysäätökyky	81.04	56.40	52.45	47.25	60.09	14.3	858
Keskivirtaama -2 %	-0.02	0.19	0.16	0.18	0.25	-0.3	-14
Minimivirtaama +10 %	0.01	0.04	-0.01	0.06	-0.37	-	-5
Yhteisvaikutus	-0.01	0.27	0.16	0.26	-0.15	-0.3	-19
<i>Tuuli 12</i>							
Nykysäätökyky	92.26	55.04	46.00	46.03	59.76	14.3	853
Keskivirtaama -2 %	-0.03	0.19	0.13	0.16	0.28	-0.3	-13
Minimivirtaama +10 %	0.00	0.05	-0.02	0.07	-0.39	-	-6
Yhteisvaikutus	-0.03	0.30	0.13	0.26	-0.11	-0.3	-19
<i>Tuuli 24</i>							
Nykysäätökyky	129.59	68.87	46.00	54.00	78.35	14.3	1119
Keskivirtaama -2 %	-0.06	0.31	0.17	0.24	0.55	-0.3	-15
Minimivirtaama +10 %	0.00	0.15	0.03	0.15	-0.43	-	-6
Yhteisvaikutus	-0.06	0.59	0.22	0.41	0.15	-0.3	-20
<i>Tuuli 36</i>							
Nykysäätökyky	165.98	80.67	46.00	54.00	94.52	14.3	1349
Keskivirtaama -2 %	-0.08	0.40	0.16	0.27	0.75	-0.3	-17
Minimivirtaama +10 %	-0.01	0.23	0.05	0.10	-0.52	-	-7
Yhteisvaikutus	-0.10	0.76	0.24	0.45	0.22	-0.3	-24

Taulukossa raportoidaan kunkin skenaarion osalta vesivoiman nykyisen säätökyvyn mukaiset markkinatulemat, muutokset keskivirtaaman aleneman ja minimivirtaaman noston tapauksissa sekä näiden toimien yhteisvaikutus. Kulutus ja sen muutokset kuvaavat sähkön vuotuisen kulutuksen määrää terawattitunteina. Sähkön markkinahinnan vuosikeskiarvon lisäksi raportoidaan tuuli-, aurinko- ja vesivoiman saamat keskihinnat ja muutokset yksikkönä €/MWh. Vesivoiman osalta raportoidaan vuotuinen vesivoiman tuotanto terawattitunteina (TWh) sekä vesivoiman tuotannon arvo miljoonina euroina (MEUR).

Kaikissa skenaarioissa vesivoiman tuotantomahdollisuuksien mallinnetuilla muutoksilla on vain vähäisiä vaikutuksia markkinatulemiin. Yhteiskunnan kokonaisvaikutusten arvioinnin kannalta keskeiset vaikutukset muodostuvat sähkönkulutuksen ja sähkön markkinahintojen muutoksien sekä vesivoimatuottajien tuottojen muutosten kautta. Yhteiskunnalliset taloudellisen tehokkuuden menetykset eli hyvinvointitappiot sähkömarkkinalla syntyvät sähkönkulutuksen määrän muutoksien kautta<sup>73</sup>. Hyvinvointitappioita syntyy myös vesivoiman tuottajien menettämien tuottojen kautta. Lisäksi sähkön markkinahinnan muutokset vaikuttavat tulonjakoon sähköntuottajien ja sähkönkäyttäjien välillä. Vesivoiman rajoittaminen nostaa sähkönhintoja ja aiheuttaa tulonsiirron sähkönkäyttäjiltä sähköntuottajille.<sup>74</sup>

Tulosten tulkinnassa on hyvä ottaa huomioon, että skenaarioiden absoluuttiset hinta-oletukset perustuvat oletuksiin tuulivoimatuotannon määrästä, tuotantoteknologioiden kustannuksista ja lisääntyvän sähkönkulutuksen maksuhalukkuudesta. Skenaarioiden tulemina muodostuvat markkinahinnat ovat huomattavasti korkeammat, kuin selvityksen laatimisajankohdan pohjoismaisen johdannaismarkkinan kaupankäyntihinnat lähi-vuosille<sup>75</sup>. Uusien tuulivoimahankkeiden investoinnit Suomeen ovatkin hidastuneet, mikä voidaan ottaa huomioon, mikäli tuloksia halutaan tulkita esimerkiksi lyhyen ja pidemmän aikavälin mahdollisten muutosten kautta<sup>76</sup>. Tämän selvityksen kannalta oleellista on tarkastella suhteellisia muutoksia eri vesienhoidon toimenpiteiden välillä, eikä ottaa kantaa skenaarioihin sinänsä.

Muutokset sähkönkulutuksessa jäävät kaikissa tarkastelluissa tilanteissa alle yhden promillen. Keskivirtaamien rajoittaminen nostaa sähkönhintoja hieman, mikä alentaa joustavaa sähkönkulutusta kaikissa skenaarioissa. Minimivirtaamien rajoittamisen vaikutukset menevät tuntikohtaisesti ristiin. Korkeimman tuulivoimatuotannon skenaarioita lukuun ottamatta sähkön kulutus nousee hieman enemmän suhteessa halpojen tuntien aikana kuin laskee korkeiden hintojen tuntien aikana. Muutokset ovat kuitenkin sekä suhteellisesti että absoluuttisesti hyvin pieniä. Koska sähkönkulutuksen määrä muuttuu vain hyvin vähän, jäävät vesivoiman tuotantomahdollisuuksien muutosten seurauksena syntyvät hyvinvointitappiot sähkömarkkinoilla hyvin pieniksi, pohjoismaisella tasolla alle 10 miljoonaan euroon vuodessa eli jälleen alle yhteen promilleen koko sähkömarkkinan arvosta. Osuus Suomessa on tätä pienempi<sup>77</sup>.

<sup>73</sup> Yhteiskunnan hyvinvointitappiolla sähkömarkkinalla tarkoitetaan tässä sähkömarkkinan tarjouskäyristä laskettua tuottajien ja kuluttajien kokonaisylijäämää.

<sup>74</sup> Ks. Vehviläinen (2023).

<sup>75</sup> Johdannaishinnat vuoden 2030 systeemihintatuotteelle olivat noin 44 euroa huhtikuun 2024 alussa.

<sup>76</sup> Esim. Yle, 12.9.2023, "Tuulivoimarakentamisen kulta-aika on ohi: Suurin kysyntä on tyydytetty ja uudet investoinnit jäissä". <https://yle.fi/a/74-20048410>

<sup>77</sup> Osa markkinavaikutuksesta välittyy siirtoyhteyksien kautta naapurimaihin.

Muutokset sähkön markkinahinnoissa ovat myös hyvin vähäisiä. Kaikissa skenaarioissa vesivoiman tuotantomahdollisuuksien muutosten hintavaikutukset ja sähkön markkina-arvon muutokset jäävät alle puolen prosentin. Kaikissa tarkastelluissa tapauksissa rajoitusten kiristäminen nostaa keskihintoja. Vaikka muutokset ovat pieniä, aiheuttavat ne tulonsiirron sähkökäyttäjiltä sähkötuottajille. Skenaarioiden mukaisella Suomen sähkökulutuksella sähkön vuotuinen markkina-arvo kasvaa mallinnetulla keskivirtaamarajoituksen muutoksella 15 miljoonaa euroa vuoden 2023 toisinnossa ja nousee 66 miljoonaan euroon korkeimman tuulivoimatuotannon skenaariossa. Vastavasti minimivirtaamarajoitteen myötä sähkön vuotuisen markkina-arvon muutos nousee 3 miljoonasta eurosta vuoden 2023 toisinnossa 38 miljoonaan euroon korkeimman tuulivoimatuotannon skenaariossa. Luvut kuvastavat kuinka paljon enemmän sähkökäyttäjät maksavat sähkötuottajille vesivoiman tuotantomahdollisuuksien muutosten seurauksena. Vertailukohtana koko sähkökulutuksen arvo on 4,6 miljardia euroa vuoden 2023 toisinnossa ja 13,4 miljardia euroa korkeimman tuulivoimatuotannon (ja kulutuksen) skenaariossa.

Skenaariot on rakennettu siten, että tuuli- ja aurinkovoiman tuotantoa rakennetaan juuri se määrä, jossa niiden saama keskihinta vastaa kokonaistuotantokustannuksia. Tuulivoiman saama keskihinta on vuoden 2023 toisinnossa 52.45 €/MWh ja kaikissa muissa skenaarioissa oletettujen kokonaistuotantokustannusten mukainen eli 46 €/MWh. Tuulivoiman saavuttama keskihinta laskee suhteessa markkinahintaan tuulivoimatuotannon kasvaessa. Kun tuulivoiman keskihinta on 84 % markkinahinnasta alhaisimman tuulivoimatuotannon skenaariossa, on keskihinta 57 % korkeimman tuulivoimatuotannon skenaariossa. Aurinkovoiman saama keskihinta on 54 €/MWh kahdessa korkeimman tuulivoimatuotannon skenaariossa, mutta jää alemmaksi vuoden 2023 toisinnossa ja ensimmäisessä skenaariossa. Aurinkovoiman tuotantokapasiteetti on ensimmäisessä skenaariossa arvioitu jo toteutuksessa olevien projektien perusteella<sup>78</sup>. Vesivoiman saama keskihinta nousee, kun skenaarioissa lisätään tuulivoiman tuotantoa ja sähkökulutusta. Vuoden 2023 toisinnossa vesivoiman keskihinta on 107 % markkinahinnasta ja korkeimman tuulivoimatuotannon skenaariossa 117 %:ia. Vesivoiman tuotantomahdollisuuksien muutoksien seurauksena vesivoiman suhteelliset hinnat muuttuvat vain vähän, alle yhden prosentin verran.

Mallinnetut keskivirtaamarajoituksen muutokset vähentävät suoraan oletuksen mukaisesti vesivoiman tuotantoa 2 %. Tämän muutoksen seurauksena vesivoimatuottajien markkinoilta saatavat tuotot pienenevät myös 2 %, mutta toisaalta vesivoiman uudelleen optimointi ja sähköhintojen nousu kompensoivat osan tästä muutoksesta. Vesivoimatuotannosta saatujen tuottojen suhteellinen vähenemä vaihtelee välillä 1,2–1,6 %. Minimirajamuutoksen vaikutukset pitävät sisällään vesivoiman optimaalisen

---

<sup>78</sup> Lähde: Fingrid Oyj, Sähkön tuotannon ja kulutuksen kehitysnäkymät Q1 2024.

käytön tiukentuneiden rajoitteiden alentamat tuotot, mutta, kuten edellä, myös markkinahintojen nousun myötä parantuvat tuotot. Kokonaisvaikutukset vesivoiman vuorokausimarkkinalta saamiin tuottoihin ovat välillä 0,5–0,6 %. Nämä tuotot on laskettu suomalaiselle vesivoimalla, ja ne eivät pidä sisällään omistajien muun sähköntuotannon lisääntynyttä arvoa tai muita vaikutuksia.

Skenaariotarkastelusta saatavat tulokset ovat yhdenmukaisia aiemman sähkömarkkinoiden kysyntä- ja tarjontakäyriä hyödyntäneen tutkimuskirjallisuuden kanssa<sup>79</sup>. Pienet muutokset vesivoiman tuotannossa eivät vaikuta merkittävästi yhteiskunnan sähkömarkkinalta saamaan kokonaishyötyyn. Vesivoiman tuotantomahdollisuuksien muutoksien vaikutukset kohdistuvat valtaosin vain vesivoiman tuottajille itselleen. Tuottajien muutoksia kompensoi sähkön markkinahintojen nousu, minkä seurauksena sähkönkäyttäjien sähkölaskut ja sähköntuottajien tuotot kohoavat.

## 5.4.2 Päivän sisäinen kaupankäynti

Pääasiallinen kaupankäynti useimmilla sähkömarkkinoilla tapahtuu päivää etukäteen käytävällä sähkön vuorokausimarkkinalla. Suomen sähkömarkkinat eivät ole tästä poikkeus, vuorokausimarkkinoiden kaupankäynnin sulkeutumisen jälkeen käytävän päivän sisäisen kaupan osuus on vuosina 2018–2023 ollut keskimäärin vain 2–3 %, ks. taulukko 9. Päivän sisäisen kaupankäynnin osuus kasvaa aikavälin loppua kohden.

**Taulukko 9.** Vuorokausimarkkinoiden kaupan ja päivän sisäisen kaupan tunneittaisten kaupankäyntivolyymien vuosikeskiarvot Suomen markkina-alueella (MWh/h) (Lähde: Nord Pool).

	Vuorokausimarkkinoiden kauppa, keskiarvo	Päivän sisäinen kauppa, keskiarvo
Vuosi	MWh/h	MWh/h
2018	5546	123
2019	5730	118
2020	5297	116
2021	5968	118
2022	5516	136
2023	5928	201

<sup>79</sup> Esim. Vehviläinen (2023), Liski ja Vehviläinen (2023), Gerlagh, Liski ja Vehviläinen (2022).

Käytettävissä olevan tietopohjan perusteella päivän sisäisen kaupankäynnin analysointi on huomattavasti hankalampaa kuin vuorokausimarkkinan. Kaupankäynnistä julkaistaan tehtyjen tarjouksien ja toteutuneiden kauppojen volyymi- ja hintatiedot, mutta ei yksittäisten tarjouksien tekijöiden tai tuotantolaitoksien identiteettejä, eikä saatavilla ole esimerkiksi tietoja kaupankäynnin jakaantumisesta tuotantoteknologioittain.

Koska valtaosa kaupankäynti volyymistä tapahtuu vuorokausimarkkinan kautta, voidaan tarjolla olevien kokonaiskulutus- ja tuotantoteknologiakohtaisten tietojen perusteella arvioida vuorokausimarkkinan kehitystä, mutta päivän sisäisen kaupankäynnin pientä osuutta ei ole arvioitu tämän hankkeen puitteissa tarkemmin sen vähäisen kokonaisuuden ja puutteellisten lähtötietojen vuoksi.

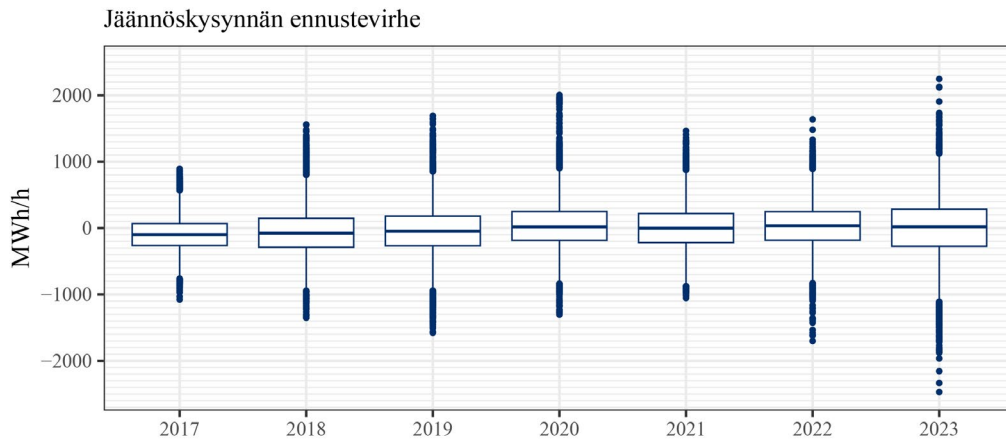
### 5.4.3 Lyhyen aikavälin vaikutukset

#### 5.4.3.1 Lyhyen aikavälin säätötarve

Sähkönkulutus ja sääriippuva tuotanto muuttuvat hetki hetkeltä satunnaisesti ja samaten sähköjärjestelmän tasapainoon vaikuttavat esimerkiksi tuotantolaitoksien ja rajasiirtoyhteyksien vikaantumiset. Näiden ennakoimattomien muutosten seurauksena päivää etukäteen tehdyt kulutuksen ja tuotannon kaupankäyntipäätökset poikkeavat toteutuksesta. Sähköjärjestelmän tasapainotuksen kannalta merkityksellinen tekijä on kulutuksen ja tuotannon ennusteiden ja toteutumien välinen poikkeama. Tätä poikkeamaa voidaan mitata jäännöskysynnän ennusteen ja toteuman välisen erotuksen eli ennustevirheen kautta.

Kuviossa 17 esitetään jäännöskysynnän ennustevirhettä vuosien 2017–2023 aikana. Jäännöskysyntä on tässä määritelty sähkönkulutuksen ja aurinko- ja tuulivoimatuotannon väliseksi erotukseksi. Lähtötietoina on käytetty järjestelmävastaava Fingrid Oyj:n julkaisemia sähkönkulutuksen sekä aurinko- ja tuulivoimatuotannon päivää etukäteen laadittuja tuntikohtaisia ennusteita ja toteumatietoja. Jäännöskysyntä lasketaan sekä ennusteille ja toteumalle ja jäännöskysynnän ennustevirhe on määritelty ennusteen ja toteuman väliseksi erotukseksi. Ennustevirheen määrittelyn osalta on huomattava, että yksittäisillä toimijoilla on enemmän informaatiota ja ainakin periaatteessa mahdollisuus tehdä tarkempia ennusteita oman tuotantonsa ja kulutuksensa osalta.

**Kuvio 17.** Jäännöskysyntä on määritelty sähkönkulutuksen ja tuuli- ja aurinkovoimatuotannon erotuksena. Ennustevirhe on ennustetun jäännöskysynnän ja toteutuneen jäännöskysynnän välinen erotus. Palkit kunkin vuoden tunneittaisista arvoista lasketta 25–75 % vaihteluväliä ja viikset ääriarvoja



Jäännöskysyntä = kysyntä–tuuli–aurinko. Lähde: Fingrid Avoin data

Jäännöskysynnän ennustevirheen keskihajonta on pysynyt likimain samana vuosien aikavälillä. Vuoden 2023 keskihajonta on aikavälin suurin, mutta toisaalta vuoden 2022 keskihajonta on pienempi kuin muina vuosina vuotta 2017 lukuun ottamatta ja näiden tietojen perusteella on vaikea löytää selkeää keskimääristä trendiä datasta tuulivoiman kasvusta huolimatta.

Jäännöskysynnän ennustevirheessä vuosien 2022–2023 osalta yksittäisten tuntien ääriarvot vaikuttavat lisääntyneen. Ääriarvojen lisääntymisen taustalla on tuulivoiman ennusteiden epätarkkuus yhdistettynä tuulivoiman tuotantomäärien kasvuun. Mikäli tuulivoiman kasvu jatkuu esimerkiksi tämän selvityksen skenaarioiden mukaisesti, vaikuttaa selvältä, että myös lyhyen aikavälin satunnaiset vuorokausimarkkinoiden kaupankäynnin jälkeiset tuotannon tasapainotustarpeen kasvavat<sup>80</sup>.

Jäännöskysynnän tulkinnassa tulee ottaa huomioon mahdolliset joustot sekä sähkön kulutuksen että tuotannon osalta. Mikäli esimerkiksi tuulivoiman tuotanto poikkeaa ennusteesta ylöspäin, on tuulivoimatuotantoa ainakin teknisesti aina mahdollista rajoittaa alaspäin ja tuulivoima voi tarjota tarvittavaa säätökykyä päivän sisäisellä markkinalla tai erilaisissa reserveissa. Samaten mikäli tuulivoimatuotantoa on ennustetta vähemmän, voidaan sähkönkulutusta vähentää kysyntäjouston kautta.

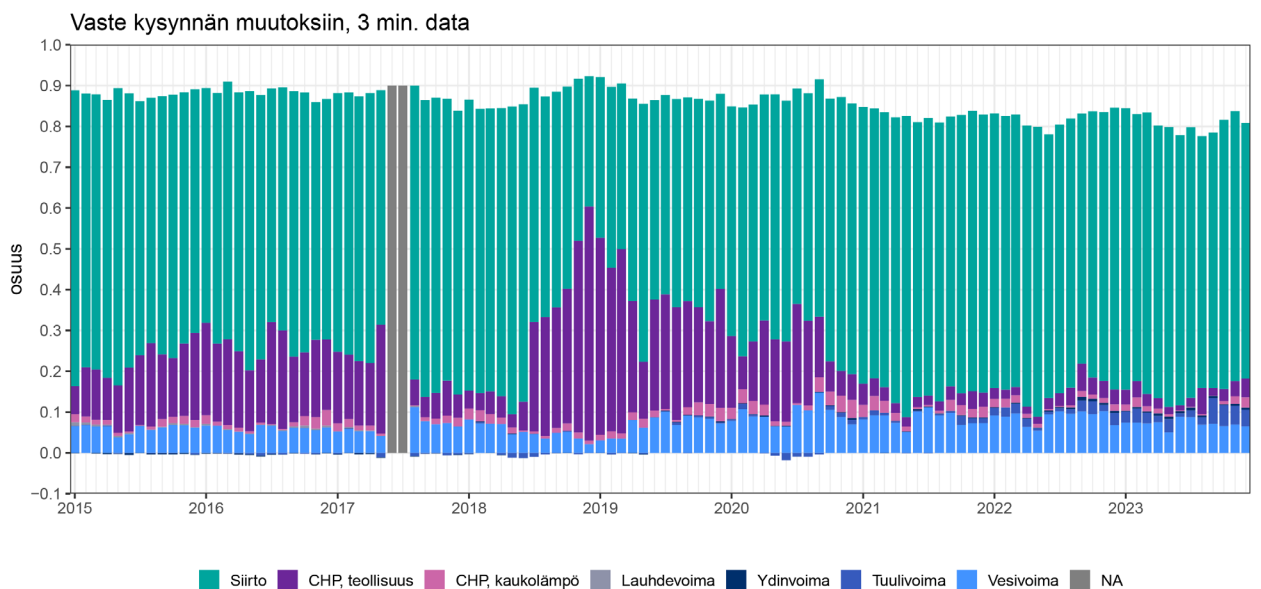
<sup>80</sup> Esimerkiksi järjestelmävastaava Fingrid Oyj:n näkemykset tukevat tätä ajatusta, ks. esim. Fingrid-lehti, 27.4.2024.

Jäännöskysynnän laskennassa käytetty tietopohja ei mahdollista erottelua siitä, kuinka paljon kysyntä tai tuotanto on reagoinut spot-markkinan sulkeutumisen jälkeisiin muutoksiin. Näiden tietopuutteiden vuoksi ei ole yksinkertaista rakentaa mallia, joka pystyisi luotettavasti ennustamaan säätötarpeen kasvua eri skenaarioissa. Kuten seuraavassa kappaleessa esitetään, ei tämän selvityksen kannalta lyhyen aikavälin tasapainotuksessa vesivoiman osuus kuitenkaan näytä olevan kovin merkittävä.

### 5.4.3.2 Vesivoiman merkitys lyhyen aikavälin tasapainotuksessa

Hankkeen skenaariotarkasteluiden kannalta on hyödyllistä ymmärtää muutoksia, joita vesivoiman käytössä tapahtuu erityisesti tuulivoiman käytön lisääntyessä. Koska käytössä oleva tietopohja ei mahdollista rakenteellisten mallien luomista, tarkastellaan eri teknologioiden roolia lyhyen aikavälin tasapainotustehtävässä historiatietojen valossa. Fingrid Oyj:n Avoimesta datasta löytyvät tiedot kulutuksesta, tuotannosta tuotantoteknologioittain jaoteltuna sekä rajasiirtoyhteyksien käytöstä kolmen minuutin tarkkuudella.

**Kuvio 18.** Kysynnän muutoksiin vastaaminen teknologioittain kolmen minuutin datasta luetuna

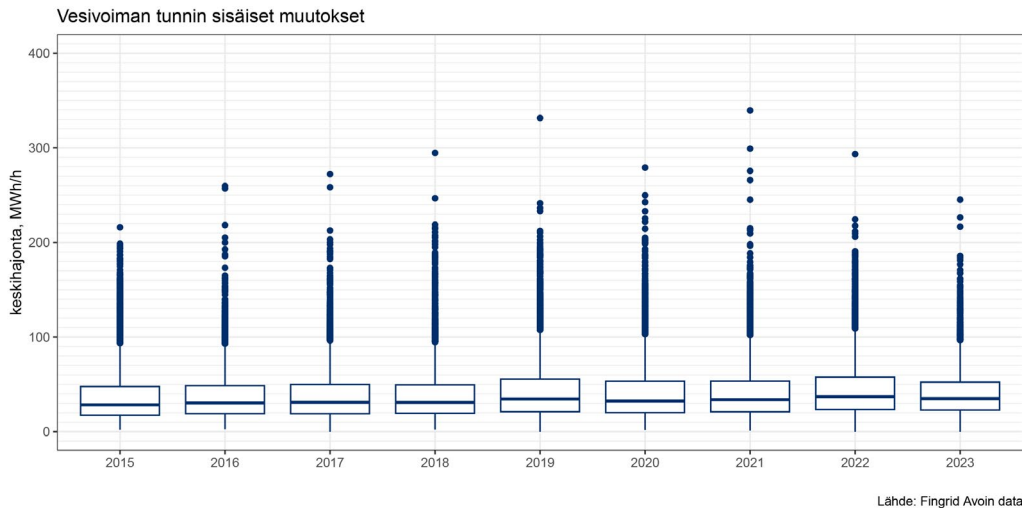


Kuviossa 18 esitetään lyhyen aikavälin muutokset nettorajasiirrossa ja eri tuotantomuodoissa kun kysyntä muuttuu yhdeltä kolmen minuutin jaksolta toiselle. Kuviossa esitetään keskimääräiset muutososuudet kuukausitasolla. Jos osuus on esimerkiksi 0.5, tarkoittaa tämä, että jos kulutus on muuttunut yhdeltä kolmen minuutin jaksolta seuraavalle 1.0 megawattituntia, on kyseinen teknologia muuttunut keskimäärin samaan suuntaan 0.5 megawattituntia. Kuvion osuudet eivät summaudu tasan yhteen, koska osa muutoksista menee vastakkaiseen suuntaan sähkönkulutuksen muutoksien kanssa.

Muutoksia kolmen minuutin tasolla dominoi sähkön rajasiirto: valtaosa lyhyen aikavälin tasapainotuksesta tapahtuu rajasiirtojen kautta. Merkittävin muutos vuosien 2015–2023 välillä näyttää olevan teollisuuden yhteistuotannon muutosten väheneminen, mikä saattaa liittyä teollisuuden sähkönkulutuksen rakenteellisiin muutoksiin ja kulutuksen absoluuttisten määrien laskuun tai sitoumuksiin, joita suuret sähkökäyttäjät ovat tehneet Olkiluoto 3:n järjestelmäsuojaan liittyen. Vesivoiman keskimääräinen vuotuinen osuus kulutuksen lyhyen aikavälin tasapainottamisesta vaihtelee 0.05 ja 0.09 välillä vuosina 2015–2023. Vesivoiman tasapainotusosuuksissa ei ole havaittavissa selkeitä muutoksia, vaikka suomalaisen tuulivoiman osuus aikavälillä kasvaa merkittävästi.

Vesivoiman käyttöä voidaan tarkastella kolmen minuutin datasta myös suoraan. Kuviossa 19 esitetään vesivoiman tunnin sisäistä tuotannon vaihtelua vuosien 2015–2023 välisenä aikana. Kuten tuotanto-osuuksien tarkastelussa, aikavälillä ei ole havaittavissa selkeää muutosta vesivoiman käytössä. Tuulivoiman lisäys alle 1 000 MW:n tasolta vuonna 2015 vuoden 2023 lopun vajaan 7 000 MW:iin ei näytä muuttaneen vesivoiman lyhyen aikavälin käyttöä käytössä olevasta tietopohjasta havaittavalla tavalla.

**Kuvio 19.** Kuviossa esitetään vesivoiman kolmen minuutin tuotantomäärien muutoksien keskihajonta. Keskihajonta on mitattu tunneittain ja kuva esittää näin laskettujen tuntiarvojen 25–75 % vaihteluvälin (palkit) sekä ääriarvot.



### 5.4.3.3 Reservien käyttö

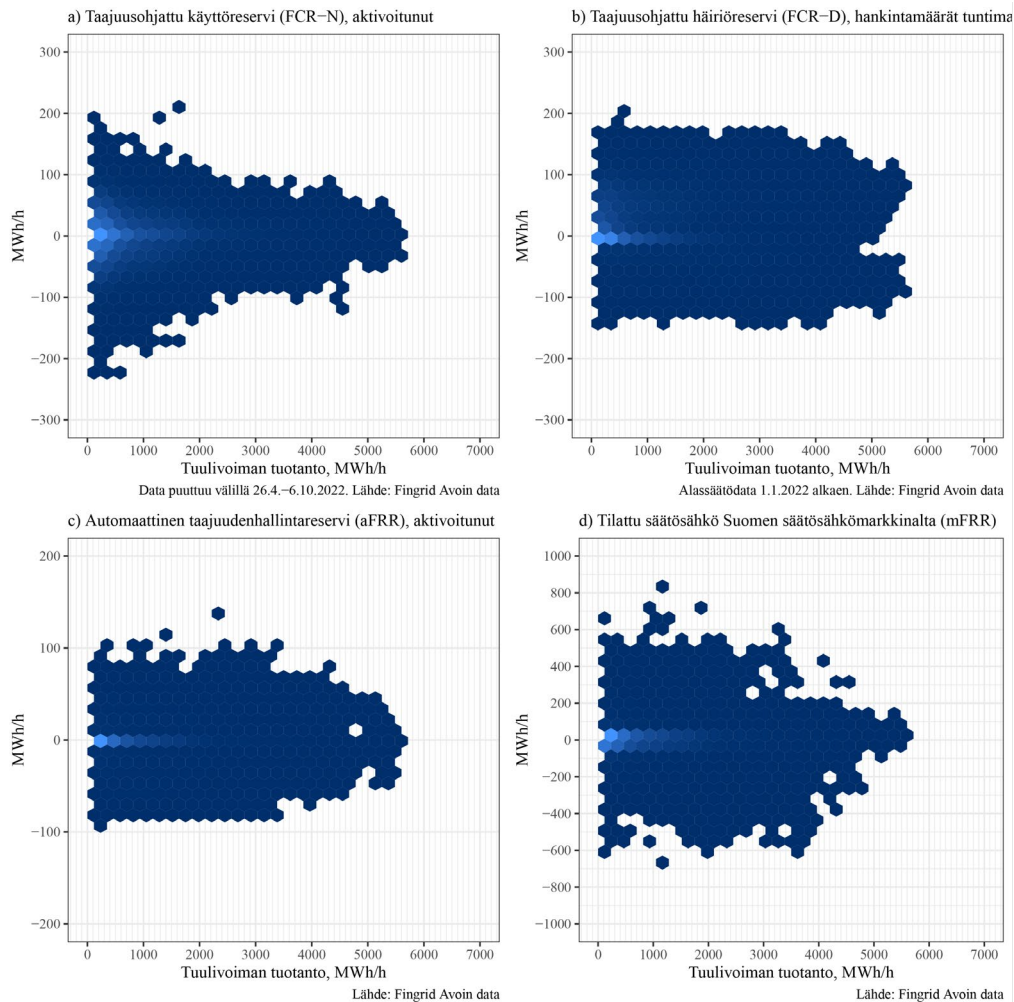
Edellä kuvattuja lyhyen aikavälin muutoksia koordinoidaan järjestelmäoperaattorin kautta eri reservien kautta (ks. luku 2). Reservimarkkinatiedot pohjautuvat osin kolmen minuutin muutoksia lyhyempiin aikajännteisiin, joten vaikka vesivoiman käyttäytyminen ei näytä juuri muuttuneen kolmen minuutin aikajännteellä, voidaan mahdollisia muita muutoksia tarkastella reservikohtaisten tietojen perusteella. Käytettävissä olevan tietopohjan perusteella ei voida yksilöidä tiettyjen toimijoiden tekemiä tarjouksia tuntimarkkinoille, säätösähkömarkkinoille tai erilaisiin reserveihin. Tietoja reservimarkkinoilta ei ole tarjolla teknologiakohtaisesti tuntitasolla ja kuukausitasolle aggregoidut teknologiakohtaiset tiedot ovat puutteellisia<sup>81</sup>.

Kuten edellä, reservien käyttöä suhteutetaan tuulivoimaan määrään, jotta tietojen perusteella voitaisiin arvioida tulevaa kehitystä. Kuviossa 20 esitetään reservien aktivoituneet määrät suhteessa tuulivoiman tuotantoon. Aktivoituneiden reservien volyymit sekä Suomen säätösähkömarkkinalta tilattu sähkön volyymit näyttävät olevan alempia samanaikaisesti korkeamman tuulivoimatuotannon määrän kanssa. Tämän yhteyden perusteella ei voida suoraan päätellä, että tuulivoimatuotanto alentaa suomalaisten reservien tarvetta. Tarkempi analyysi vaatisi ekonometrista mallia, jossa olisi uskottava

<sup>81</sup> Tuntikohtaisia tietoja ei ole luovutettu tutkimuskäyttöön järjestelmästäva Fingrid Oyj:n toimesta toimijoiden liikesalaisuuksiin vedoten. Vaikka Fingrid Oyj toteuttaa yleishyödyllisiä lakiin perustuvia tehtäviä, ei sen toiminta kuitenkaan ole julkisuuslain alaisuudessa. Fingrid Oyj on raportoinut eri tuotantomuotojen markkinaosuuksia eri reserveissa kuukausitasolla vuoden 2018 alusta vuoden 2022 helmikuuhun. Tämän jälkeen tietoja on raportoitu vain säätösähkömarkkinan osalta (mFRR) vuoden 2024 toukokuun loppuun saakka.

ulkoinen variaatioin lähde tai rakenteellisen mallin käyttöä. Kuten edellä on kuvattu, käytössä oleva tietopohja ei ole mahdollistanut tarkempaa analyysiä tämän selvityksen puitteissa. Mahdollinen selitys liittyy rajasiirtoyhteyksien käyttöön. Kun kotimaisen tuulivoimatuotannon määrä on alhainen, on Suomi ollut tarkasteluvälillä riippuvainen tuontisähköstä, jota on tuotu usein täydellä kapasiteetilla. Kun tuulivoimatuotannon määrä lisääntyy, vapautuu rajasiirtokapasiteettia myös reservien ja säätösähkömarkkinan hankintaan muista maista.

**Kuvio 20.** Reservien käyttö Suomessa suhteessa tuulivoimatuotannon määrään: a) taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N), b) taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D), c) automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR) ja d) säätösähkömarkkina (mFRR).



Vesivoiman lyhyen aikavälin käyttö ei näytä juuri muuttuvan tuulivoiman lisääntymisen seurauksena ja myöskään reservien käyttöä ei voida selvityksen perusteella liittää tuulivoimatuotannon kasvuun. Selvityksen tulosten perusteella ei vaikuta todennäköiseltä, että vesivoiman rooli sähköjärjestelmän lyhyen aikavälin tasapainottamisessa merkittävästi muuttuisi, mikäli tuulivoiman kasvu ei ole erityisten voimakasta tai mikäli markkinalla ei tapahdu muita merkittäviä muutoksia.

Mahdollinen markkinavoiman käyttö vähentää historiatietojen käyttökelpoisuutta entisestään reservimarkkinoiden osalta. Reservimarkkinoiden läpinäkyvyys on tuntimarkkinoita heikompi ja reservimarkkinoiden monimutkaisuus tarjoaa isoille toimijoille mahdollisuuksia hyödyntää markkina-asemaansa monilla tavoin. Tämän selvityksen puitteissa ei ole voitu muodostaa perusteltua käsitystä siitä kuvastaako reservien havaittu käyttö markkinaehtoista kilpailullista toimintaa vai heijastelevatko reservimarkkinoiden tulemat toimijoiden strategista käyttäytymistä.

#### 5.4.3.4 Reservien tarjonta

Järjestelmävastaava Fingrid Oyj on esittänyt oman arvionsa eri reserveissa käytössä olleista teknologioista kuukausitasolla<sup>82</sup>. Teknologiakohtaiset osuudet taajuusohjatun käyttö- ja häiriöreservin osalta on esitetty taulukossa 10 ja säätösähkömarkkinoiden osalta taulukossa 11 Taajuusohjattujen reservien osalta tiedot kattavat kokonaisuudessaan vuodet 2018–2021 ja säätösähkömarkkinalla tiedot myös vuodet 2022–2023. Lisäksi vuosien 2018–2021 osalta on ilmoitettu vesivoiman osuuden olevan 100 % automaattisen taajuudenpalautusreservin (aFRR) tarjonnasta ja vesivoimalla ei ole roolia nopeassa taajuusreservissä (FRR).

**Taulukko 10.** Eri teknologioiden osuudet taajuusohjatuissa reserveissa.

Vuosi	Kulutus, %	Varastot, %	Lämpövoima, %	Vesivoima, %
Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)				
2018	2	3	11	84
2019	4	4	12	81
2020	2	10	11	77
2021	3	30	6	61

<sup>82</sup> Fingrid Oyj, Suomen reservimarkkinoiden tarjonta ja hankinta teknologioittain, excel-tiedostot, 2.6.2022 ja 6/2024.

Vuosi	Kulutus, %	Varastot, %	Lämpövoima, %	Vesivoima, %
Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)				
2018	72	1	2	25
2019	58	1	5	36
2020	58	1	4	36
2021	54	1	2	43

**Taulukko 11.** Taulukko 5.5. Eri teknologioiden osuudet säätösähkömarkkinalla (mFRR).

Vuosi	Kulutus, %	Lämpövoima, %	Tuulivoima, %	Vesivoima, %
<i>Alassäätö (mFRR)</i>				
2018	1	5	0	94
2019	1	8	0	90
2020	3	17	0	79
2021	3	11	0	85
2022	11	13	0	75
2023	12	10	11	67
<i>Ylösäätö (mFRR)</i>				
2018	6	13	0	81
2019	7	11	0	82
2020	8	20	0	71
2021	9	19	0	72
2022	14	22	0	64
2023	5	16	6	72

Reserveihin osallistuvien teknologioiden suhteelliset osuudet kuvastavat muutosta reservien tarjonnan rakenteessa. Verrattuna vuoteen 2018 kulutukseen, varastoihin ja tuulivoimaan perustuvat tarjoukset ovat lisääntyneet vuoden 2021 tai 2023 tilanteessa. Vesivoiman osuus on taajuusohjattua häiriöreserviä lukuun ottamatta laskenut kaikissa taulukoiden kuvaamissa reservilajeissa. Havaittu muutos vahvistaa aiemmin luvussa 2 esitettyä Fingrid Oyj:n arvioita, että vesivoiman lisäksi eri reserveissa voidaan käyttää muita teknologioita.

Järjestelmävastaava Fingrid Oyj on esittänyt arvion tulevasta reservituotteiden hankintatarpeesta, mutta ei arviota miten reservien tarjonta kehittyy. Reservien määrän ennakoitu kasvu vaikuttaa perustuvan osin reservimarkkinoiden rakenteellisiin muutoksiin ja osin jo muuttuneeseen markkinatilanteeseen. Suurimmat muutokset ovat mFRR:ssä, jossa perusteina ovat varavoimalaitosten käyttösopimusten päättyminen (ylössäättö) ja hankintamäärien kasvattaminen mitoittavaa vikaa vastaavaksi (alassäättö, esim. vientiyhteyden äkillinen katkeaminen). Reservien tarpeen ennakoidaan kasvavan myös tavanomaisen tasevirheen osalta, mutta tähän liittyy erittäin suuri epävarmuus.<sup>83</sup>

Reservien tarjonnan lähteitä tulevaisuudessa ei ole tässä selvityksessä kartoitettu tarkemmin. Erityisesti varavoimalaitoskapasiteetin osalta vanhan pitkäaikaisen sopimusrakenteen purkaminen luo epävarmuutta tulevasta kehityksestä. On mahdollista, että muutosten seurauksena Fingrid Oyj hankkii reservikäyttöön entistä enemmän vesivoiman tuotantoa. Tämä ei kuitenkaan lisää vesivoiman kokonaismäärää sähköjärjestelmässä, vaan voi aiheuttaa vesivoiman siirtymää pois sähkömarkkinoilta. Vesivoiman marginaalinen lisäarvo sähkömarkkinoilla voikin lisääntyä muutosten seurauksena. Yhtälailla on mahdollista, että lisääntyvä reservien hankinta toteutetaan muiden teknologiavaihtoehtojen kautta.

## 5.5 Muut markkinavaikutukset

Hankkeessa tarkastellut vesienhoidon toimenpiteet vaikuttavat vesivoiman tuotantoon vain vähän ja muutoksien suuruudet ovat vähäisiä verrattuna vesivoiman sääriippuvuudesta seuraavaan normaaliin vuotuisen vaihteluun. Vuosina 2015–2023 vesivoiman tuotanto on vaihdellut välillä 12,0–15,5 TWh keskiarvon ollessa 13,5 TWh<sup>84</sup>. Selvityksessä tarkasteltu konservatiivinen vesivoimatuotannon kokonaismäärän 2 % vähennys tarkoittaisi keskimäärin 0,3 TWh:n muutosta tähän vaihteluväliin.

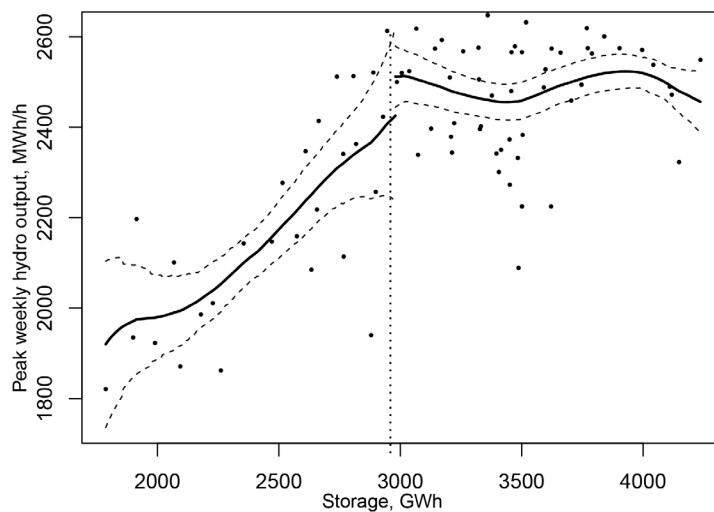
Toimitusvarmuudella tarkoitetaan sähköjärjestelmän kykyä selviytyä tasapainotustehtävistä niin, että sähkön tarjontaa on riittävästi vastaamaan kysyntään. Selvityksessä tarkastellut toimenpiteet vaikuttavat vesivoiman tuotannon minimirajoituksiin, eikä niillä ole suoraa vaikutusta vesivoiman maksimituotantoon. Vesivoiman keskivirtaamarajoi- tus vähentää vesivoiman keskimääräistä tuotantoa, mutta tällä ei ole suoraa vaikutusta vesivoiman maksimituotantokapasiteettiin yksittäisten tuntien osalta. Toisaalta nykyisenkin vesivoiman tuotantomahdollisuuksien luontaisen vaihtelun perusteella voidaan pohtia, onko tarpeen vähentää riippuvuutta vesivoimasta sähköjärjestelmän tasapainoittajana: kuivien vuosien alhaiset varastotasot voivat vähentää vesivoiman tuotantomahdollisuuksia. Kuviossa 21 esitetään Suomen vesivoiman talviajan viikoittainen

<sup>83</sup> Fingrid-lehti, 27.4.2024.

<sup>84</sup> Lähde: Fingrid Avoin data.

maksimituotanto suhteessa vesivarastotilanteeseen. Näiden historiatietojen valossa varastotasojen alentuessa vesivoiman kokonaistuotanto on ollut alhaisempi.

**Kuvio 21.** Suomen vesivoiman viikoittainen maksimituotanto (peak weekly hydro output, MWh/h) talviaikana suhteessa vesivoiman varastotasoon (storage, GWh) vuosina 2010–2018. Varastotasot on mitattu koko maan vesivoiman varastona ja tuotanto on koko maan vesivoiman tuotanto. (Kuva on toisinto artikkelista Vehviläinen, 2021).



Sähkömarkkinoiden huoltovarmuuden varmistaminen liittyy vakaviin ja pitkäkestoiisiin häiriötilanteisiin, jolloin sähköntarpeen kattaminen voi olla uhattuna. Sota Euroopassa ja Itämeren alueella tapahtuneet kriittisen energiainfrastruktuurin vauriot ovat voimakkaasti lisänneet tällaisia uhkakuvia. Vesienhoitotoimenpiteiden vaikutusten osalta varautumistoimenpiteet voidaan kuitenkin pitää erillisinä. Mikäli pienet muutokset vesivoiman tuotantomahdollisuuksista vaarantaisivat kansallisen huoltovarmuuden, voidaan tähän varautua luomalla menettelyt tuotantomahdollisuuksien palauttamiseksi tai lisäämiseksi poikkeuksellisissa olosuhteissa.

## 5.6 Menetelmien arviointi

### 5.6.1 Skenaariot

Skenaarioihin perustuvan mallintamisen rajoitteena on, että kaikki muut epävarmuudet on rajattu tarkastelun ulkopuolelle. Mallinnustulokset perustuvat vuoden 2023 lähtötietoihin, jotka kiinnittävät esimerkiksi säätilan, ydinvoimatuotannon määrän, fossiilisten

polttoaineiden ja EU:n päästökaupan päästöoikeuksien hintatasot, sekä markkinatoimijoiden tekemät päätökset vesivoiman allokoinnista vuoden yli.

Merkittäväällä tavalla Suomen ja lähialueiden sähköhintoihin mahdollisesti vaikuttavia tekijöitä ovat lisäksi sähkön kysyntään vaikuttava yleinen talouden kehitys Suomessa ja lähialueilla, Suomen kilpailukyky suhteessa muihin maihin ja geopolittisen tilanteen arvaamattomuus. Samaten skenaarioiden tuotantomääriin, absoluuttisiin hintatasoihin ja tasapainotuksen kautta haettuun kysynnän määrään vaikuttaa oletukset tuotantoteknologioiden kustannuksista ja lisääntyvän kulutuksen rakenteesta. Skenaarioiden mukaiset muutokset sähkön tuotanto- ja kulutusrakenteissa voivat aiheuttaa myös muita muutoksia markkinoille tehtävissä tarjouksissa. Näiden muutosten yksityiskohtainen arviointi on rajattu tämän hankkeen ulkopuolelle.

Koska mahdollisesti päätettävät muutokset vesivoiman tuotantoon ovat etukäteen tiedossa, voidaan ennakoitavissa olevien muutosten ajatella vaikuttavan myös pitkän aikavälin tasapainotukseen. Laskennassa aurinko- ja tuulivoiman kapasiteetit kuitenkin pidetään kiinnitettyinä tulosten tulkinnan selkeyden vuoksi. Mikäli tasapainotus tehtäisiin uudestaan, muutokset tuotantokapasiteeteissa olisivat korkeimman tuulivoimatuotannon skenaarioissakin hyvin pieniä<sup>85</sup>.

## 5.6.2 Vuorokausimarkkinan mallintaminen

Vuorokausimarkkinoiden spot-markkinamallin lähtötietoina käytetään Norjasta, Ruotsista, Suomesta ja Tanskasta koottuja kysyntä- ja tarjontatietoja. Todellisuudessa sähkömarkkinoiden hinnat lasketaan näissä maissa yhteensä 12 hinta-alueelle, joista Suomen hinta-alue on yksi. Vesivoiman tuotantomahdollisuuksien muutoksien markkina-vaikutuksista Suomessa voitaisiin muodostaa tarkempi arvio, mikäli käytössä olisi riittävä aineisto spot-markkinahintojen määrittämiseen hinta-aluekohtaisella tarkkuudella. Tällaista aineistoa ei hankkeen aikana kuitenkaan ole ollut käytettävissä<sup>86</sup>. Tarkempien tietojen puuttuessa systeemihintaa on käytetty lähtökohtana taloustieteellisessä kirjallisuudessa, jossa tarkastellaan pohjoismaista sähkömarkkinaa käyttäen toteutuneita kysyntä- ja tarjoustietoja<sup>87</sup>.

<sup>85</sup> Enimmillään 100 MW lisäys aurinko- ja tuulivoiman tuotantokapasiteettiin painaisi näiden saaman keskihinnan alle oletetun kokonaistuotantokustannuksen.

<sup>86</sup> Hinta-aluekohtaisia tietoja ei ole saatavissa sähköpörssien kautta edes tutkimuskäyttöön. Energiavirasto on antanut kielteisen päätöksen asiaan liittyvään tietopyyntöön (3946/000602/2023). Saatavilla on maakohtaisia tietoja, mutta näiden avulla ei voida erotella esim. Keski-Ruotsin ja Pohjois-Ruotsin välisiä eroja.

<sup>87</sup> Esim. Lundin ja Tangerås (2020), Liski ja Vehviläinen (2022), Vehviläinen (2023).

Mikäli käytössä olisi hinta-aluekohtaisia lähtötietoja, voitaisiin skenaariotyypillisellä lähestymistavalla kohdistaa näihin erilaisia oletuksia muualla tehtävistä investoinneista ja tarkastella niiden vaikutuksia Suomeen. Pitkän aikavälin tasapainossa eri alueiden hintojen pitäisi kuitenkin lähestyä toisiaan. Lukuisissa tarjolla olevissa skenaariomallinnuksissa tehdyt valinnat voivat tuottaa erilaisia tulemia, joissa alueiden väliset hinnat voivat eriytyä, mutta nämä perustuvat skenaarioiden laatijoiden oletuksiin, jotka poikkeavat markkinaehtoisesta kehityksestä<sup>88</sup>.

Perusteltavissa oleva lähde tulevan hintakehityksen arvioimiseen ovat sähkön markkinahinnat. Käytettynä lähtövuotena 2023 sähkön Suomen hinta-alueen keskihinta on ollut 56,47 €/MWh ja systeemihinnan keskihinta 56,45 €/MWh. Tulevia hintaodotuksia voidaan havainnollistaa tuleville vuosille tehtävien sopimusten hintojen perusteella. Sähkön johdannaismarkkinoilla käydään kauppaa Suomen hinta-alueen ja systeemihinnan välisistä tulevasta hintaeroista. Vuoden 2024 alkupuolella markkinaoletukset hintaerosta Suomen ja systeemihinnan välillä ovat vuosituotteille 2025–2028 laskevasti 5 €/MWh ja nollan välillä.

Vesivoiman säätökyvyn muutosten markkinavaikutusten kannalta keskihintoja oleellisempaa on tarkastella sähkön hintajakaumia. Yleisesti käytetty testi jakaumien samankaltaisuuden arviontiin on nk. Kolmogorov-Smirnov -testi<sup>89</sup>, joka mittaa jakaumien empiiristen kertymäfunktioiden välistä suurinta eroa. Testin perusteella Suomen aluehinnan ja systeemihinnan jakaumien erot olivat 2000-luvun ensimmäisellä vuosikymmenellä suhteessa alhaisemmat kuin 2010-luvulla<sup>90</sup>. Sen sijaan 2020-luvun ensimmäisten kolmen vuoden jakaumat ovat jälleen lähentyneet toisiaan<sup>91</sup>. Markkinoiden konvergoitumisesta on saatu saman suuntaisia havaintoja käyttäen ekonometrisia menetelmiä markkinoiden kytkeytyneisyyden tutkimuksessa<sup>92</sup>.

Sähkömarkkinamallissa käsitellään tuntikohtaisia kysyntä- ja tarjoustietoja. Valtaosa tarjouksista sähkön markkinapaikalle on nk. yksinkertaisia tarjouksia, joissa määritetään yhden tunnin hinta- ja määräparit eli paljonko ostetaan tai myydään ja mihin hintaan. Näiden käsittely mallinnuksessa on suoraviivaista. Toimijat voivat jättää myös monimutkaisempia tarjouksia, kuten nk. blokki-tarjouksia, joilla voidaan määrittää tarjouksen läpimenoarjaksi joidenkin tuntien keskihinta. Näiden monimutkaisten tarjousra-

<sup>88</sup> Ks. esim. Chen et al. (2019).

<sup>89</sup> Massey (1951).

<sup>90</sup> Selitys voi liittyä Olkiluoto 3:n jatkuvaan viivästymiseen 2010-luvulla, uusia investointeja hintaerojen tasaamiseksi ei ole tehty, koska suuri ydinvoimayksikkö on ollut jatkuvasti tulossa markkinoille.

<sup>91</sup> Kolmogorov-Smirnov -testin keskiarvo vuosikohtaisille Suomen aluehinnan ja systeemihinnan jakaumien eroille vuosina 2001–2010 on 0.09, 0.25 vuosina 2011–2020 ja 0.11 vuosina 2021–2023. Mitä pienempi testin lukuarvo on, sitä lähempänä jakaumat ovat toisiaan.

<sup>92</sup> Ks. Uribe et al. (2020).

kenteiden toteumahinnoilla läpimenneet tarjousmäärät on huomioitu tarjouskäyrien mukaisesti. Tarkempi analyysi monimutkaisista tarjousrakenteista edellyttäisi hinta-aluekohtaista dataa ja yksityiskohtaisia tietoja eurooppalaisten hintojen laskennassa käytetävän EUPHEMIA-algoritmin toteutuksesta, mutta kumpaakaan näistä ei ole saatavilla<sup>93</sup>.

### 5.6.3 Markkinavoima

Lähtökohtana vesivoiman ja muun joustavan tuotannon sekä investointipäätösten mallinnuksessa on markkinoiden kilpailullinen toiminta. Tämä oletus tarkoittaa, että mallinnuksen tuloksena toteutuva kustannustehokas resurssien käyttö tuottaa samat tulokset kuin yksityisten toimijoiden voittoa tavoittelevat päätökset.

Tämän ja muiden sähkömarkkinaa tarkastelevien hankkeiden kannalta mahdollisuus markkinavoiman käyttöön vaikeuttaa numeeristen tulosten tulkintaa. Toteutuneista hintatasoista ei tiedetä kuvastavatko ne todellisia kustannustasoja vai toimijoiden strategista käyttäytymistä.

Suomessa ja Pohjoismaissa markkinoiden toimivuutta on vaikea arvioida, koska tarvittavia tietoja ei ole luovutettu tutkimuskäyttöön. Mahdollinen markkinavoiman käyttö vääristää markkinatulemia ja vaikeuttaa historiallisten tietojen käyttöä tulevan kehityksen arvioimisessa. Esimerkiksi tässä selvityksessä tehtävässä analyysissä tukeudutaan oletuksiin siitä, että havaitut hintatasot kuvastavat todellista niukkuutta markkinoilla, mutta todellinen kilpailutilanne voi poiketa tästä oletuksesta.<sup>94</sup>

### 5.6.4 Vertailu muihin selvityksiin

Saatujen tulosten perusteella vesivoiman tuotantomahdollisuuksien muutoksien markkinavaikutukset vaikuttavat vähäisiltä. Tämä ei ole yllättävää verrattuna aiempiin selvityksiin ja taloustieteen perusteista seuraaviin odotuksiin. Pieniä tehokkuusmuutoksia selittää sähkön joustamaton kysyntä. Vesivoiman tuotannon pienet muutokset muuttavat hintatasoja, mutta joustamattomuus tarkoittaa, että hintatasojen muutokset eivät juuri muuta kulutetun sähkön määrää.

<sup>93</sup> Vaikka EUPHEMIA-algoritmin toteutuksen periaatteet ovat julkisia, on ratkaistava optimointitehtävä luonteeltaan liian monimutkainen (ei-konvekssi mixed integer program) replikoitavaksi ilman täsmällisiä lähtötietoja ja koodia.

<sup>94</sup> Sähkömarkkinan toimivuuden ja vesivoiman käytön kannalta oleellisia tietoja on pyydetty tämän hankkeen toteutusta varten Energiavirastolta ja SYKE:ltä, mutta tietoja ei ole luovutettu.

Vuoden 2018 Suomen kivihiilikiellon vaikutusten simulaatiomallilla tehdyssä tarkastelussa löydettiin vain vähäisiä vaikutuksia hintatasoihin pohjoismaisella sähkömarkkinalla, eikä juuri muita vaikutuksia<sup>95</sup>. Suomalaisen vesivoiman tuotantokapasiteetin muutoksista tehdyssä tutkimuksessa vuodelta 2023 tehokkuusvaikutukset muulla pohjoismaisella markkinalla jäivät vähäisiksi ja tuotantokapasiteetin muutosten vaikutukset kohdistuvat lähes kokonaan laitosten omistajiin<sup>96</sup>.

Ruotsissa kansallinen järjestelmävastaava Svenska kraftnät on selvittänyt Ruotsin vesivoiman ympäristölupaehtojen uudelleentarkastelun vaikutuksia. Selvityksessä on tarkasteltu simulaatiomallilla skenaarioita, joissa useissa puututaan tämän selvityksen lähtökohtia huomattavasti voimakkaammin vesivoiman tuotantomahdollisuuksiin. Lähimpänä tämän selvityksen oletuksia olevassa tarkastelussa (Ruotsin selvityksen skenaario D), muutokset tilanteeseen, jossa sääntelyyn ei puututa, ovat huomattavasti pienempiä. Ruotsin selvityksessä on tarkasteltu toimenpiteiden toteuttamista jo vuonna 2027, mikä ei vastaa todellista toimenpiteiden toteuttamisaikataulua.<sup>97</sup> Yleisesti simulaatiomallien haasteena on tarve kiinnittää kaikki lähtöoletukset asiantuntija-arvioihin perustuen, tämä jättää huomioimatta muut markkinaan vaikuttavat tekijät. Tämän selvityksen lähestymistapa ottaa huomioon lyhyen aikavälin markkinavaikutukset tarjouskäyrien perusteella, mutta jättää simulaatiomalleja avoimemmaksi pidemmän aikavälin muutosten vaikutukset.

---

<sup>95</sup> Pöyry (2018b).

<sup>96</sup> Vehviläinen (2023).

<sup>97</sup> Svenska kraftnät (2023).

## 6 Ympäristötoimien vaikutus vesivoimalaitoksen säätökykyyn

Mallinnetut vesienhoitotoimiskenaariot 'Keskivirtaama -2 %', Minimivirtaama +10 %' ja 'Keski- ja minimivirtaama' vaikuttavat vesivoimatuottajan kokonaistuotantotuloon (€), reservitarjontaan (MW/MWh) sekä virtaama-allokaation (nollavirtaamapäivät). Tässä kappaleessa esittelemme vesienhoitotoimien vaikutukset pienen 10 MW voimalaitokset tapauksessa, jossa voimalaitos tarjoaa sähkön vuorokausimarkkinoiden lisäksi FCR-N tuntimarkkinoille, sekä suuren 50 MW voimalaitoksen tapauksessa, jossa vuorokausimarkkinoiden lisäksi voimalaitos tarjoaa kapasiteettia aFRR-markkinapaikalla ja energiaa mFRR-markkinapaikalle.

Esitetyt tulokset ovat vuotuisia keskiarvoja mallinnetun vesivoimatuottajan toimintaympäristöstä yli erilaisten vesivoiman sisäänvirtaamaprofiilin ja reservimarkkinoiden vuositulemien. Sisäänvirtaamaprofiilit edustavat lähimmän vuosikymmenen, 2010–2022, toteutuneita tulemia. Reservimarkkinoiden tilattujen reservituotteiden määrät edustavat lähivuosien, 2020-2023, tulemia. Mallinnetut reservituotteiden hinnat riippuvat käytetystä sähköjärjestelmäskenaariosta. Mallinnettu toimintaympäristö kokonaisuudessaan kuvaa siis vesivoimatuottajan päätöksentekoa, kun sisäänvirtaavan energian toteuttamaan ja tilatun reservimarkkinoiden määrään ja hintaan liittyy epävarmuutta.

Pienen 10 MW voimalaitoksen tuntikohtainen keskituotanto on 3,95 (MWh). Skenaariossa 'Keskivirtaama -2 %' vesivoimatuottajan käytössä olevasta kokonaisenergiamäärästä vähennetään tasaisesti 0,08 (MWh) vuoden jokaiselle tunnille. Suuren 50 MW voimalaitoksen tuntikohtainen keskituotanto on 23,2 (MWh). Skenaariossa 'Keskivirtaama -2 %' vesivoimatuottajan käytössä olevasta kokonaisenergiamäärästä vähennetään tasaisesti 0,47 (MWh) jokaiselle tunnille. Suuren voimalaitoksen tuntikohtaisen maksimi- ja minimituotantotasojen erotus on 47,5 (MWh). 'Minimivirtaama +10 %' skenaariossa voimalaitoksen minimituotantotasoo nousee 4,75 MWh:lla, eli käytettävissä oleva tuotantoväli kapenee 10 %. Tällöin vesivoimatuottajan uusi minimituotantorajoite on 7,25 (MWh/h).

## 6.1 Pieni voimalaitos: Vuorokausi- ja FCR-N-markkinapaikat

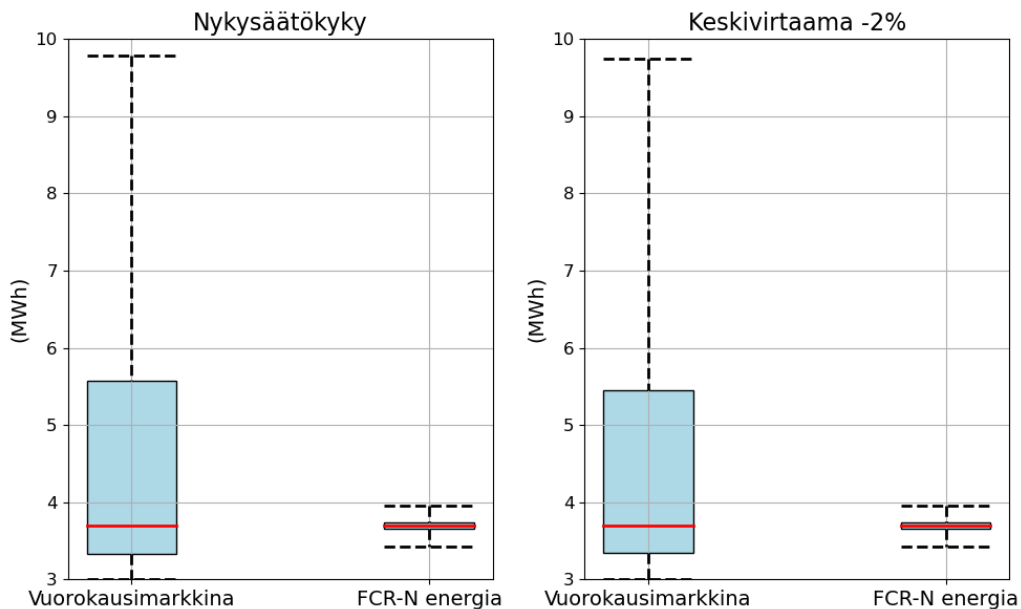
Taulukko 12 esittelee tuotantotulojakauman vuorokausi- ja reservimarkkinoiden välillä eri skenaarioissa. Vesienhoitorajoite 'Keskivirtaama -2 %' ei vaikuta tuotantotuloallokaatioon eri markkinapaikkojen välillä. Voimalaitoksen tuotantotulo-osuus FCR-N-reservimarkkinalta pienenee 2023 toisinto sähkömarkkinaskenaarion 4,5 prosentista 4,1 prosenttiin 'Tuuli 36' -skenaarioon mentäessä. Koska sähkön vuorokausimarkkinahintojen vaihtelu voimistuu sähköjärjestelmäskenaarioissa vaihtelevan tuotannon lisääntyessä, kasvaa myös vuorokausimarkkinoiden tuotantotulopotentiaali hieman FCR-N-reservimarkkinaan verrattuna. Kun turbiinivirtaama vähenee noin 2 %, vähenee vesivoiman tuotantotulo noin 1,0 %–1,6 % skenaariosta riippuen.

**Taulukko 12.** Pienen (10MW) voimalaitoksen tuotantotulojakauma ja tuotantotulo.

	Tuotantotulojakauma (%)		Keskimääräinen tuotantotulo (M€/a)	Tuotantotulon muutos (%)
	Vuorokausimarkkina	Reservit		
<b>2023 Toisinto</b>				
Nykysäätökyky	95,5	4,5	2,263	---
Keskivirtaama -2 %	95,6	4,4	2,233	- 1,33
<b>Tuuli 12</b>				
Nykysäätökyky	95,6	4,6	2,254	---
Keskivirtaama -2 %	95,6	4,4	2,232	- 0,98
<b>Tuuli 24</b>				
Nykysäätökyky	95,7	4,3	2,911	---
Keskivirtaama -2 %	95,7	4,3	2,883	- 0,96
<b>Tuuli 36</b>				
Nykysäätökyky	95,9	4,1	3,543	---
Keskivirtaama -2 %	95,9	4,1	3,487	- 1,58

Vesivoimatuotantopäivinä tuntitason energiatuotanto optimoidaan välillä 3 MWh–10 MWh. Kuvio 22 esittelee tuotantojakauman vuorokausi- ja FCR-N-reservimarkkinoiden aktivoitulle energialle. Laatikon sisälle asettuu 50 % tuotannosta ja vaakaviiva esittää tuotannon mediaanitasoa. Viikset esittävät väliä, jolle asettuu 95 % tuntituotannosta ja FCR-N energiasta. Kuvioista nähdään, että keskivirtaaman vähentyminen ei juuri vaikuta energijakaumaan vesivoimatuotantopäivinä.

**Kuvio 22.** Pienen (10 MW) voimalaitoksen energijakauma vuorokausi- ja FCR-N-markkinoilla vesivoimatuotantopäivinä.



Mallinnettu vesivoimalaitos voi käyttää nollavirtaamapäiviä, kun vesivoimatuotantoon käytettävissä oleva vesimäärä ei riitä ajamaan voimalaitosturbiinia tavoitellulla 30 % – 100 % käyttöalueella nimellisvirtaamaan nähden. Taulukossa 13 havaitaan, että vesivoimalaitoksen turbiinien läpi kulkevan keskivirtaaman vähentyminen nostaa nollavirtaamapäivien esiintymistiheyttä noin 1,1 % – 1,5 %. Voidaan nähdä, että tämä nollavirtaamapäivien lisääntyminen on luvan mukaista toimintaa, jos minimivirtaamamääräystä ei luvassa ole määritetty. Useassa voimalaitoksessa minimivirtaamamääräystä ei ole (AFRY, 2020). Nollavirtaamapäivät turbiinin läpi siis lisääntyvät, koska käytettävissä oleva vesimäärä turbiinituotantoon allokoitavaksi vähenee. Koska nollavirtaamapäivinä vesivoimatuottaja ei voi tarjota FCR-N reservikapasiteettia, vähenee tarjottu FCR-N reservikapasiteetti 1,3 % – 1,9 %. Voidaan siis tulkita, että pääosa reservitarjonnan vähentymisestä liittyy nollavirtaamapäivien lisääntymiseen. Toisaalta, koska 2 % keskivirtaamasta ohjataan nousuväylään turbiinien ohi, loppuvat koko jokiuoman nollavirtaamapäivät jatkuvan ohitusomavirtaaman vuoksi.

**Taulukko 13.** Pienen (10MW) voimalaitoksen nollavirtaamapäivien osuus ja keskimääräinen FCR-N kapasiteetti.

	Nollavirtaama- päivien osuus (%)	Nollavirtaama- päivien osuuden muutos (%-yks.)	Keskimääräinen FCR-N kapasiteetti (MW/h)	FCR-N kapasiteetin muutos (%)
<b>2023 Toisinto</b>				
Nykysäätökyky	17,2	---	0.320	---
Keskivirtaama -2 %	18.5	+ 1.3	0.315	- 1.6
<b>Tuuli 12</b>				
Nykysäätökyky	17.7	---	0.315	---
Keskivirtaama -2 %	18.8	+ 1.1	0.309	- 1.9
<b>Tuuli 24</b>				
Nykysäätökyky	18.0	---	0.311	---
Keskivirtaama -2 %	19.1	+ 1.1	0.307	- 1.3
<b>Tuuli 36</b>				
Nykysäätökyky	18.1	---	0.305	---
Keskivirtaama -2 %	19.5	+ 1.5	0.301	- 1.3

## 6.2 Suuri voimalaitos: Vuorokausi-, aFRR- ja mFRR-markkinapaikat

Mallinnetun 50 MW voimalaitoksen tuotantotulot eri skenaarioissa esitetään Taulukossa 14. Voimalaitoksen tuotantotulojakauma siirtyy kohti aFRR- ja mFRR-reservi-markkinapaikkoja siirryttäessä '2023 Toisinto' skenaariosta 'Tuuli 36' skenaarioon. Tulevaisuuden skenaarioissa oletetusta reservihankintatarpeen kasvusta johtuva reservituotteiden aktivointimäärien lisääntyminen sekä korkeampi korvaus reservituotteiden tarjoamisesta johtaa reservimarkkinoiden painoarvon kasvun vesivoimatuottajan tuotantotulokertymässä.

Vesienhoitotoimenpideskenaariossa 'Keskivirtaama -2 %' vesivoimatuottajan käytettävissä oleva energiatuotantomäärä vähenee, mutta tuottaja voi allokoida jäljellä olevan energiamäärän haluamallaan tavalla. Tällöin verrattuna 'Nykysäätökyky' - skenaarioon, vesivoimatuottajan tuotantotulot vähenevät 0,2 % – 1,6 % yli sähköjärjestelmäskenaarioiden. 'Minimivirtaama +10 %' - skenaariossa, jossa vesivoimatuottajan käytettävissä oleva tuotantoväli kapenee 10 % ja tuottajan on lisättävä tasainen vähimmäistuotanto tasolta 2,5 MWh tasolle 7,25 MWh, vesivoimatuottajan tuotantotulo alenee puolestaan 2,8 % – 4,8 %. 'Keski- ja minimivirtaama' - skenaariossa, jossa vesienhoitorajoitteet ovat molemmat käytössä, tuotantolaitoksen tuotantotulot vähenevät 4,3 % – 6,0 %.

**Taulukko 14.** Suuren (50MW) voimalaitoksen tuotantotulojakauma ja tuotantotulo.

	Tuotantotulojakauma (%)		Keskimääräinen tuotantotulo (M€/a)	Tuotantotulon muutos (%)
	Vuorokausi-markkina	Reservit		
<b>2023 Toisinto</b>				
Nykysäätökyky	95,7	4,3	14,495	---
Keskivirtaama -2 %	95,6	4,4	14,293	- 1,39
Minimivirtaama +10 %	95,8	4,2	14,089	- 2,80
Keski- ja minimivirtaama	95,8	4,2	13,877	- 4,26
<b>Tuuli 12</b>				
Nykysäätökyky	92,2	7,8	14,993	---
Keskivirtaama -2 %	92,1	7,9	14,897	- 0,64
Minimivirtaama +10 %	92,2	7,8	14,613	- 2,53
Keski- ja minimivirtaama	92,2	7,8	14,450	- 3,74
<b>Tuuli 24</b>				
Nykysäätökyky	90,3	9,7	20,294	---
Keskivirtaama -2 %	90,2	9,8	19,970	- 1,60
Minimivirtaama +10 %	90,6	9,4	19,350	- 4,65
Keski- ja minimivirtaama	90,3	9,7	19,172	- 5,53
<b>Tuuli 36</b>				
Nykysäätökyky	88,9	11,1	25,379	---
Keskivirtaama -2 %	88,9	11,1	25,323	- 0,22
Minimivirtaama +10 %	89,1	10,9	24,169	- 4,77
Keski- ja minimivirtaama	89,0	11,0	23,959	- 5,98

Taulukossa 15 esitetään vesienhoitotoimien vaikutus voimalaitoksen reservituotetarjontaan eri sähköjärjestelmäskenaarioissa. Keskimääräisen tuotannon vähentyminen skenaariossa 'Keskipvirtaama -2 %' ei vaikuta merkittävästi vesivoimatuottajan tarjontaan aFRR- ja mFRR-reservituotteissa. Minimivirtaaman nostaminen sen sijaan vähentää sekä aFRR-kapasiteetin että mFRR-säätöenergian tarjontaa. Reservitarjonta vähentyy edelleen 'Keski- ja minimivirtaama' -skenaariossa, kun minimivirtaaman noston lisäksi tapahtuu keskipvirtaaman vähentyminen .

**Taulukko 15.** Suuren (50MW) voimalaitoksen aFRR kapasiteetti (MW) ja mFRR energia (MWh) mallineituissa skenaarioissa.

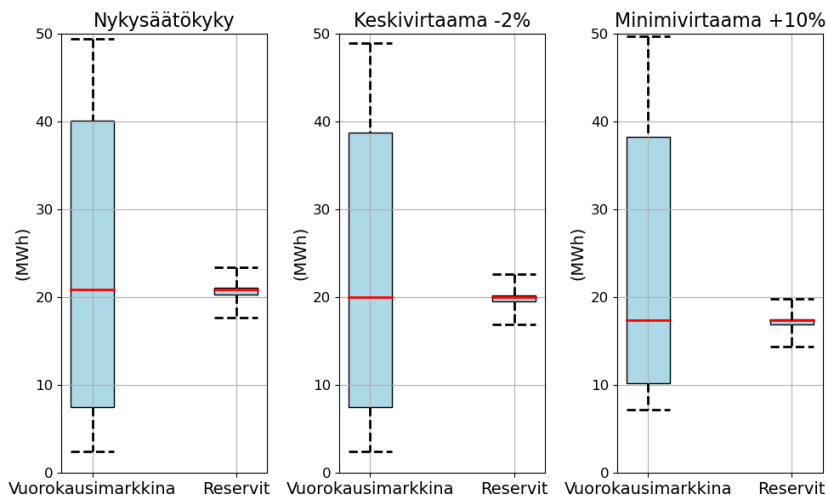
	Keskimääräinen aFRR kapasiteetti* (-) alas / ylös (MW/h)	Keskimääräinen mFRR energia* (-) alas / ylös (MWh/h)	Keskimääräisen aFRR kapasiteetin muutos* alas / ylös (%)	Keskimääräisen mFRR energian muutos* alas / ylös (%)
<b>2023 Toisinto</b>				
Nykysäätökyky	0,666 / 0,654	0,971 / 1,047	---	---
Keskipvirtaama -2 %	0,668 / 0,654	0,982 / 1,053	+0,3 / 0,0	+1,1 / +0,6
Minimivirtaama +10 %	0,638 / 0,629	0,916 / 1,000	-4,2 / -3,8	-5,7 / -4,5
Keski- ja minimivirtaama	0,635 / 0,625	0,909 / 0,982	-4,7 / -4,4	-6,4 / -6,2
<b>Tuuli 12</b>				
Nykysäätökyky	0,925 / 0,911	1,380 / 1,482	---	---
Keskipvirtaama -2 %	0,920 / 0,906	1,387 / 1,496	-0,5 / -0,6	+0,5 / +0,9
Minimivirtaama +10 %	0,901 / 0,885	1,296 / 1,429	-2,6 / -2,9	-6,1 / -3,6
Keski- ja minimivirtaama	0,901 / 0,892	1,266 / 1,426	-2,6 / -2,1	-8,3 / -3,8
<b>Tuuli 24</b>				
Nykysäätökyky	1,195 / 1,172	1,768 / 1,927	---	---
Keskipvirtaama -2 %	1,166 / 1,145	1,763 / 1,928	-2,4 / -2,3	-0,3 / +0,1
Minimivirtaama +10 %	1,116 / 1,103	1,603 / 1,812	-6,6 / -5,9	-9,3 / -6,0
Keski- ja minimivirtaama	1,143 / 1,127	1,574 / 1,830	-4,4 / -3,8	-11,1 / -5,0

	Keskimääräinen aFRR kapasiteetti* (-) alas / ylös (MW/h)	Keskimääräinen mFRR energia* (-) alas / ylös (MWh/h)	Keskimääräisen aFRR kapasiteetin muutos* alas / ylös (%)	Keskimääräisen mFRR energian muutos* alas / ylös (%)
<b>Tuuli 36</b>				
Nykysäätökyky	1,353 / 1,337	2,097 / 2,332	---	---
Keskivirtaama -2 %	1,371 / 1,353	2,091 / 2,334	+1,3 / +1,2	-0,3 / +0,1
Minimivirtaama +10 %	1,326 / 1,309	1,926 / 2,159	-2,0 / -2,1	-8,2 / -7,4
Keski- ja minimivirtaama	1,304 / 1,291	1,868 / 2,176	-3,6 / -3,4	-10,9 / -6,7

\*Tunnilla, kun aFRR kapasiteettia tilattu. \*\*Tunneilla, kun mFRR energiaa tilattu.

Kuvio 23 esittää vesivoimatuotannon tuntijakauman sähkön vuorokausimarkkinoilla sekä aFRR- ja mFRR-reservituotteiden nettoenergiajakauman. 'Keskivirtaama -2 %' -skenaario vähentää hieman turbiinituotantoon käytettävissä olevaa vesimäärää. Vaikutus vuorokausimarkkinoiden energiatuotantojakaumaan on pieni, ja näin ollen säädön tarjontaan reservimarkkinoille ympäristötoimella ei ole juuri vaikutusta. 'Minimivirtaama +10 %' -skenaariossa minimituotannon raja nousee. 'Nykysäätökyky' -skenaarioon verrattuna tuotantoalue 2,5 MWh – 7,25 MWh on muuttunut tasaisen tuotannon *base load*-alueeksi. Vesivoimatuottajan käytettävissä olevan säätökykyisen energian määrä vähenee ja tuotantoalue on rajoitetumpi.

**Kuvio 23.** Suuren (50 MW) voimalaitoksen tuotantojakauma vuorokausi- ja reservimarkkinoilla. Sähkömarkkinaskenaario '2023 Toisinto'. Aktivoitujen aFRR- ja mFRR reservituotteiden nettoenergian mediaani on nolla. Mediaani esitetään vuorokausimarkkinoiden mediaanin kohdalla vertailun selkeyttämiseksi.



## 7 Vesienhoidon toimenpiteen 'Keski- virtaama -2 %' tarkastelu suurissa voimatalousvesistöissä

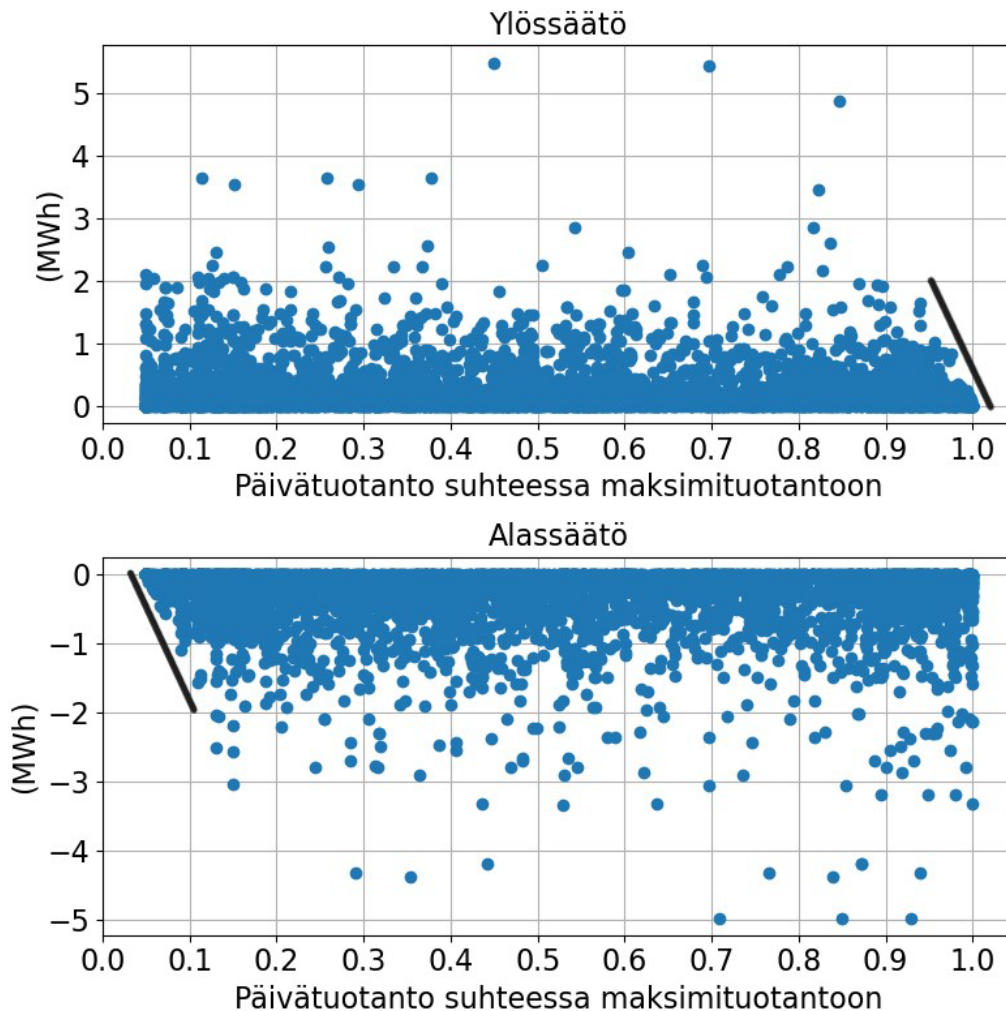
Vesienhoidon toimenpiteiden vaikutuksen tarkastelu tehdään keskittyen vesivoimatuotantoon rakennetuille vesistöille Kemi-, Ii- ja Oulujoella. Vesistöissä on useampi yhden yhtiön omistama vesivoimalaitos peräkkäin, ja näin ollen voimalaitoksia voidaan käyttää reservimarkkinoiden säätökapasiteetti- ja energioresursseina yhdessä. Kyseisten vesistöjen voimalaitosten voidaan olettaa tarjoavan osan Suomen vesivoimaloiden reservimarkkinoille tarjoamasta lyhytaikaissäädöstä. Toimenpiteiden tarkastelu tehdään yleisellä tasolla saatavilla olevan voimalaitosdatan ja päiväkohtaisen virtaama-aineiston perusteella. Hanketoimijoilla ei ole käytettävissä aineistoa eri vesistöalueiden voimalaitosten osallistumisesta reservimarkkinoiden tarjontaan. Huomautamme, että käytettyä tarkastelukehikkoa voi tarvittaessa soveltaa myös muilla vesistöalueilla, kuten Vuoksen, Kymijoen tai Kokemäenjoen voimalaitoksilla.

Alaluvussa 7.1. esittelemme tarkastelutavan, jossa päivävirtaaman määrän avulla hahmotellaan vesivoiman säätörajoituksia, perusteet. Alaluvuissa 7.2–7.4 tehdään päivätason virtaamatarkastelut Kemi-, Ii-, ja Oulujoen vesistöalueiden voimalaitoksille.

### 7.1 Päivätason virtaama-alue ja säätökyky

Edustavan voimalaitoksen simulointitulokset (Kuvio 24) havainnollistavat, kuinka päivän keskimääräinen tuotanto suhteessa päivän maksimituotantoon ja säätötarjonta sijoittuvat toisiinsa. Mustalla viivalla havainnollistetaan ylössäädön rajoitusta korkeilla tuotantomäärillä ja vastaavasti alassäädön rajoitusta alhaisilla virtaamamäärillä. Vesivoimalaitoksen kyky tarjota lyhytaikaissäätöä on rajoitettu tilanteissa, joissa virtaama on lähellä minimi- tai maksimitasoa.

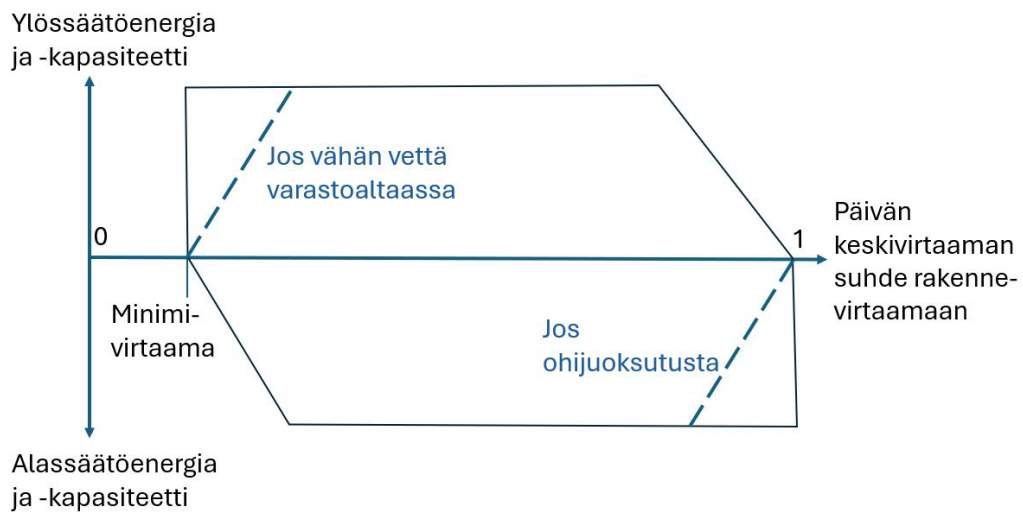
**Kuvio 24.** Havainnekuva edustavan suuren 50 (MW) voimalaitoksen päivätuotannon ja yö- ja alassäätötarjonnan suhteesta. (Skenaario 2023 Toisinto, Nykysäätökyky).



Kuviossa 25 havainnollistetaan virtaama-alueen ja säätökyvyn yhteyttä tarkemmin. Kuvion 25 vaaka-akselilla esitetään vesivoimalaitoksen päivän keskivirtaama suhteessa laitoksen rakennevirtaaman, eli maksimivirtaamatasoon. Jos virtaama on jo lähellä alarajaa, on alassäätökapasiteetin ja -energian tarjonta rajoitettua. Koska turbiinivirtaama tapahtuu jo minimirajan läheisyydessä, ei tuotantoa voida enää juurikaan vähentää alassäädön tarpeisiin. Samoin vesivoimatuottaja voi rajoittaa ylössäätötarjontaa, jos alhainen virtaama johtuu vähäisestä määrästä vettä varastoaltaassa (katkoviivalla). Tällöin ylössäätäminen, eli tuotannon lisääminen voi johtaa liialliseen vedenpinnan laskuun. Samoin kun virtaama on lähellä ylärajaa, on ylössäätökapasiteetin ja -energian tarjonta rajoitettua. Koska virtaama turbiinien läpi on jo lähellä maksimitasoa, ei tuotannon lisääminen ylössäätötarpeen tapauksessa ole enää mahdollista. Vesivoimatuottaja voi myös rajoittaa alassäätötarjontaa tapauksessa, jossa yläallas on täynnä tai lähellä

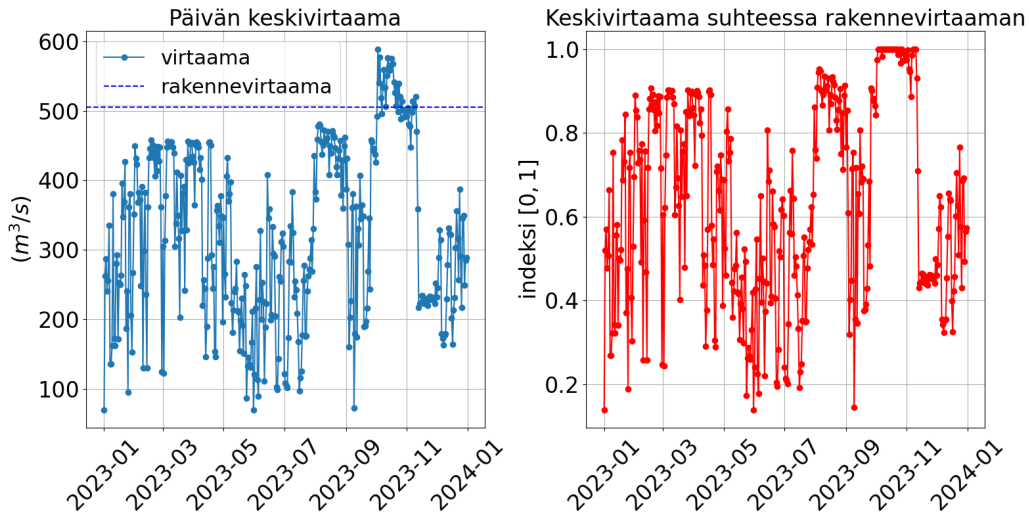
täyttyä (katkoviiva). Tällöin säästetyn veden arvo tuottajalle, eli niin sanottu veden varjo hinta, on alhainen, ja alassäästöenergian tarjoamisen taloudellinen kannattavuus vähäinen.

**Kuvio 25.** Havainnollistava kuvio vesivoimalaitoksen säätötarjontarajoitteista päivän keskivirtaaman suhteessa rakennevirtaamaan muuttuessa.



Päivävirtaamatarkastelussa tarkastelemme vesivoimalaitosten päivävirtaamien suhdetta laitosten nimellis-, eli maksimivirtaamaan. Tarkastelu perustuu normeeratun virtaaman jakaumiin. Kuvio 26 havainnollistaa normeeratun virtaaman tarkastelua Montan voimalaitokselta Oulujoelta. Vuoden 2023 päivän keskivirtaama (kuvio vasemmalla) on normeerattu nimellisvirtaamalla (kuvio oikealla). Tilanteet, joissa tapahtuu ohjuoksutusta (keskivirtaama > nimellisvirtaama), turbiinivirtaama vastaa nimellisvirtaamaa ja indeksi on 1.

**Kuvio 26.** Päiväkohtainen keskivirtaama Monta vesivoimalaitoksella Oulujoella vuonna 2023 (vasen kuvio). Keskivirtaama normeerattu rakennevirtaamalla (oikea kuvio).



Vesienhoitotoimenpide, jossa osa vedestä ohjataan ohi turbiinien, siirtää vesivoimaturbiinien päivävirtaamajakaumaa kohti minimivirtaamatasoa. Tältä osin vesienhoitotoimi voi rajoittaa voimalaitoksen kykyä tarjota kapasiteettia ja energiaa eri reservituotteisiin. Seuraavissa alakappaleissa teemme mekaanisen tarkastelun 'Keskivirtaama – 2 %'-toimenpiteen vaikutuksesta voimalaitosten normeeratun virtaamaan jakaumaan. Tarkastelussa ei huomioida vesivoimatuotantoprofiilin mahdollista sopeutumista turbiinivirtaaman vähenemiseen, vaan 2 % turbiinivirtaamasta vähennetään suoraviivaisesti päivävirtaamista.

Normeeratut virtaamajakaumat jaetaan kymmeneen yhtä suureen osaan eli desiiliin. Tarkastelemme, missä määrin virtaama-alueen, jossa normeerattu turbiinivirtaama sijoittuu alimmille desiilille, esiintyvyys lisääntyy 'Keskivirtaama – 2 %'-toimenpiteen seurauksena. Perustamme arvion laitoksen säätökykyalueista Taulukossa 3 esitettyyn vesivoimatuotannon suhteellisen muutoksen jakaumaan säätöön kykenevään kapasiteettiin nähden. Säätökykyisen kapasiteetin vaihtelu suhteessa nimelliskapasiteettiin on ollut 95 % ajasta (2.5 ja 97.5 persentiilien välillä) noin  $\pm 2.5$  % 3 minuutin aikavälein,  $\pm 4.0$  % 6 minuutin aikavälein ja  $\pm 7.5$  % 15 minuutin aikavälein. Arvioimme karkealla tasolla, että kun normeerattu turbiinivirtaama on alhaisimmalla desiilillä, laitoksen säätökyky voi rajoittua jossain määrin. Seuraavalla ylemmällä desiilillä voimalaitoksen säätökyky voi rajoittua suuren säätötarpeen tapauksessa. Esittelemme kyseisten virtausalueiden esiintymisen todennäköisyyden toteutuneen virtaamadatan tapauksessa ja tapauksessa, jossa turbiinivirtaamasta vähennetään 2 %. On huomattavaa, että esitetty arviointikehikko ei ole tarkka numeerinen mallinnus. Arvio on suuntaa antava, ja tarkemmat analyysit vaativat vesistökohtaisia malleja.

Lopuksi, myös vesivoimalaitosten minimivirtaamataso korottamisen myötä vesivoiman säätötarjontamahdollisuus rajoittuu. Edustavalle vesivoimalaitokselle mallinnetun 'Minimivirtaama +10 %' -skenaarion myötä päivävirtaamat tulisivat sijoittumaan useammin lähellä korotettua minimivirtaamatasoa. Tätä myöten voimalaitosten säätökyky rajoittuisi nykysäätökyky-skenaarioon verrattuna. Minimivirtaama aiheuttaisi kuitenkin selkeää virtaaman uudelleenoptimointia vesivoimalaitosten taholta. Minimivirtaaman noston mallintaminen vaatisi siten tarkempaa vesistökohtaista mallinnusta. Myös kysymys siitä, missä määrin tehokkaat vesienhoitotoimet vaativat minimivirtaaman nostoa ja mihin aikaan vuodesta se olisi tarpeen, on vahvasti kohdekohtainen (katso kappale 3). Tämän hankkeen puitteissa minimivirtaaman noston skenaariota ei analysoida vesistökohtaisesti.

## 7.2 Kemijoen voimalaitokset

Tarkastelemme Kemijoella neljää Kemijoki Oy:n omistamaa voimalaitosta (Taulukko 16). Perämereltä ensimmäinen voimalaitos on Isohaara, joka on PVO-Vesivoima Oy:n omistuksessa. Kemijoki Oy suunnittelee kalateitä Ounasjoelle asti, jolloin ohitusratkaisu koskisi Taivalkosken, Ossauskosken, Petäjäsken ja Valajäskosken voimalaitoksia. Isohaaran voimalaitoksella on valmiiksi kalatiet. Taulukossa 16 esitetään voimalaitosten perustiedot. Keskivirtaama turbiineista, eli kokonaisvirtaama vähennettynä ohijuoksutuksella, vuosina 2020–2023 on asettunut välille 536 – 577 ( $m^3/s$ ). Tällöin turbiinivirtaaman keskiarvosta 2 prosenttia on noin 11 ( $m^3/s$ ).

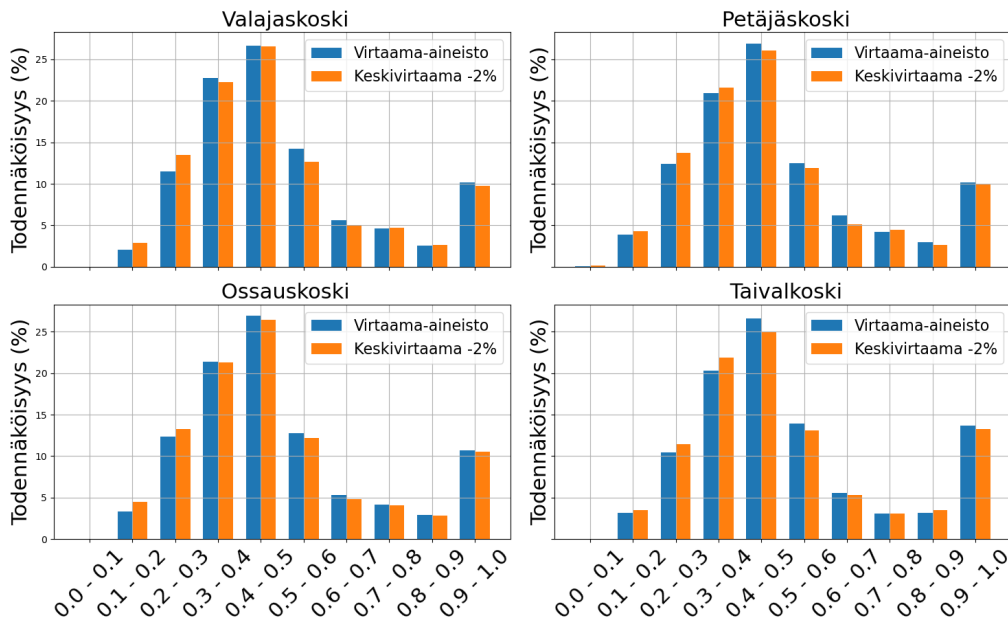
**Taulukko 16.** Kemijoen alaosan voimalaitosten perustiedot (pois lukien Isohaaran voimalaitos). Laitokset järjestyksessä yläjuoksu vasemmalla ja alin laitos oikealla. Aineisto: Vesi.fi, Valunta ja virtaamat (2024).

	Valajäskoski	Petäjäsken	Ossauskoski	Taivalkoski
Nimellisteho (MW)	101	182	124	134
Rakennevirtaama ( $m^3/s$ )	1050	1050	1080	1110
Keskivirtaama* ( $m^3/s$ )	596	600	619	647
Turbiinien keskivirtaama* ( $m^3/s$ )	536	539	553	577
2 % turbiinivirtaamasta ( $m^3/s$ )	11	11	11	12

\*Vuosina 2020–2023.

Kuviossa 27 esitetään voimalaitosten normeeratun virtaaman, keskimääräisen päivävirtaama suhteessa rakennevirtaamaan, jakautuminen desiileittäin vuosina 2020–2023 (palkit vasemmalla). Voimalaitosten virtaamajakaumat ovat keskenään hyvin yhtenevät. Suurin osa päivävirtaamasta asettuu välille [0.3, 0.4] rakennevirtaamasta. Minimivirtaamapäivät asettuvat välille [0.1, 0.2] suhteessa rakennevirtaamaan. Kun päivävirtaamasta vähennetään mekaanisesti 11 ( $m^3/s$ ) virtaama, alhaisimpien desiilien [0.1, 0.2] ja [0.2, 0.3] päivävirtaamatapaukset lisääntyvät (oikea palkki).

**Kuvio 27.** Kemijoen alaosan voimalaitosten päivän keskivirtaaman suhde rakennevirtaamaan (vaaka-akselilla). Jakauma esitetty desiileittäin. Vuosien 2020–2023 virtaama-aineisto sinisellä (vasen palkki) ja tapaus, jossa päivän keskivirtaamasta on vähennetty 11 ( $m^3/s$ ) oranssilla (oikea palkki).



Kuviosta 27 nähdään, että erot normeeratuissa päivävirtaamissa ennen ja jälkeen keskivirtaaman 2 % vähennyksen ovat lieviä. Tarkempi analyysi esitetään Taulukossa 17, jossa esitetään alimpien virtaamatapausten esiintymisprosentit alkuperäisellä aineistolla sekä päivän keskivirtaaman vähentyessä 2 %. Alimman [0.1, 0.2] desiilin virtaama-alueella, jossa säätökyvyn voidaan nähdä rajoittuvan *jossain määrin*, tapaukset lisääntyvät 0,3 %–1,2 % voimalaitoksesta riippuen. Toiseksi alimmalla desiilillä [0.2, 0.3], jossa säätökyky voi rajoittua *suuren säätötarpeen tapauksessa*, normeeratun turbiinivirtaaman tapaukset lisääntyvät 0,9 % – 2,0 %.

**Taulukko 17.** Kemijoen alaosan voimalaitosten päivän keskivirtaaman suhde rakennevirtaamaan. Taulukon arvot esiintymisprosentteina (%) vuosien 2020–2023 virtaama-aineistosta ja tapauksessa, kun päivän keskivirtaamasta on vähennetty 11 ( $m^3/s$ ).

Päivän keskivirtaaman suhde rakennevirtaamaan				
	[0.0, 0.1)	[0.1, 0.2)	[0.2, 0.3)	[0.3, 1.0]
<b>Valajaskoski</b>				
Virtaama-aineisto	0.0	2.1	11.5	86.5
Keskivirtaama -2 %	0.0	2.9	13.5	83.7
<b>Muutos</b>	<b>0.0</b>	<b>+0.8</b>	<b>+2.0</b>	<b>-2.8</b>
<b>Petjäskoski</b>				
Virtaama-aineisto	0.1	3.9	12.4	83.6
Keskivirtaama -2 %	0.1	4.3	13.8	81.8
<b>Muutos</b>	<b>0.0</b>	<b>+0.4</b>	<b>+1.4</b>	<b>-1.8</b>
<b>Ossauskoski</b>				
Virtaama-aineisto	0.1	3.4	12.4	84.2
Keskivirtaama -2 %	0.1	4.5	13.3	82.1
<b>Muutos</b>	<b>0.0</b>	<b>+1.2</b>	<b>+0.9</b>	<b>-2.1</b>
<b>Taivalkoski</b>				
Virtaama-aineisto	0.0	3.2	10.5	86.3
Keskivirtaama -2 %	0.0	3.5	11.4	85.1
<b>Muutos</b>	<b>0.0</b>	<b>+0.3</b>	<b>+0.9</b>	<b>-1.2</b>

## 7.3 Iijoen voimalaitokset

Iijoen osalta tarkastelemme viittä Pohjolan Voima Oy:n omistamaa voimalaitosta (Taulukko 18). Perämereltä ensimmäinen voimalaitos on Raasakka, johon on selvitteillä teknisen tai luonnonmukaisen kalatien rakentaminen (Pohjolan Voima, 2024) Ylimässä Haapakosken voimalaitoksessa kehitetään vaelluskelojen alasvaellusreittiä (Louhi ym., 2024). Taulukossa 18 esitetään voimalaitosten perustiedot. Keskivirtaama turbiineista, eli kokonaisvirtaama vähennettynä ohijuoksutuksella, vuosina 2020–2023 on asetunut välille 146–189 ( $m^3/s$ ). Tällöin 2 prosenttia turbiinivirtaaman keskiarvosta on noin 3 ( $m^3/s$ ).

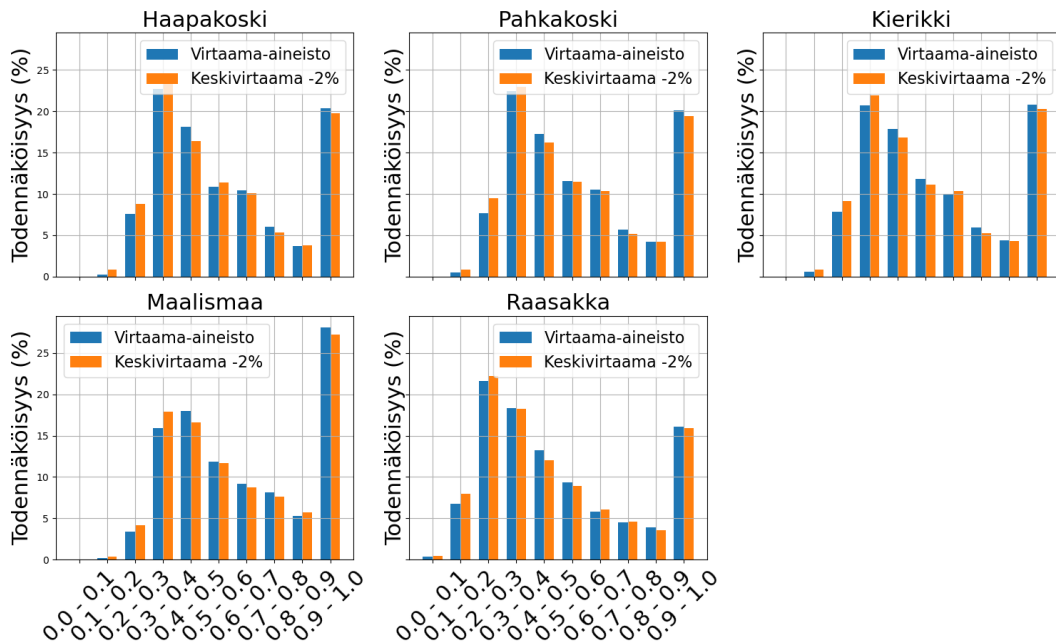
**Taulukko 18.** Iijoen voimalaitosten perustiedot. Laitokset järjestyksessä yläjuoksu vasemmalla ja alin laitos oikealla. Aineisto: Vesi.fi, Valunta ja virtaamat (2024).

	Haapakoski	Pahkakoski	Kierikki	Maalismaa	Raasakka
Nimellisteho (MW)	32.6	42.4	37.5	38.6	64.3
Rakennevirtaama ( $m^3/s$ )	250	250	250	250	375
Keskivirtaama* ( $m^3/s$ )	167	169	170	211	211
Turbiinien keskivirtaama* ( $m^3/s$ )	146	147	148	164	189
2 % turbiinivirtaamasta ( $m^3/s$ )	3	3	3	3	4

\*Vuosina 2020–2023.

Kuviossa 28 esitetään Iijoen voimalaitosten normeeratun päivävirtaaman jakautuminen desiileihin vuosina 2020–2023 (vasen palkki). Suurin osa päivävirtaamasta asettuu väleille [0.3, 0.4] ja [0.9, 1.0] rakennevirtaamasta. Raasakan voimalaitoksella, jossa rakennevirtaama on suurempi, suurin osa normeeratuista päivävirtaamista esiintyy alueella [0.2, 0.3). Kun päivävirtaamasta vähennetään 3 ( $m^3/s$ ), lisääntyvät alhaisimpien desiilien normeeratun turbiinivirtaaman tapaukset hieman (oikea palkki).

**Kuvio 28.** Lijoen voimalaitosten päivän keskivirtaaman suhde rakennevirtaamaan (vaaka-akselilla). Vuosien 2020–2023 virtaama-aineisto sinisellä ja tapaus, jossa päivän keskivirtaamasta on vähennetty 3 ( $m^3/s$ ) oranssilla.



Taulukossa 19 esitetään alimpien virtaamatapausten esiintymisprosentit alkuperäisellä aineistolla sekä keskivirtaaman turbiineista vähentyessä 2 %. Alimmalla normeeratulla [0.1, 0.2) virtaama-alueella, jossa säätökyky on *jossain määrin* rajoitettua, tapaukset lisääntyvät keskimäärin 0,2 % – 1,2 % voimalaitoksen mukaan. Virtaamavälillä [0.2, 0.3), jossa säätökyky voi rajoittua *suuren säätötarpeen tapauksessa*, tapaukset lisääntyvät 0,6 % – 1,8 %.

**Taulukko 19.** Iijoen voimalaitosten päivän keskivirtaaman suhde rakennevirtaamaan. Taulukon arvot esiintymisprosentteina (%) vuosien 2020–2023 virtaama-aineistosta ja tapauksessa, kun päivän keskivirtaamasta on vähennetty 3 ( $m^3/s$ ).

Päivän keskivirtaaman suhde rakennevirtaamaan				
	[0.0, 0.1)	[0.1, 0.2)	[0.2, 0.3)	[0.3, 1.0]
<b>Haapakoski</b>				
Virtaama-aineisto	0.0	0.3	7.6	92.1
Keskivirtaama -2 %	0.0	0.9	8.8	90.3
<b>Muutos</b>	<b>0.0</b>	<b>+0.6</b>	<b>+1.2</b>	<b>-1.8</b>
<b>Pahkakoski</b>				
Virtaama-aineisto	0.0	0.6	7.7	91.9
Keskivirtaama -2 %	0.0	0.8	9.5	89.8
<b>Muutos</b>	<b>0.0</b>	<b>+0.2</b>	<b>+1.8</b>	<b>-2.1</b>
<b>Kierikki</b>				
Virtaama-aineisto	0.0	0.6	7.9	91.5
Keskivirtaama -2 %	0.0	0.8	9.1	90.1
<b>Muutos</b>	<b>0.0</b>	<b>+0.2</b>	<b>+1.2</b>	<b>-1.4</b>
<b>Maalismaa</b>				
Virtaama-aineisto	0.0	0.2	3.4	96.4
Keskivirtaama -2 %	0.0	0.3	4.2	95.5
<b>Muutos</b>	<b>0.0</b>	<b>+0.1</b>	<b>+0.8</b>	<b>-0.8</b>
<b>Raasakka</b>				
Virtaama-aineisto	0.0	6.8	21.6	71.3
Keskivirtaama -2 %	0.0	8.0	22.2	69.4
<b>Muutos</b>	<b>0.0</b>	<b>+1.2</b>	<b>+0.6</b>	<b>-1.9</b>

## 7.4 Oulujoen voimalaitokset

Tarkastelemme Oulujoen pääuoman viittä Fortum Oy:n omistamaa voimalaitosta (Taulukko 20). Mereltä ensimmäinen voimalaitos on Oulun Energian omistama Merikoski. Taulukossa 20 esitetään voimalaitosten perustiedot. Keskivirtaama turbiineista, eli kokonaisvirtaama vähennettynä ohijuoksutuksella, vuosina 2020–2023 on asettunut välille 276 – 299 ( $m^3/s$ ). Tällöin 2 prosenttia turbiinivirtaaman keskiarvosta on noin 6 ( $m^3/s$ ).

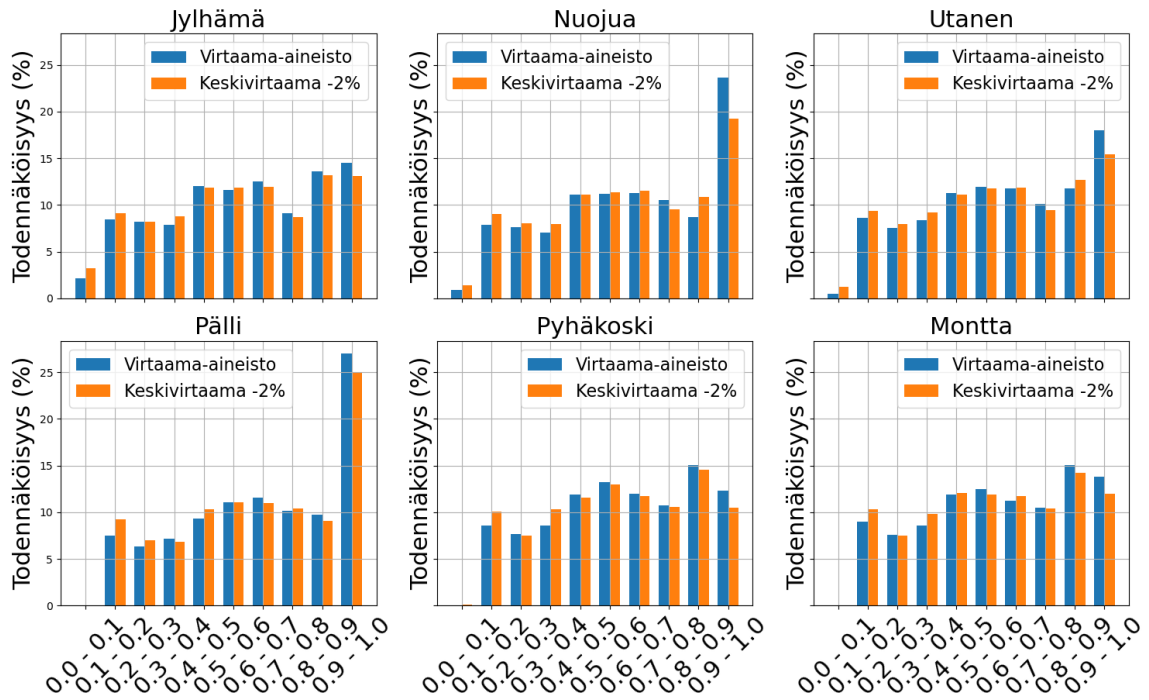
**Taulukko 20.** Oulujoen voimalaitosten perustiedot. Laitokset järjestyksessä yläjuoksu vasemmalla ja alin laitos oikealla. Aineisto: Vesi.fi, Valunta ja virtaamat (2024).

	Jylhämä	Nuojua	Utanen	Pälli	Pyhäkoski	Montta
Nimellisteho (MW)	55	85.2	64.8	51	147	49.5
Rakennevirtaama ( $m^3/s$ )	478	467	490	540	510	450
Keskivirtaama* ( $m^3/s$ )	277	291	296	297	301	300
Turbiinien keskivirtaama* ( $m^3/s$ )	276	287	293	291	299	299
2 % turbiinivirtaamasta ( $m^3/s$ )	6	6	6	6	6	6

\*Vuosina 2020–2023.

Kuviossa 29 esitetään Oulujoen pääuoman voimalaitosten normeeratun päivävirtaaman jakautuminen desiileittäin vuosina 2020–2023. Suurin osa päivävirtaamasta asetuu välille [0.8, 1.0] rakennevirtaamasta. Montan voimalaitoksen minimivirtaamataso on 50 ( $m^3/s$ ). Minimivirtaama näkyy ja Montan ja Montan yläpuolisten voimalaitosten, Pyhäkosken ja Pällin, virtaamissa. Kyseiset voimalaitokset eivät aja alimmalla desiilillä [0, 0.1). Kun päivävirtaamasta vähennetään 6 ( $m^3/s$ ), lisääntyvät alhaisimpien desiilien päivävirtaamatapaukset (oikea palkki).

**Kuvio 29.** Oulujoen pääuoman voimalaitosten päivän keskivirtaaman suhde rakennevirtaamaan (vaaka-akselilla). Vuosien 2020–2023 virtaama-aineisto sinisellä ja tapaus, jossa päivän keskivirtaamasta on vähennetty 6 ( $m^3/s$ ) oranssilla.



Taulukossa 21 esitetään alimpien virtaamatapausten esiintymisprosentit alkuperäisellä aineistolla sekä keskivirtaaman turbiineista vähentyessä 2 %. Keskivirtaaman alentussa lisääntyy alhaisimman desiilin [0, 0.1] päivävirtaamatapaukset, jossa säätökyky rajoittuu jossain määrin, Jylhämän, Nuojuan ja Utasen voimalaitoksilla 0,5 % – 1,1 %. Pällin, Pyhäkosken ja Montta voimalaitosten osalta alhaisimman desiilin [0.1, 0.2] normeeratun virtaama-alueen tapaukset yleistyvät 1,4 % – 1,8 %.

**Taulukko 21.** Oulujoen pääuoman voimalaitosten päivän keskivirtaaman suhde rakennevirtaamaan. Taulukon arvot esiintymisprosentteina (%) vuosien 2020–2023 virtaama-aineistossa ja tapauksessa, kun virtaamasta on vähennetty 6 ( $m^3/s$ ).

<b>Päivän keskivirtaaman suhde rakennevirtaamaan</b>				
	[0.0, 0.1)	[0.1, 0.2)	[0.2, 0.3)	[0.3, 1.0]
<b>Jylhämä</b>				
Virtaama-aineisto	2.1	8.5	8.2	81.2
Keskivirtaama -2 %	3.2	9.1	8.2	79.5
<b>Muutos</b>	<b>+1.1</b>	<b>+0.6</b>	<b>0.0</b>	<b>-1.7</b>
<b>Nuojua</b>				
Virtaama-aineisto	0.9	7.9	7.6	83.5
Keskivirtaama -2 %	1.4	9.0	8.0	81.6
<b>Muutos</b>	<b>+0.5</b>	<b>+1.1</b>	<b>+0.4</b>	<b>-2.0</b>
<b>Utanen</b>				
Virtaama-aineisto	0.5	8.6	7.6	83.4
Keskivirtaama -2 %	1.2	9.4	7.9	81.5
<b>Muutos</b>	<b>+0.7</b>	<b>+0.8</b>	<b>+0.4</b>	<b>-1.9</b>
<b>Pälli</b>				
Virtaama-aineisto	0.0	7.5	6.4	86.2
Keskivirtaama -2 %	0.0	9.2	7.0	83.7
<b>Muutos</b>	<b>0.0</b>	<b>+1.8</b>	<b>+0.6</b>	<b>-2.5</b>
<b>Pyhäkoski</b>				
Virtaama-aineisto	0.1	8.6	7.7	83.7
Keskivirtaama -2 %	0.1	10.1	7.5	82.3
<b>Muutos</b>	<b>0.0</b>	<b>+1.5</b>	<b>-0.2</b>	<b>-1.3</b>
<b>Montta</b>				
Virtaama-aineisto	0.0	9.0	7.6	83.4
<b>Keskivirtaama -2 %</b>	<b>0.0</b>	<b>10.3</b>	<b>7.5</b>	<b>82.1</b>
<b>Muutos</b>	<b>0.0</b>	<b>+1.4</b>	<b>-0.1</b>	<b>-1.3</b>

## 8 Oikeudelliset reunaehdot – vesienhoidon toimenpiteistä säätövoimalle aiheutuva merkittävä haitta<sup>98</sup>

### 8.1 Luvun sisältö

#### 8.1.1 Merkittävän haitan arviointi

Tässä luvussa tarkastellaan oikeudellisia reunaehtoja sille, minkälaista haittaa vesienhoidon toimenpiteistä saa aiheutua vesivoiman säätövoimatuotannolle. Kyse on erityisesti EU:n vesipolitiikan puitedirektiivin (VPD 2000/60/EY) pohjautuvien jokien ekologisen tilan tavoitteiden ja vesivoimaloiden toteuttaman lyhytaikaissäännöstelyn yhteen soveltamisesta Suomen oikeusjärjestelmässä. Suomessa vesien tilatavoitteista säädetään laissa vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä (VMJL 1299/2004) ja vesivoimaluvista ja niiden tarkistamisesta vesilaissa (VL 587/2011).

VPD 4(3) artiklassa ja VMJL 22 §:ssä säädetään pintavesimuodostuman nimeämisestä keinotekoiseksi tai voimakkaasti muutetuksi (KeVoMu). Lainkohtien perusteella vesimuodostuma voidaan nimetä voimakkaasti muutetuksi, jos niistä muodostuman hydrologis-morfologisten ominaisuuksien muutoksista, jotka ovat tarpeen hyvän ekologisen tilan saavuttamiseksi, aiheutuisi merkittäviä haitallisia vaikutuksia ympäristölle tai tiettyihin toimintoihin. Näihin toimintoihin kuuluu muun muassa veden varastointi vesivoiman tuotantoon tai vedensäännöstelyyn. Jokien hydrologis-morfologisilla laatutekijöillä viitataan VPD liitteessä V esimerkiksi joen virtauksen määrään ja dynamiikkaan sekä joen esteettömyyteen ja rakenteeseen.

Vesipuitedirektiivin perusteella voimakkaasti muutetun vesimuodostuman ekologisen tilan tavoitteena on hyvä ekologinen potentiaali (VPD 4(1) art.). Vesien- ja merenhoito-laissa käytetään samassa tarkoituksessa hyvän saavutettavissa olevan ekologisen tilan käsitettä (VMJL 22 §). Hyvää ekologista potentiaalia verrataan parasta mahdollista ekologista potentiaalia kuvaavaan tilaan (VPD liite V). Parhaan ekologisen potentiaalın saavuttamisen edellytyksenä on kaikkien sellaisten hydrologis-morfologisten olosuhteiden muutoksia lieventävien toimenpiteiden toteuttaminen, joiden avulla varmistetaan pääseminen mahdollisimman lähelle parasta toteutettavissa olevaa ekologista jatkumoa.

---

<sup>98</sup> Tämän luvun kirjoittajina ovat Antti Belinskij'n ja Suvi-Tuuli Puharisen ohella toimineet Elina Heikkilä, Anton Ruotsalainen ja Janni Saari-Kontkanen Itä-Suomen yliopistosta.

Tässä tulee erityisesti kiinnittää huomiota elämistön vaellukseen sekä sopiviin kutemis- ja lisääntymisalueisiin (VPD liite V, Vaikuta vesiin 2021).

Vesimuodostuman nimeäminen voimakkaasti muutetuksi ja hyvän ekologisen potentiaalin / saavutettavissa olevan ekologisen tilan määrittäminen ovat mekanismeja, joiden avulla voidaan ottaa huomioon vesimuodostuman ekologisten tavoitteiden lisäksi vesienkäytön yhteiskunnalliset tarpeet. Näihin tarpeisiin kuuluvat sähköenergian ja säättövoiman tuotanto vesivoiman avulla.

Suomen vesienhoitosuunnitelmien perusteella Suomessa on noin 125 voimakkaasti muutettua vesimuodostumaa, joista monien nimeämisen perusteena on vesivoimatuotanto. Voimakkaasti muutetuista vesimuodostumista noin 80 on hyvää saavutettavissa olevaa ekologista tilaa huonommassa tilassa. Siten valtaosassa voimakkaasti muutettuja vesimuodostumia on tarpeen toteuttaa lisätoimenpiteitä ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi. Vesimuodostuman nimeäminen voimakkaasti muutetuksi ei tarkoita sitä, että sen ekologista tilaa ei tulisi tarvittaessa parantaa (KHO 2015:63).

## 8.1.2 Kysymykset ja luvun rakenne

Tämän raportin kannalta olennaisia oikeudellisia kysymyksiä ovat:

- 1) Millä edellytyksillä voimakkaasti muutetuksi nimeäminen tulee kyseeseen suhteessa erilaisiin vesivoimalaitoksiin?
- 2) Millaiset hyvän ekologisen potentiaalin ja vesivoimalaitoksen toiminnan ja erityisesti säättövoiman tuotannon yhteensovittamisen reunaehdot ovat?
- 3) Minkälaiset mahdollisuudet Suomen oikeusjärjestelmä tarjoaa vesivoimalupien ja lyhytaikaisäännöstelyn päivittämiseen?
- 4) Tulisiko kansallista sääntely- ja ohjausjärjestelmää kehittää vesienhoidon ympäristötavoitteiden ja vesivoimalla tuotetun säättövoiman yhteensovittamiseksi?

Toiminnoille aiheutuvan merkittävän haitan raja määrittää yhtäältä mahdollisuudet nimetä vesimuodostuma, jota vesivoimatuotanto on muuttanut, voimakkaasti muutetuksi (VPD 4(3) art., VMJL 22 §). Toisaalta parhaan ekologisen potentiaalin / saavutettavissa olevan ekologisen tilan saavuttaminen edellyttää kaikkien lieventävien toimenpiteiden toteuttamista niin pitkälle, että jäljelle jäävät enää sellaiset hydrologis-morfologiset muutokset, jotka johtuvat veden voimakkaasti muutetuista ominaispiirteistä (VPD liite V). Siten säättövoimatuotannolle aiheutuva haitta on keskeinen arviointiperuste paitsi vesimuodostuman voimakkaasti muutetuksi nimeämisessä myös säättövoiman ympäristöhaittoja lieventävien toimenpiteiden mitoituksessa.

Luku rakentuu siten, että siinä käsitellään:

- 1) Säättövoimatuotannolle aiheutuvan merkittävän haitan sääntelyn EU-oikeudellisia perusteita ja kansallista tulkintaa. Tarkastelu kohdentuu vesipolitiikan puitedirektiivin sekä vesien- ja merenhoitolain järjestelmään, jossa säädetään vesienhoidon ympäristötavoitteista, vesienhoidon suunnittelujärjestelmästä ja toimenpiteistä sekä säättövoimatuotannolle aiheutuvan merkittävän haitan arvioinnista.
- 2) Merkittävän haitan arviointia Ruotsin, Saksan, Itävallan ja Ranskan järjestelmissä. Kaikissa näissä EU:n jäsenmaissa vesivoimalaitosten tuottamalla säättövoimalla on tärkeä merkitys sähköjärjestelmässä.
- 3) Vesivoimalaitosten tuottaman säättövoiman oikeudellista sääntelyä Suomen lupa-järjestelmässä ja tämän yhteyksiä EU:n ja vertailuvaltioiden sääntelyyn.

Lähteistönä luvussa käytetään tavanomaisia oikeudellisia lähteitä, kuten lainsäädäntöä, valmistelutöitä, oikeuskäytäntöä ja oikeuskirjallisuutta. Myös EU:n ja kansallisen tason KeVoMu-ohjeistuksella on luvussa keskeinen merkitys, mutta sen suhteen on otettava huomioon, että kysymys ei ole sitovasta oikeuslähteestä. Kuitenkin esimerkiksi vesipuitedirektiivin yhteisen toimeenpanostrategian (Common Implementation Strategy CIS) ohjeet edustavat komission ja jäsenmaiden yhteistä näkemystä direktiivin säännösten tulkinnasta.

Ruotsin, Saksan, Itävallan ja Ranskan järjestelmien tarkastelu perustuu pääasiassa kunkin maan kansallisiin asiakirjoihin ja ohjeistuksiin vesipuitedirektiivin täytäntöönpanosta. Tiedonetsinnässä ovat avustaneet Itävallan osalta EurEau ja Ranskan osalta Seine-Normandian vesivirasto (Agence de l'eau Seine-Normandie) sekä Ranskan vesiakatemia (Académie de l'Eau).

## 8.2 Merkittävä haitta vesienhoidossa

### 8.2.1 Vesienhoidon ympäristötavoitteet

Säättövoiman tuottamiselle aiheutuvan merkittävän haitan tarkastelu liittyy vesienhoidon ympäristötavoitteiden saavuttamiseen. Tässä suhteessa keskeinen ympäristötavoite on KeVoMu-vesimuodostumien hyvän ekologisen potentiaalin / saavutettavissa olevan ekologisen tilan tavoite.

VPD 4(1) artiklan ja VMJL 21 §:n nojalla vesienhoidon ympäristötavoitteina ovat:

- 1) Pinta- ja pohjavesimuodostumien tilan huonontamisen ehkäiseminen (VMJL: tila ei heikkene) (heikentämiskielto) ja
- 2) Vesimuodostumien hyvän tilan tai KeVoMu-vesimuodostumien hyvän ekologisen potentiaalin / hyvän saavutettavissa olevan ekologinen tilan ja hyvän kemiallisen tilan saavuttaminen.

Vesimuodostumien hyvä tila tai hyvä ekologinen potentiaali ja hyvä kemiallinen tila tuli saavuttaa vuoteen 2015 mennessä (VPD 4(1) art., VMJL 21 §). Jäsenvaltio voi pidentää tavoitteiden saavuttamiseen määräaikaan tietyin edellytyksin enintään vuoteen 2027 asti tai luonnonolojen niin vaatiessa tätäkin pidemmälle (VPD 4(4) art., VMJL 25 §). Vesienhoitolainsäädännöstä säädetään myös mahdollisuudesta ympäristötavoitteiden alentamiseen (VPD 4(5) art., VMJL 24 §).

Pintavesimuodostumien tila luokitellaan referenssitilan perusteella. Tavallisissa pintavesimuodostumuksissa referenssitila vastaa erinomaista ekologista tilaa eli sellaisia laadullisten tekijöiden olosuhteita, joissa ihmisen toiminnasta ei ole aiheutunut häiriöitä. Hyvässä ekologisessa tilassa laatutekijöissä on havaittavissa vain vähäisiä ihmistoiminnasta johtuvia muutoksia suhteessa erinomaiseen tilaan (VPD liite V). KeVoMu-vesimuodostumien referenssitilana on edellä mainittu paras mahdollinen ekologinen potentiaali / saavutettavissa oleva ekologinen tila.

Vesipuidedirektiivin järjestelmässä KeVoMu-vesimuodostumien ekologinen potentiaali arvioidaan biologisten, hydrologis-morfologisten ja fysikaalis-kemiallisten laatutekijöiden perusteella neliportaisen luokittelujärjestelmän mukaisesti hyvään, tyydyttävään, välttävään tai huonoon tilaan. Jokien laatutekijöihin kuuluvat esimerkiksi kalaston runsaus-suhteet ja koostumus, hydrologinen järjestelmä (joen virtaus) ja joen esteettömyys (VPD 2 art. ja liite V). Jokivesimuodostumien hyvän ekologisen tilan havainnollistamista varten on vesipuidedirektiivin yhteisen toimeenpanostrategian yhteydessä kehitetty ekologisen virtaaman (ecological flow) käsite (komissio 2015).

EU-tuomioistuin linjasi Weser-tuomiossa (C-461/13), että ympäristötavoitteet ovat oikeudellisesti sitovia uusien hankkeiden lupaharkinnassa. Tuomioistuimen mukaan sellaiselle hankkeelle, joka huonontaa pintavesivesimuodostuman tilaa tai vaarantaa hyvän tilan tai hyvän ekologisen potentiaalin saavuttamisen, ei saa myöntää lupaa ilman poikkeusta. Suomessa korkein hallinto-oikeus on vahvistanut tämän linjauksen soveltamisen kansallisella tasolla omassa oikeuskäytännössään (ks. KHO 2017:87 ja KHO 2019:166). Oikeuskirjallisuudessa viitataan siihen, että vesienhoidon ympäristötavoitteet muodostavat jäsenvaltiolle tulosvelvoitteen saavuttaa ympäristötavoitteet, ei pelkästään velvollisuutta ryhtyä tätä tarkoittaviin toimenpiteisiin (van Kempen 2021, Puharinen ym. 2021).

Vesimuodostumien heikentämiskielto ja niiden hyvän tilan tai hyvän ekologisen potentiaalin saavuttaminen ovat Suomea sitovia EU-oikeudellisia velvoitteita, joista voidaan poiketa ainoastaan direktiivissä tarkoitetuilla perusteilla. Ympäristötavoitteet tulee saavuttaa vesienhoidon toimenpiteiden avulla.

## 8.2.2 Vesienhoidon toimenpiteet

Vesienhoidon ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi vesipuitedirektiivissä sekä vesien- ja merenhoidon järjestämisestä annetussa laissa säädetään vesienhoidon suunnittelu- järjestelmästä ja siihen sisällytettävistä toimenpiteistä. Suunnittelujärjestelmän tarkoituksena on tuottaa yhtäältä riittävä tietopohja vesienhoidon päätöksenteon perustaksi ja toisaalta ohjata vesienhoidon toimenpiteitä ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi. Tässä tarkoituksessa on laadittava vesienhoitoalueen vesienhoitosuunnitelma ja sen osaksi tuleva toimenpideohjelma (VPD 11 ja 13 art., VMJL 11–12 §).

Vesienhoidon suunnittelu on vaiheittainen prosessi, joka toistuu kuuden vuoden välein. Se kulmineoittuu vesienhoitosuunnitelman ja toimenpideohjelmien hyväksymiseen kullekin vesienhoitoalueelle (Belinskij ym. 2018). Parhaillaan on käynnissä vesienhoidon kolmas suunnittelukausi 2021–2027, jota koskevat vesienhoitosuunnitelmat hyväksyttiin vuonna 2021.

Vesienhoidon suunnitteluun sisältyvät seuraavat vaiheet:

- 1) Vesimuodostumien ominaispiirteiden määrittäminen ja ihmistoiminnan vaikutusten tarkastelu
- 2) Vesimuodostumakohtaisten ympäristötavoitteiden asettaminen ja poikkeusten soveltaminen
- 3) Toimenpideohjelman laatiminen
- 4) Toimenpiteiden toteuttaminen ja vesien tilan seuranta
- 5) Suunnitelmien päivittäminen 6 vuoden välein (ks. Belinskij ym. 2018)

VPD 4 artiklan nojalla jäsenvaltion on pantava täytäntöön kaikki tarvittavat toimenpiteet pintavesimuodostumien tilan huonontumisen ehkäisemiseksi ja hyvän tilan tai hyvän ekologisen potentiaalin ja hyvän kemiallisen tilan saavuttamiseksi. Hyvän tilan saavuttamiseksi jäsenvaltion on suojeltava, parannettava ja ennallistettava pintavesimuodostumia, ja hyvän ekologisen potentiaalin saavuttamiseksi suojeltava KeVoMu-vesimuodostumia ja parannettava niiden tilaa. VMJL 21 §:ssä viitataan pintavesimuodostumien mukaan lukien KeVoMu-muodostumat suojelemiseen, parantamiseen ja ennallistamiseen.

Vesienhoidon toimenpideohjelman tulee sisältää VPD 11 artiklan nojalla tietyt perustoimenpiteet vähimmäisvaatimuksina ja tarvittaessa täydentäviä toimenpiteitä vesienhoidon ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi. Vesivoimatuotantoon liittyen perustoimenpiteisiin kuuluvat pintaveden patoamisen ennakovalvonta ja ennakovalvontatoimenpiteiden säännöllinen tarkistaminen sekä tarvittaessa ajan tasalla saattaminen (VPD 11(3) art.). Jos vesienhoidon ympäristötavoitteita ei saavuteta, tulee jäsenvaltion huolehtia erikseen lupien tarkastelusta ja tarvittaessa tarkistusten tekemisestä niihin (VPD 11(5) art.).

Vesien- ja merenhoitolaissa ei viitata vesienhoidon perustoimenpiteinä patoamisen ennakovalvontatoimenpiteiden säännölliseen tarkistamiseen tai täydentävänä toimenpiteenä lupien tarkistamiseen. Asetuksessa vesienhoidon järjestämisestä (VHA 1040/2060) edellytetään, että ELY-keskuksen tulee osana toimenpideohjelman tarkistamista tarkastella pintaveden patoamisen ennakovalvontatoimenpiteitä ja esittää tarvittaessa toimia niiden saattamiseksi ajan tasalle (VHA 24 §). Vesivoimalupien muuttamisesta säädetään varsinaisesti vesilaissa, jossa vesienhoidon ympäristötavoitteita ei mainita luvan muuttamisen perusteena (Belinskij ym. 2019).

## 8.2.3 Vesimuodostuman nimeäminen voimakkaasti muutetuksi

### 8.2.3.1 Tärkeän vedenkäytön suhde ekologisiin tavoitteisiin

Vesipuidedirektiivissä sekä laissa vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä tunnistetaan tiettyjen vedenkäyttömuotojen olevan niin tärkeitä, että hyvän ekologisen tilan saavuttamista ei vaadita kaikissa vesimuodostumissa. Pintavesimuodostuma voidaan tällöin nimetä VPD 4(3) artiklan ja VMJL 22 §:n perusteella tietyin edellytyksin keinotekoiseksi tai voimakkaasti muutetuksi. Hyvän ekologisen potentiaalin / hyvän saavutettavissa olevan ekologisen tilan tavoite määritetään erikseen kullekin KeVoMu-vesimuodostumalle VPD liitteen V suuntaviivojen mukaisesti.

Vesivoiman ja erityisesti säätövoiman tuotannolla on merkittäviä vaikutuksia jokien ekologiseen tilaan. Näitä vaikutuksia aiheuttavat jokien rakenteelliset muutokset, kuten padot ja tekoaltaat, sekä virtaamien säännöstely (komissio 2015). Hyvän ekologisen tilan saavuttaminen vesivoimatuotantoon valjastetuissa joissa vaatisi siten usein merkittäviä ympäristötoimenpiteitä, kuten säännöstelyn voimakasta rajoittamista tai vesivoimapatojen purkamista. Hyvän ekologisen potentiaalin saavuttamiseksi ympäristötoimenpiteitä ei tarvitse ulottaa niin pitkälle, että niistä aiheutuisi merkittäviä haitallisia vaikutuksia vesivoiman ja säätövoiman tuotannolle.

### 8.2.3.2 Nimeämisen edellytykset

Vesimuodostuman voimakkaasti muutetuksi nimeämiseksi on VPD 4(3) artiklassa ja VMJL 22 §:ssä kolme edellytystä:

1. Vesimuodostuman hydrologis-morfologisten ominaisuuksien muutos eli fyysinen muutos.
2. Hyvän ekologisen tilan saavuttamisesta aiheutuvat merkittävät haitalliset vaikutukset ympäristölle laajemmin tai lainkohdassa tarkoitetuille tärkeille kestävän kehityksen mukaisille ihmisen toimille, kuten voiman tuotannolle tai veden säännöstelylle
3. Ei ympäristöllisesti parempia vaihtoehtoja näille tärkeille toimille: Muutettujen ominaispiirteiden tuomaa hyötyä ei voida saavuttaa teknisen toteutettavuuden tai kohtuuttomien kustannusten takia kohtuudelle muilla, ympäristön kannalta merkittävästi paremmilla keinoilla

**Fyysinen muutos.** VPD 2 (9) artiklan määritelmän mukaan voimakkaasti muutetuksi nimettävät vesimuodostumat ovat ihmistoiminnan fyysisesti merkittävästi muuttamia.<sup>99</sup> VMJL 22 §:ssä viitataan rakentamalla tai muutoin fyysisesti muutettuun vesimuodostumaan. VPD 4(3) artiklan perusteella tällainen fyysinen muutos voi aiheutua esimerkiksi veden varastoinnista voiman tuotantoa varten ja veden säännöstelystä. VMJL 22 §:ssä viitataan astetta suoraviivaisemmin vesivoiman tuotantoon ja vesistön säännöstelyyn.

Siten vesimuodostuman voimakkaaksi muutetuksi nimeämisen taustalla on tilanne, jossa jokin VPD 4(3) artiklassa ja VMJL 22 §:ssä tarkoitettu vedenkäyttömuoto on aiheuttanut pintaveden hydrologis-morfologisissa ominaispiirteissä sellaisia merkittäviä muutoksia, jotka estävät hyvän ekologisen tilan saavuttamisen. Vesivoimatuotannon aiheuttamat muutokset ovat erityisen merkittäviä säätövoimatuotannon yhteydessä, kun säännöstelyaltaat ja perkaukset ovat muuttaneet joen ekologiaa järvimaiseen suuntaan (Iho ym. 2023). VHA 5 §:n nojalla voimakkaasti muutetuksi pintavesimuodostumaksi voidaan nimetä rakentamalla, säännöstelemällä tai muulla tavalla muutettu pintavesimuodostuma, jonka alkuperäiset hydrologis-morfologiset olot eivät ole enää vallitsevia.

<sup>99</sup> Direktiivin englannin- ja suomenkielisessä versiossa fyysisen muutoksen edellytys määritetään hieman eri tavalla. Suomenkielisen version mukaan vesimuodostuman on oltava ihmisen toiminnan merkittävästi fyysisesti muuttama, kun taas englanninkielisessä versiossa viitataan astetta tarkemmin siihen, että pintavesimuodostumaan on kohdistunut ihmistoiminnasta johtuvia fyysisiä muutoksia, joiden johdosta se on muuttanut ominaispiirteiltään merkittävästi. Kyseessä on lähinnä semanttinen ero, mutta englanninkielinen versio korostaa astetta tarkemmin sitä, että kyse on olennaisesta vesimuodostumaa määrittävien ominaispiirteiden muuttamisesta.

**Merkittävät haitalliset vaikutukset ihmistoimille.** VPD 4(3) artiklan (a) alakohdan ja VMJL 22 §:n perusteella KeVoMu-nimeämisen edellytyksenä on, että hyvän ekologisen tilan saavuttamiseksi tarvittavista hydrologis-morfologisten ominaisuuksien muutoksista aiheutuisi merkittäviä haitallisia vaikutuksia laajempaan ympäristöön tai lainkohdissa tarkoitettuihin vedenkäyttötoimintaan, johon kuuluvat muun muassa veden varastointi voiman tuotantoa varten ja vedensäännöstely. Veden varastointi voiman tuotantoa varten ja vedensäännöstely viittaavat suoraan säätövoiman tuotantoon, mikä voi siten oikeuttaa vesimuodostuman nimeämiseen voimakkaasti muutetuksi (Immen-doerfer ym. 2017).

**Ei ympäristöllisesti parempia vaihtoehtoja.** Mikä tahansa VPD 4(3) artiklassa ja VMJL 22 §:ssä tarkoitettu vedenkäyttötoiminto ei voi olla perusteena vesimuodostuman voimakkaasti muutetuksi nimeämiselle. Nimeämisen edellytyksenä on 4(3) artiklan (b) alakohdan mukaan se, että toiminta tuottaa hyötyä, jota ei teknisen toteutettavuuden tai kohtuuttomien kustannusten vuoksi voida kohtuudella saavuttaa muilla, ympäristön kannalta paremmilla keinoilla (ks. komissio 2020) VMJL 22 §:ssä viitataan samassa tarkoituksessa teknisiin tai taloudellisiin syihin.

### 8.2.3.3 Vesivoiman tuotanto nimeämisen perusteena

Sellaista vesimuodostumaa, johon vesivoiman tuotanto vaikuttaa, ei voida vesienhoitolainsäädännön perusteella automaattisesti nimetä voimakkaasti muutetuksi. Niin fyysisen muutoksen, merkittävien haitallisten vaikutusten kuin vaihtoehtojen arvioinnin suhteen on olennaista, minkälaista vesivoimatuotantoa laitos harjoittaa ja minkä kokoinen se on. Lyhytaikaista säätövoimaa tuottavat suuret vesivoimalaitokset voivat täyttää nimeämisen kriteerit, mutta sellaiset pienet laitokset, jotka eivät osallistu säätövoimatuotantoon, eivät yleensä oikeuta nimeämään vesimuodostumaa voimakkaasti muutetuksi.

Syynä sille, miksi vesimuodostumaa ei voida tavallisesi nimetä voimakkaasti muutetuksi pienten vesivoimalaitosten takia, ovat seuraavat seikat:

- Pienten vesivoimalaitosten toiminta ei välttämättä muuta merkittävästi vesimuodostuman fyysisiä ominaisuuksia. Tällöin hyvä ekologinen tila voi olla ylläpidettävissä tai saavutettavissa ympäristötoimenpiteiden avulla.
- Hyvän ekologisen tilan saavuttamiseksi tarvittavat muutokset pieniin vesivoimalaitoksiin eivät tavallisesti aiheuta merkittäviä haitallisia vaikutuksia sähköntuotantoon sähköjärjestelmien tasolla. Pienet vesivoimalat eivät muodosta merkittävää uusiutuvan energian lähdettä eivätkä tavallisesti osallistu lyhytaikaisen säätövoiman tuotantoon.

- Pienten laitosten uusiutuvan energian tuottamisesta saatavat hyödyt ovat niin pieniä, että ne voidaan mahdollisesti saavuttaa ympäristön kannalta paremmilla vaihtoehdoilla (Bakken ym. 2014, komissio 2020, Iho ym. 2023).

On tulkinnanvaraista, minkä tyyppinen ja kokoinen vesivoimatoiminta voi oikeuttaa nimeämään vesimuodostuman voimakkaasti muutetuksi. Lyhytaikaisen säätövoiman tuottamiseen osallistuminen ja kokonaistuotantokapasiteetti ovat tässä suhteessa merkityksellisiä tekijöitä. Ruotsi on esimerkiksi jakanut vesivoimalaitokset kolmeen kategoriaan pitkälti sen mukaan, kuinka tärkeitä ne ovat säätövoiman ja kokonaisenergiatuotannon kannalta (ks. jäljempänä luku 8.3.1). On myös huomattava, että KeVoMu-nimeäminen on dynaaminen prosessi. Nimeäminen ja sen perusteet tulee tarkistaa vesienhoitokausittain (VPD 4(3) art.).

Seuraavaksi tarkastellaan astetta tarkemmin, miten ja millä skaalalla ympäristöllisesti parempia vaihtoehtoja tulisi tarkastella. Vesivoimatuotannolle aiheutuviin merkittävästi haitallisiin vaikutuksiin palataan jäljempänä hyvän ekologisen potentiaalin / hyvän saavutettavissa olevan ekologisen tilan arviointikriteerien tarkastelun yhteydessä luvussa 8.2.5.

## 8.2.4 Ympäristön kannalta paremmat vaihtoehdot

### 8.2.4.1 Vaihtoehtojen arviointi voimakkaasti muutetuksi nimeämisen yhteydessä

Vesivoimuodostuman voimakkaasti muutetuksi nimeämisen edellytyksenä on VPD 4(3) artiklan ja VMJL 22 §:n nojalla merkittävän haitan ohella se, ettei nimeämiselle ole ympäristöllisesti parempia vaihtoehtoja. Vaihtoehtoja ei ole, jos vesimuodostuman muutettujen ominaispiirteiden tuomaa hyötyä ei voida teknisen toteutettavuuden tai kohtuuttomien kustannusten vuoksi kohtuudella saavuttaa muilla, ympäristön kannalta merkittävästi paremmilla keinoilla.

Ympäristön kannalta merkittävästi paremmat keinot mainitaan vesienhoitolainsäädännössä myös ympäristötavoitteista poikkeamisen edellytyksenä. VPD 4(5) ja VMJL 24 §:n artiklan nojalla vähemmän vaativien ympäristötavoitteiden asettamisen yhtenä edellytyksenä on, että poikkeamisen tarpeita ei voida tyydyttää sellaisilla muilla ympäristön kannalta merkittävästi paremmilla keinoilla, joista ei aiheudu kohtuuttomia kustannuksia. VPD 4(7) ja artiklassa ja VMJL 23 §:ssä asetetaan puolestaan yhdeksi hankekohtaisen poikkeuksen edellytykseksi, että uuden hankkeen hyötyjä ei voida teknisen toteuttamiskelpoisuuden tai kohtuuttomien kustannusten vuoksi saavuttaa muilla, ympäristön kannalta merkittävästi paremmilla keinoilla.

Ympäristön kannalta parempia vaihtoehtoja on vesipuidedirektiivin mukaisesti arvioitava vesimuodostuman voimakkaasti muutetuksi nimeämisen yhteydessä. Hyvän ekologisen potentiaalin arvioinnissa niillä ei ole välitöntä merkitystä. Jos hyvän ekologisen tilan esteenä olevien muutosten hyödyt voidaan saavuttaa vaihtoehtoisin keinoin, vesimuodostumaa ei saa nimetä keinotekoiseksi tai voimakkaasti muutetuksi. Säättövoiman yhteydessä arviointi palautuu siihen, onko sen tuottamiselle vesivoimalla kohtuullisia vaihtoehtoja.

#### 8.2.4.2 Vaihtoehtojen arvioinnin laajuus

Säättövoiman vaihtoehtojen arvioinnissa olennainen kysymys on, kuinka laajasti vaihtoehtoja on syytä tarkastella. Kuuluvatko vaihtoehtoihin esimerkiksi yksittäisen laitoksen tuotantovaihtoehdot, tuotannon vaihtoehtoiset sijoituspaikat vai vaihtoehtoiset sähköntuotantomuodot.

Vesipuidedirektiivin yhteisessä toimeenpanostrategiassa tunnistetaan VPD 4(3) artikkelassa tarkoitettujen vaihtoehtoisien keinojen eri skaalat (komissio 2003, 2009, 2017 ja 2020):

- Strategisella tasolla arviointi ulottuu paikallista tasoa laajemmalle, jolloin harkittavaksi tulevat esimerkiksi muut uusituvan energian tuotannon muodot, toimenpiteet energiatehokkuuden kasvattamiseksi ja vaihtoehtoiset sijainnit vesivoiman tuotannolle. Arvioitavaksi voivat tulla vesivoiman säätökyvyn korvaaminen muulla säättövoimalla tai vesivoimaan perustuvan säättövoiman tuottaminen vaihtoehtoisella alueella.
- Maantieteellisesti vaihtoehtoja voidaan tarkastella paikallisella, alueellisella, valuma-alueen tai kansainvälisellä tasolla. Tämä määräytyy hankkeen todellisten vaihtoehtojen perusteella. Vesivoiman yhteydessä kyse on sähköjärjestelmän skaalasta. Jos skaalasta ei ole varmuutta, arviointi tulisi suorittaa eri tasoilla.
- Projektikohtainen vaihtoehtojen arviointi sisältää hankkeen erilaiset tekniset toteuttamistavat. Arvioinnissa voidaan hyödyntää ympäristövaikutusten arviointimenettelyn tuloksia hankkeen vaihtoehtoisista toteuttamistavoista. Ympäristövaikutusten arviointi keskittyy kuitenkin uusiin hankkeisiin, eikä sen suorittaminen ole välttämättä riittävä menettely ympäristön kannalta parempien keinojen selvittämiseksi.

Vesienhoidon kansallisessa ohjeistuksessa todetaan, että ympäristön kannalta merkittävästi parempien keinojen arviointi vesimuodostuman nimeämismenettelyssä vaatisi usein laajaa yhteiskunnallista keskustelua ja yleistä linjausta esimerkiksi hallitusohjelmassa tai maakuntastrategiassa. Esimerkkinä mainitaan kysymys siitä, tulisiko ympäris-

tölle haitallisempi pienvesivoimaenergia korvata tuulienergialla (Vesienhoidon toimenpiteiden suunnittelu vuosille 2022–2027: Vesimuodostuman nimeäminen keinotekoiseksi tai voimakkaasti muutetuksi, Ohjeistus III suunnittelukierrokselle).

Eri voimantuotantomuotojen välisessä tarkastelussa on kuitenkin otettava huomioon, että jäsenvaltiolla on toimivalta päättää energiapolitiikastaan jaetun toimivallan mukaisesti. Euroopan unionin toiminnasta tehdyn sopimuksen (SEUT) 194(2) artiklan mukaan jäsenvaltiolla on oikeus määritellä energiavarojensa hyödyntämisen ehdot, valinnat eri energialähteiden välillä ja energiahuoltonsa yleinen rakenne. Vesipuidedirektiivin sääntelystä ei siten voida johtaa suoraan velvoitetta tuottaa energia tietyllä vaihtoehdolla tuotantomuodolla.

#### 8.2.4.3 Ympäristöllisesti paremmat vaihtoehdot muualla EU-lainsäädännössä

Ympäristön kannalta merkittävästi parempien keinojen arvioinnissa tulkinta-apuna voidaan hyödyntää muuta EU-oikeudellista sääntelyä. Vaihtoehtojen arviointiin viitataan esimerkiksi luontodirektiivissä (92/43/ETY) ja kesäkuussa 2024 annetussa ennallistamisasetuksessa ((EU) 2024/1991). Näistä kumpikaan säädös ei kuitenkaan anna selvää tukea vaihtoehtojen arvioinnin laajuuteen VPD 4(3) artiklassa.

Luontodirektiivin 6(4) artiklassa asetetaan Natura-alueen suojelusta poikkeamisen edellytykseksi vaihtoehtojen puuttuminen, mikä liittyy tyypillisesti hankkeen vaihtoehtoihin toteutuspaikkoihin- ja tapoihin (komissio 2018a). Komission ohjeistuksen valossa luontodirektiivin 6(4) artiklan mukainen vaihtoehto vesivoiman tuottamiselle voi olla hankkeen vaihtoehtoinen sijainti tai laajuus, eri rakennusmenetelmät tai vaihtoehtoinen uusiutuvan energian ja säätövoiman tuottamisen tapa (komissio 2018b).

Ennallistamisasetuksen 6 artiklan perusteella jäsenvaltiot voivat vapauttaa uusiutuvan energian hankkeet vaihtoehtojen arvioinnista, jos hankkeesta on tehty strateginen ympäristövaikutusten arviointi tai ympäristövaikutusten arviointi. Siten ennallistamisasetuksessa vähemmän haitallisilla ratkaisulla viitataan erityisesti hankkeen vaihtoehtoihin toteuttamistapoihin, joihin YVA-arvioinnissa keskitytään.

## 8.2.5 Hyvän ekologisen potentiaalin määrittäminen

### 8.2.5.1 Merkittävä haitta rajana

Voimakkaasti muutetuiksi nimetyissä vesimuodostumissa ekologiset tavoitteet ja vedenkäyttöintressit sovitetaan yhteen vesimuodostuman tasolla hyvän ekologisen potentiaalin tavoitteen määrittelyssä. Hyvä ekologinen potentiaali / saavutettavissa oleva ekologinen tila poikkeaa vain vähän parhaasta mahdollisesta ekologisesta potentiaalista / saavutettavissa olevasta ekologisesta tilasta (VPD liite V).

Paras mahdollinen ekologinen potentiaali kuvaa VPD liitteen V mukaisesti mahdollisimman tarkasti lähimmän vastaavan pintavesimuodostumatyyppin ominaispiirteitä. Sen biologiset laatutekijät vastaavat tällaisen pintavesimuodostumatyyppin arvoja, kun otetaan huomioon muutetut fyysiset olosuhteet, ja hydrologis-morfologisissa olosuhteissa on vain sellaisia muutoksia, jotka ovat jääneet jäljelle kaikkien toteutavissa olevien lieventävien toimenpiteiden jälkeen. Lieventävien toimenpiteiden tarkoituksena on varmistaa, että joen ekologinen jatkumo on mahdollisimman lähellä parasta toteutettavissa olevaa ekologista jatkumoa erityisesti eläimistön vaelluksen sekä kutemis- ja lisääntymisaluiden kannalta.

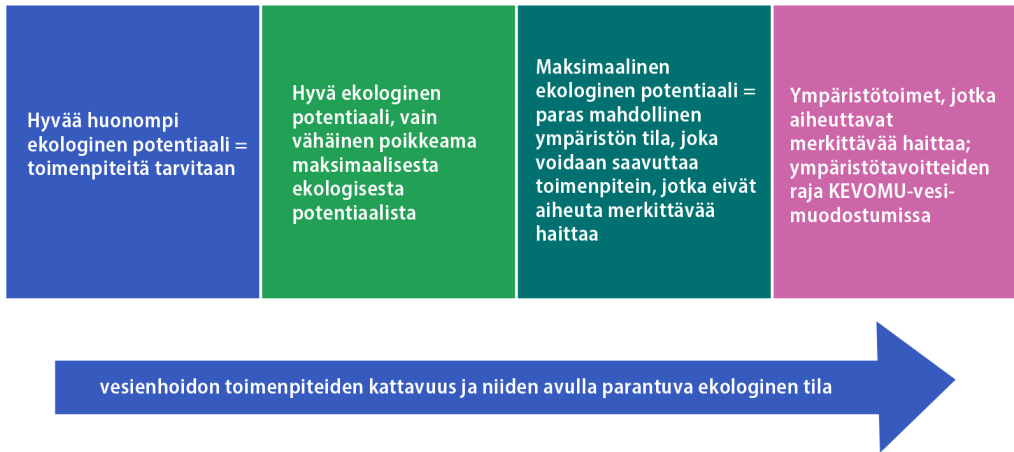
Paras mahdollinen ekologinen potentiaali kuvaa siten luettuna yhdessä VPD 4(3) artiklan merkittävän haitan edellytyksen kanssa vesimuodostuman olosuhteita sen jälkeen, kun kaikki lieventämistoimenpiteet, jotka eivät aiheuta merkittäviä haitallisia vaikutuksia, on toteutettu. Erityisesti tulee kiinnittää huomiota joen ekologiseen jatkumoon.<sup>100</sup> Tällaiset lieventämistoimenpiteet voivat sisältää esimerkiksi kalojen kulun mahdollistavien rakenteiden tai luonnonmukaisten kiertokanavien rakentamisen ja veden ohjaamisen niihin. Myös joen luonnollisen virtauksen ja vedenkorkeuden edistäminen ovat tällaisia toimia (komissio 2020).

On myös otettava huomioon, että hyvän saavutettavissa olevan ekologisen tilan määrittely on dynaaminen prosessi. Kuten korkein hallinto-oikeus tuo esille tapauksessa KHO 2015:63 esimerkiksi alajuoksulla toteutettavat kunnostamishankkeet voivat muuttaa tietyn alueen olosuhteita ja ympäristötoimenpiteisiin ryhtymisen tarpeita suhteessa yksittäiseen vesivoimalaitokseen.

---

<sup>100</sup> Ekologinen jatkumo viittaa energian, aineen ja eliöiden liikkeisiin vesiekosysteemisissä, missä tietyn tyyppisten vesilajien elinympäristöt ovat toisiinsa yhteydessä tilan ja ajan suhteen lajien elinkierron toteuttamiseksi (komissio 2020).

**Kuvio 30.** Keinotekoisien tai voimakkaasti muutettujen vesimuodostumien ympäristötavoitteet



### 8.2.5.2 Hyvä saavutettavissa oleva tila Suomen KeVoMu-ohjeistuksessa

Vesienhoidossa oikeudellisena haasteena KeVoMu-nimeämisissä ja lyhytaikaissäännöstelyyn vaikuttavien ympäristötoimenpiteiden arvioinnissa on se, ettei EU-tasolla tai kansallisesti ole selvää määritelmää siitä, mikä muodostaa merkittävän haitan vesivoimatuotannolle. Suomessa tietyn vesimuodostuman määrittely voimakkaasti muutetuksi vesimuodostumaksi ja sen hyvän saavutettavissa olevan tilan määrittely pohjautuu pitkälti asiantuntija-arvioon (Vaikuta vesiin 2021). Merkittävää haittaa tulee siinä verrata ympäristötoimenpiteistä saatavaan hyötyyn (Syke 2013).

Merkittäviä haitallisten vaikutusten arvioinneista Suomessa ei ilmene selvästi, millä skaaloilla merkittävää haittaa on arvioitu (laitos, alueellinen, valtakunnallinen) tai miten vaihtoehtoiset sähköntuotantomenetelmät on otettu huomioon. Arviointeja on tehty tapauskohtaisesti kunkin vesivoimalaitoksen kohdalla keskittyen pääasiassa toimijan taloudelliseen tilanteeseen ja lieventämistoimenpiteiden kustannuksiin (ks. esim. Räinen ym. 2022).

Vuoden 2013 KeVoMu-ohjeistuksessa todetaan, että merkittävyyden arvioinnissa on otettava huomioon vaikutukset esimerkiksi vesivoimalaitosten tuotantoon sekä voimalaitoksen kannattavuuteen (Syke 2013). Sittemmin ohjeistuksessa on alettu painottaa haittaa yleiselle edulle eikä niinkään yksittäiselle yhtiölle. Haitan arvioinnin skaaloina ovat eri tasot paikallisesta alueellisesta ja valtakunnalliseen (Aroviita ym. 2019).

Kansallisissa vesienhoidon suunnitteluoppaissa todetaan, että merkittävälle haitalle ei ole mahdollista määrittää yksiselitteistä kaikkiiin tilanteisiin soveltuvaa kriteeriä. Oppaissa ei ole esimerkiksi määritetty tarkkoja prosenttiarvoja sähköntuotannon väheneemiselle, vaan korostetaan tapauskohtaisen arvioinnin tarvetta. Suurissa vesistöissä kuitenkin 5–10 % menetystä voimataloudelle voidaan ohjeistuksen perusteella pitää suurella varmuudella merkittävänä (Syke 2013 ja Aroviita ym. 2019).

Kansallisen ohjeistuksen perusteella lieventämistoimenpiteiden toteuttamiskustannuksia ei tule ottaa huomioon merkittävän haitan arvioinnissa. Sen sijaan merkittävää haittaa tulee arvioida suhteessa tärkeälle käyttömuodolle suoraan aiheutuviin haittoihin. Vesivoimaan vaikuttavien toimenpiteiden haittoiksi arvioidaan niistä seuraavat voimatalousmenetykset. Nämä voivat koostua eri osista, kuten kokonaistuotannon vähentymisestä, varastokapasiteetin vähentymisestä ja lyhytaikaissäännöstelyn rajoittamisesta (Aroviita ym. 2019).

Lyhytaikaissäännöstelystä kansallisessa ohjeistuksessa todetaan erityisesti, että siihen voi olla tarpeen tehdä kalankulkuväylien toimivuuden parantamiseksi sellaisia muutoksia, jotka aiheuttavat voimatalousmenetyksiä. Lyhytaikaissäännöstelyn kehittämisen tarkempi sisältö voidaan kuitenkin selvittää yleensä vasta siinä vaiheessa, kun kalankulkuväylät on otettu käyttöön. Näin ollen toimenpiteistä aiheutuvia menetyksiä on hankala arvioida vielä vesienhoidon suunnittelussa. Kalankulkuväylät on ohjeistuksen perusteella mahdollista toteuttaa maltillisesti mitoittaen (suurissa joissa noin 2–3 % joen keskivirtaamasta vuosikeskiarvona laskettuna) siten, että niiden käyttö ja toimivuuden parantaminen ei aiheuta merkittävää haittaa voimataloudelle (Aroviita ym. 2019).

### 8.2.5.3 Vesienhoidon suunnittelun toimenpiteet

Suomen vesienhoitosuunnitelmista käy ilmi, että lyhytaikaissäännöstely ja puuttuvat kalatiet vaikeuttavat hyvään saavutettavissa olevaan ekologiseen tilaan pääsemistä (ks. esim. Westberg ym. 2022). Toimenpideohjelmissa on tunnistettu sellaisten lupamuutosten tarpeellisuus, joiden avulla vesimuodostumissa voidaan saavuttaa lyhytaikaissäännöstelyn haittavaikutuksia vähentävä virtaama. Kaikissa kohteissa ei kuitenkaan ole sellaisia toimenpidevaihtoehtoja, jotka eivät aiheuttaisi merkittävää haittaa vesivoimatuotannolle (ks. esim. Laine ym. 2022).

Yksittäisistä toimenpideohjelmissa esimerkiksi Oulujoen-lijoen vesienhoitoalueen toimenpideohjelmassa vuosille 2022–2027 kiinnitetään huomiota lyhytaikaissäännöstelyyn ja kalankulun edistämisen toimenpiteisiin. Ohjelmassa viitataan virtaaman vuorokausivaihtelun lieventämiseen tietyillä alueilla, säännöstelykäytäntöjen kehittämiseen, ekologisiin virtaamiin ja eri voimalaitosten säännöstelyn synkronoinnin parantamiseen. Useissa kohdin tunnistetaan kuitenkin, että vesivoimatuotannolle aiheutuva merkittävä

haitta rajoittaa näiden toimenpiteiden toteuttamista. Ehkä hieman yllättäen toimenpideohjelmassa viitataan tietyiltä osin myös puutteellisiin tietoihin ympäristövirtaaman toteutettavuudesta, haitoista ja ekologisista hyödyistä luokittelun varmistamiseksi, vaikka kyse on jo vesienhoidon kolmannesta suunnittelukaudesta (Laine ym. 2022). Toimenpideohjelmassa ei aseteta tarkkoja numeerisia tavoitteita virtaamille tai vesivoimamennetyksille.

Oulujoen-lijoen toimenpideohjelmassa kiinnitetään edelleen huomiota vaelluskalojen liikkumiseen ja esitetään toimenpiteitä tämän edistämiseksi. Kalankulkua helpottavia toimenpiteitä ovat toimenpideohjelman mukaan esimerkiksi luonnonmukaiset ohi-tusuomat, kalatiet ja muut rakenteet, vaellusesteiden poistot ja olemassa olevien kalateiden toimivuuden parantaminen. Toimenpiteet voivat sisältää niin kalojen ylös- kuin alasvaellusratkaisuja (Laine ym. 2022).

Myös Kemijoen toimenpidesuunnitelmassa esitetään säännöstelykäytäntöjen sekä ympäristö- ja ekologisten virtaamien arviointimenetelmien kehittämistä ja soveltamista alueella. Kemijoen toimenpideohjelmassa korostetaan, että toimenpiteitä ja virtaamia on kuvattu vain yleisellä tasolla vesimuodostumien luokittelua varten. Toimenpideohjelmassa esitetään tarkempien selvitysten tekemistä ympäristövirtaamista, hankkeita ympäristövirtaamien palauttamiseksi kuiviin tai vähävetisiin uomiin sekä kalankulkua edistävien ohitusratkaisujen toteuttamista neljän voimalaitoksen yhteyteen. Siinä tuodaan myös esille merkittävän haitan arvioinnin tärkeys KeVoMu-vesimuodostumiin liittyen. Toimenpideohjelmassa viitataan kansallisen ohjeistuksen tapaan kalankulkuväylien toteuttamiseen maltillisesti siten, että niiden vaatima vesimäärä olisi noin 2–3 % joen keskivirtaamasta vuosikeskiarvona laskettuna (Räinä ym. 2022).

## 8.2.6 Merkittävien haitallisten vaikutusten skaala

### 8.2.6.1 Tulkintavaihtoehdot

Merkittävien haitallisten vaikutusten tulkinta on keskeinen kysymys voimakkaasti muutettujen vesimuodostumien nimeämisessä ja hyvän ekologisen potentiaalin määrittelyssä. Merkittävät haitalliset vaikutukset määrittävät sen rajan, johon asti VPD 4(3) artiklassa tarkoitettuihin tärkeisiin kestävä kehityksen mukaisiin ihmistoimiin voidaan puuttua vesienhoidon ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi. Maksimaalisen ekologisen potentiaalin määrittelyssä ei voida ottaa huomioon sellaisia ekologisia parannuksia, jotka saavutettaisiin merkittäviä haitallisia vaikutuksia aiheuttavien toimenpiteiden avulla.

VPD 4(3) ja VMJL 22 §:n sanamuodot ovat epäselviä merkittävän haitan määrittämisen kannalta. Lainkohdissa viitataan selvästi toimintojen tuottamiin yhteiskunnallisiin etuihin, kuten voiman tuotantoon. Niissä ei kuitenkaan ilmaista, miten merkittävä vaikutus yksittäisellä vesimuodostumalla tai vesivoimalaitoksella on oltava näiden etujen kannalta.

Vesivoiman yhteydessä oikeudellinen tulkinnanvaraisuus liittyy siihen, mikä on merkittävän haitan määrittämisen skaala: valtakunnallinen, alueellinen, paikallinen vai yksittäisen vesivoimalaitoksen skaala.

Merkittävän haitan suppean tulkinnan perusteella haitan mittapuuna tulee olla laajojen yhteiskunnallisten hyötyjen vaarantuminen. Näihin lukeutuvat sähköjärjestelmän toimintaan liittyvät tekijät, kuten vesivoiman rooli välttämättömässä sähköntuotannossa, energian varastoinnissa ja sähköjärjestelmän tasapainottamisessa säätövoiman avulla. Viime kädessä jää tulkinnanvaraiseksi, millaisista yksittäisiin laitoksiin kohdistettavista ympäristötoimenpiteistä aiheutuu merkittävää haittaa esimerkiksi sähköjärjestelmän tasapainottamiselle.

Merkittävän haitan laajan tulkinnan mukaan merkittäviä haitallisia vaikutuksia on puolestaan arvioitava kunkin yksittäisen vesivoimalaitoksen tasolla suhteessa tuotantotappioihin ja muihin taloudellisiin menetyksiin. Tällöin toimenpiteiden toteuttamista verrattaisiin kullekin yksittäiselle laitokselle niistä aiheutuviin haittoihin.

Esitämme seuraavassa, että vesiputedirektiivin järjestelmässä tuetaan merkittävän haitan suppeaa, sähköjärjestelmätason tulkintaa. Seuraavaksi pureudutaan tarkemmin tätä tulkintavaihtoehtoa tukeviin oikeudellisiin perusteisiin.

### 8.2.6.2 Sähköjärjestelmätason skaalaa puoltavat perusteet

Vesiputedirektiivin toimeenpanostrategian ohjeistuksessa VPD 4(3) artiklan mukaisen merkittävän haitan tulkitaan tarkoittavan sitä, että vain vedenkäytön yhteiskunnalliset tarpeet ja hyödyt otetaan sen arvioinnissa huomioon. Huomiota ei tule kiinnittää yksityisiin etuihin, laitoksen taloudelliseen tilanteeseen tai vedenkäytöstä saatavien tulojen pienemiseen (komissio 2020). Toimeenpanostrategia ei ole oikeudellisesti sitova, mutta se edustaa Euroopan komission ja jäsenvaltioiden yhteistä kantaa asiaan.

VPD 4(3) artiklassa ja vesiputedirektiivissä kokonaisuutena on kaksi järjestelmätason piirrettä, jotka tukevat toimeenpanostrategian linjauksia merkittävän haitan liittämistä laajamittaisiin yleisiin etuihin:

1. VPD 4(3) artiklan esimerkkiluettelossa tarkoitetut kestävä kehityksen mukaiset toiminnot viittaavat siihen, että vesimuodostuman voimakkaasti muutetuksi nimeämisen perusteena voivat toimia vain yksityisiä etuja laajemmat yhteiskunnalliset edut. Lisäksi vesimuodostuman voimakkaasti muutetuksi nimeämisen on perustuttava siihen, että kyseistä etua ei voida saavuttaa ympäristöllisesti paremmilla keinoilla, mikä myös viittaa yleisten etujen arviointiin.

2. Vesipuidedirektiivin järjestelmässä yksittäisen toimijan oikeudellinen asema ja tälle aiheutuvat tappiot voidaan ottaa erikseen huomioon, jos ympäristötavoitteista poiketaan. Yhtenä perusteena pidentää ympäristötavoitteiden saavuttamisen määräaikoja on VPD 4(4) artiklan nojalla se, että vesimuodostuman tilan parantaminen on suhteettoman kallista. VPD 4(5) artiklan perusteella voi puolestaan olla mahdollista asettaa vesimuodostumille vähemmän vaativia ympäristötavoitteita, jos vaativampien tavoitteiden saavuttaminen on suhteettoman kallista.

Näin ollen vesipuidedirektiivin sisällön ja toimeenpanostrategian valossa säätövoiman tuotannolle vesienhoidon ympäristötoimenpiteiden takia aiheutuvaa haittaa on arvioitava yhteiskunnallisten etujen ja siten sähköjärjestelmätason skaalan näkökulmasta. Merkittävän haitan arviointi ei tämän tulkinnan mukaan ulotu yksittäisille laitoksille ympäristötoimenpiteistä ja säätövoiman tuotannon rajoittamisesta aiheutuviin taloudellisiin menetyksiin. Samalla on kuitenkin otettava huomioon, että sähköjärjestelmän säätöön osallistuu suuri joukko yksittäisiä laitoksia, jotka palvelevat tätä yhteiskunnallista etua ja joita on kohdeltava riittävän yhdenvertaisella tavalla.

Merkittävän haitan arvioinnin skaalakysymykseen ei voida antaa tyhjentävää oikeudellista vastausta niin kauan kuin EU tuomioistuin ei ole ottanut asiaan kantaa. Tuomioistuin on se toimielin, jonka tehtävänä on vahvistaa EU-oikeuden tulkinta. Skaalakysymykseen annettava vastaus ei myöskään kerro suoraan sitä, kuinka merkittävä yksittäisen laitoksen roolin on oltava säätövoimaan liittyvien yhteiskunnallisten etujen tuottamisessa tai kuinka laitoksille aiheutuvien haittojen tulisi jakaantua riittävän yhdenvertaisesti, kun merkittävän haitan aiheutumista arvioidaan.

## 8.2.7 Merkittävän haitan suhde ympäristövastuuseen

Ympäristövastuudirektiivi (YVD 2004/35/EY) on poikkileikkaava, EU:n muuta ympäristösääntelyä täydentävä säädös. Direktiivissä säädetään aiheuttamisperiaatteeseen perustuvasta ympäristövastuujärjestelmästä ympäristövahinkojen ehkäisemiseksi ja korjaamiseksi (YVD 1 art.).

Ympäristövastuudirektiivissä asetetaan toiminnanharjoittajalle vastuu sellaisista ympäristövahingoista, jotka ovat aiheutuneet liitteessä III lueteltujen ammatillisten toimintojen harjoittamisesta (YVD 3(1) art.). Liitteen III toimintoihin kuuluu patoaminen, joka edellyttää vesipuidedirektiivin perusteella ennalta haettavaa lupaa.

Vesiympäristölle aiheutuvana ympäristövahinkona pidetään ympäristövastuudirektiivin järjestelmässä sellaista vahinkoa, joka vaikuttaa huomattavan haitallisesti vesien ekologiseen, kemialliseen tai määrälliseen tilaan tai ekologiseen potentiaaliin (YVD 2(1) art.).

Haitallisen vaikutuksen huomattavuutta arvioidaan suhteessa perustilaan, joka olisi valinnut ilman ympäristövahingon aiheutumista (YVD 2(14) art.).

Ympäristövastuudirektiiviä sovelletaan kaikkiin direktiivin voimaantulon (30.4.2004) jälkeen aiheutuneisiin ympäristövahinkoihin riippumatta siitä, milloin vahinkoa aiheuttanut toiminta on aloitettu (YVD 17 art.). Tämä kattaa myös toiminnot, joita harjoitetaan lainsäädännön perusteella myönnetyn luvan nojalla, kuten unionin tuomioistuin linjasi Folk-tapauksessa C-529/15. Tapauksessa oli kyse itävaltalaisen vesivoimalaitoksen harjoittamasta lyhytaikaissäännöstelystä, josta aiheutuvat haitalliset vaikutukset olivat jatkuvia.

Ympäristövastuun kannalta keskeinen kysymys on, miten ympäristövastuudirektiivissä tarkoitetun vahingon merkittävyyttä tulkitaan suhteessa vesiputedirektiivin mukaisen vesimuodostuman tilaluokan heikkenemiseen. Ympäristövastuudirektiivissä vahingon merkittävyyden määritelmä pohjautuu vesiputedirektiivin ympäristötavoitteisiin, jolloin esimerkiksi hyvän ekologisen potentiaalin saavuttamisella on keskeinen merkitys tähän tulkintaan. Ympäristövastuudirektiivissä ei kuitenkaan aseteta tarkkaa kynnyсарvoa vesille aiheutuvan vahingon merkittävyydelle. Vahingon käsite voi myös kattaa ympäristönäkökohtia vesiputedirektiivin ympäristötavoitteita laajemmin (Josefsson 2018, Pihalehto & Puharinen 2023).

Edellä esitetyn perusteella lyhytaikaissäännöstely lukeutuu ympäristövastuudirektiivissä tarkoitettuihin toimintoihin. Se voi johtaa ympäristövastuuseen, vaikka toiminnolle olisi lupa olemassa. Luvan ajantasaisuus ja tarkkarajaisuus voi kuitenkin vähentää näitä vastuista. Jos toiminnan vaikutusalueen vesimuodostuman ekologinen potentiaali on hyvä, ei ympäristövastuu pääsäännön mukaan voi realisoitua, mutta jotkin vesivoimasta aiheutuvat ympäristömuutokset voivat lukeutua ympäristövastuudirektiivissä tarkoitettujen ympäristövahinkojen piiriin vesiputedirektiivissä huomioon otettavia tekijöitä laajemmin (Pihalehto & Puharinen 2023).

## 8.3 Merkittävä haitta vertailumaissa

### 8.3.1 Ruotsi

#### 8.3.1.1 Tausta

Ruotsin vesivoimasektori on Suomea merkittävästi suurempi. Ruotsissa on 1800–2000 vesivoimalaitosta (Havs- och Vattenmyndigheten 2019) ja vesivoiman osuus vuosittaisesta sähköntuotannosta on 40–45 % (Energimyndigheten 2022). Vesivoiman oikeudellinen sääntely on Ruotsissa ollut samankaltaista Suomeen verrattuna, mutta Ruotsin

ympäristökaaren (Miljöbalk 1998:808) vesivoimasääntelyä uudistettiin vuonna 2019 voimaan tulleilla lakimuutoksilla. Uudistuksen tavoitteena on päivittää kaikki vesivoimaluvat modernien ympäristövaatimusten mukaisiksi (Puharinen ym. 2024).

Ruotsissa vesivoimaluvat ovat tavallisesti pysyviä ja vanhat luvat säilyvät voimassa lainsäädännön uudistuksista huolimatta. Ennen vuoden 2019 uudistusta lainsäädännössä asetettiin tiukat edellytykset vesivoimaluvan muuttamiselle toiminnanharjoittajan tahdon vastaisesti. Lupamääräysten tarkistaminen ei saanut johtaa toiminnanharjoittajalle merkittäviin taloudellisiin menetyksiin ja luvan tarkistamista hakeneilla oli korvausvelvollisuus aiheutuneista haitoista (Miljöbalk vanha 25 luku; Lindström & Ruud 2017, Söderasp & Pettersson 2019).

Vesienhoidon ympäristötavoitteet eivät olleet ennen uudistusta oikeudellisesti sitovia uusien hankkeiden lupaharkinnassa tai vanhojen lupien tarkistamisprosesseissa (Kymenvaara et al. 2019). Valtaosa Ruotsin vesivoimatoiminnoista on luvitettu ennen ympäristökaaren ja vesipuidedirektiivin voimaantuloa (Statens Offentliga Utredningar 2013:69).

Ruotsin vuoden 2019 lakimuutosten taustalla oli komission rikkomusmenettely Ruotsia vastaan vesipuidedirektiivin täytäntöönpanosta. Komissio kiinnitti erityisesti huomiota siihen, että Ruotsin lainsäädäntö ei mahdollistanut vesivoimalupien uudelleentarkastelua ja tarkistamista vesienhoidon ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi. Ruotsin tuli varmistaa, että vesipuidedirektiivissä tarkoitetut vesimuodostuman tilan heikentämisen kieltö ja tilatavoitteiden saavuttamisen tavoite ulotetaan myös vanhoihin lupiin (komissio 2018c).

### 8.3.1.2 Vuoden 2019 sääntelyuudistus

Vuonna 2019 Ruotsin ympäristökaareen sisällytettiin säännös, jonka mukaan vesivoimaluvan haltijoilla on velvollisuus varmistaa, että toiminnassa noudatetaan 'nykyaikaisia ympäristömääräyksiä' (moderna miljövilkor) eli lupamääräyksiä, jotka ovat enintään 40 vuotta vanhoja (Miljöbalk luku 11, 27(1)). Jos näin ei ole, luvanhaltijan tulee hakea luvan tarkistamista lupaviranomaiselta. Kunkin laitoksen luvan tarkistamishakemuksen ajankohta määräytyy kansallisen vesivoimalupien tarkistamissuunnitelman (nationell plan för omprövning av vattenkraft) mukaisesti (Regeringsbeslut 2020).

Uudistetun sääntelyn perusteella vesienhoidon ympäristötavoitteet ovat sitovia luvan tarkistamisprosessissa. Toiminnalle on asetettavat riittävät lupamääräykset, joilla varmistetaan, ettei siitä aiheudu vesimuodostuman tilan heikkenemistä tai ettei toiminta vaaranna hyvän tilan tai hyvän ekologisen potentiaalin saavuttamista vesimuodostumassa (Miljöbalk luku 5, 4(2)). Lupamääräysten tarkistamisen aikaisempi rajoite siitä, että toi-

minnanharjoittajalle ei saa aiheutua merkittäviä taloudellisia haittoja, ei ulotu enää tilanteisiin, joissa tarkistaminen tapahtuu vesienhoidon ympäristötavoitteiden perusteella (Miljöbalk luku 24, 10(2)). KeVoMu-asioista säädetään kuitenkin erikseen.

### 8.3.1.3 Energiapoliittiset linjaukset

Ruotsissa vuoden 2019 lainsäädäntömuutokset tehtiin samanaikaisesti energiapoliittisten strategisten uudistusten kanssa. Niiden taustalla on Ruotsin eduskuntapuolueiden vuonna 2016 solmima energiapoliittinen yhteiskuntasopimus, jossa raamitettiin siirtymää kohti uusiutuvaan energiaan pohjautuvaa energiajärjestelmää. Tässä yhteydessä määritettiin vesivoimasektorin merkitystä ja roolia sähköjärjestelmän kannalta (Regeringens proposition 2017/18:228).

Osana energiapolitiikan uudistusta Ruotsissa on pyritty määrittämään KeVoMu-nimeämisen perusteita, merkittävän haitan kriteerejä ja vesipuidedirektiivin poikkeusten soveltamista. Näiden kysymysten ratkaiseminen osana laajempaa energiapoliittista selontekoa voi tarjota mahdollisuuden arvioida KeVoMu-nimeämisen ja hyvän ekologisen potentiaalin saavuttamisen perusteita yleisen edun kannalta. On kuitenkin epäselvää, mahdollistaako Ruotsin järjestelmä nimeämisten ja tavoitteiden päivittämisen vesienhoidon suunnitelmakausien välillä ja miten sopeutuva tämä malli on suhteessa muuttuviin olosuhteisiin, teknologiseen kehitykseen ja sähköjärjestelmän muutoksiin (Puharinen ym. 2024).

Vuonna 2014 Ruotsin energiahuoltovirasto (SEA) sekä meri- ja vesivirasto (HaV) julkaisivat kansallisen vesivoimastrategian. Siinä määritetään KeVoMu-nimeämisissä ja hyvän ekologisen potentiaalin määrittelyssä sovellettava merkittävä haitallinen vaikutus suhteessa kansallisen energiajärjestelmän kokonaisvaikutuksiin (SEA & HaV 2014). Ruotsissa noudatetaan näin ollen vesipuidedirektiivin toimeenpanostrategian (CIS) ohjeistusta siitä, että merkittävä haitta tulee määritellä suhteessa vesivoiman tuottamaan yhteiskunnalliseen hyötyyn.

Kansallisessa vesivoimastrategiassa ehdotetaan kansallisia kynnysarvoja merkittävälle haitalliselle vaikutukselle vesivoimaan. Tällaiseksi vaikutukseksi olisi katsottava yli 1,5 terawattitunnin (2,3 %) vuotuinen vähenemä sähköntuotantoon tai vesivoiman säätövoimakyvyn väheneminen vesienhoidon toimenpiteiden seurauksena. Strategiassa arvioidaan myös eri vesienhoitoalueiden energiataloudellista ja vesiensuojelullista painopisteitä (SEA & HaV 2014).

Ruotsin meri- ja vesivirasto ohjeistaa vuoden 2016 vesienhoidon kansallisessa tulkintaoppaassa vesienhoitoviranomaisia noudattamaan kansallisia kynnyksiä merkittävälle haitalliselle vaikutukselle, kun ne määrittävät hyvän ekologisen potentiaalin tavoitteita

yksittäisille voimakkaasti muutetuille vesimuodostumille. Jos tätä kautta ei pystytä varmistamaan kansallisten kynnyсарвоjen noudattamista, on vesimuodostumille syytä viraston mukaan asettaa VPD 4(5) artiklassa tarkoitettuja vähemmän vaativia ympäristötavoitteita (HaV 2016).

Vuonna 2016 energiahuoltovirasto, meri- ja vesivirasto sekä Svenska Kraftnät (Ruotsin sähköverkon operaattori) julkaisivat raportin, jossa esiteltiin suhteellisen sääntelypanoksen (relativ regelbidrag) käsite. Sillä pyritään kuvaamaan kunkin vesivoimalaitoksen panosta kansallisen sähköjärjestelmän säätökapasiteettiin. Tätä lukua on tarkoitus käyttää yksittäisten voimakkaasti muutettujen vesimuodostumien nimeämisessä ja merkittävästi haitallisten vaikutusten määrittelyssä (SEA ym. 2016).

Vesivoimalaitokset luokitellaan raportissa suhteellisen sääntelypanoksen perusteella kolmeen luokkaan: (1) voimalaitokset, joilla on suurin arvo sähköjärjestelmälle (muodostavat 95 % alan tuotetusta energiasta ja 98 % säätökapasiteetista (255 laitosta)), (2) voimalaitokset, joissa tarvitaan tapauskohtaista arviointia (78 laitosta) ja (3) laitokset, joilla on vähiten arvoa energijärjestelmälle ja jotka eivät osallistu sähköverkon säätelyyn (noin 1 700 laitosta). Raportissa linjataan, että ryhmään 1 kuuluvien tärkeimpien laitosten kohdalla on syytä hyödyntää maksimaalisesti vesipuitedirektiivin joustomekanismeja (KeVoMu-nimeäminen, hyvän ekologisen potentiaalin määrittely, poikkeukset), kun taas 3 luokan laitosten toiminnalle vesienhoidon ympäristötavoitteista voi aiheutua luvantarkistusten kautta merkittäviä seurauksia (SEA ym. 2016).

#### 8.3.1.4 Energiapolitiikan oikeudelliset kytkennät

Ruotsin energiapolitiittiset strategiat ja suunnitelmat eivät ole oikeudellisesti sitovia. Vuoden 2019 lakimuutoksiin sisältyy kuitenkin mekanismeja, joiden kautta pyritään varmistamaan strategioiden ja suunnitelmien välittyminen vesienhoitosuunnitelmiin, ympäristötavoitteisiin ja vesivoimalupien tarkistamiseen.

Ruotsin lainsäädännössä säädetään ensinnäkin voimakkaasti muutetuksi nimeämisestä ja vesienhoidon poikkeusten soveltamisesta velvoittavalla tavalla. Viranomaisten on sovellettava näitä mahdollisuuksia vesienhoidossa, kun edellytykset täyttyvät (Regeringens proposition 2017/18:243).

Toiseksi lainsäädäntöön sisältyy mekanismi, joka mahdollistaa ympäristölaatumien (EQS) kyseenalaistamisen ja tarkistamisen luvanmuutosprosessin yhteydessä. Jos toiminnanharjoittaja toimittaa vesienhoidon luokittelusta poikkeavaa tietoa vesimuodostuman tilasta, lupaviranomaisen on hankittava lausunto asiaankuuluvalta vesienhoitoviranomaiselta. Vesienhoitoviranomaisen tulee tarvittaessa tarkistaa vesienhoidon tavoitetta osoittavaan ympäristölaatumia. Jos vesienhoitoviranomainen ei tätä muutosta

tee, sen on siirrettävä asia Ruotsin hallitukselle, jolla on valtuus normin muuttamiseen (Miljöbalk luku 22, 13(1), Puharinen ym. 2024).

### 8.3.1.5 Vesivoimalupien tarkistamisen pysäyttäminen

Tällä hetkellä Ruotsin hallitus on pysäyttänyt vesivoimalupien tarkistuksen ja antanut ohjeet energia- ja vesihuoltohallinnolle suorittaa lisäanalyysjä sen vaikutuksista sähköjärjestelmään. Luvantarkistusten alkamispäivämäärä on yhä auki. Hallitus aikoo myös arvioida, tulisiko aikaisempia energiapolitiikan linjauksia tarkistaa (Tidningen energi 2023).

## 8.3.2 Saksa

### 8.3.2.1 Tausta

Saksassa toimii noin 8300 vesivoimalaitosta. Näistä suurin osa on pieniä korkeintaan yhden megawatin laitoksia, joiden osuus sähköntuotannosta on hyvin vähäinen. Suurin osa vesivoimalla tuotetusta sähköstä ja säätökapasiteetista tuotetaan suurten laitosten ja pumppuvoimalaitosten avulla. Saksan laitoksista noin 2,5 % on pumppuvoimalaitoksia. Vesivoimalaitoksista noin 7300 on kytketty yleiseen jakeluverkkoon ja nämä kattavat 2,9–3,8 % vuotuisesta bruttosähkönkulutuksesta. Vesivoiman osuus uusiutuvien energialähteiden sähköntuotannossa on laskenut vuosien varrella ja on tällä hetkellä noin 8 % (Umwelt Bundestam 2023).

Saksassa vesienkäytön sääntely jakautuu liittovaltiotason ja osavaltiotason sääntelyyn. Keskeinen säädös on liittovaltion vesitalouslaki (Wasserhaushaltsgesetz, WHG, 1957, uudistettu 2009), joka on osavaltioille suunnattu puitelaki. Kullakin osavaltiolla on oma vesilakinsa (Wassergesetz), joka tarkentaa vesienkäytön sääntelyä.

Vesipuidedirektiivi on pantu liittovaltion tasolla täytäntöön WHG:llä. Laki noudattaa pitkälti vesipuidedirektiivin sanamuotoja. Lisäksi vesienhoidon sääntelyä pintavesistä tarkennetaan niin sanotulla pintavesiasetuksella (Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer, Oberflächengewässerverordnung 20.6.2016, OGEWV). WHG:ssa edellytetään osavaltioiden antavan tarkentavaa lainsäädäntöä vesipuidedirektiivin täytäntöön panemiseksi. Vesimuodostumakohtaisten ympäristötavoitteiden asettaminen tapahtuu osavaltiotasolla.

Vesienhoidon ympäristötavoitteet ovat Saksassa sitovia. WHG 27 §:n mukaan pintavesiä on käytettävä siten, että niiden ekologisen tai kemiallisen tilan heikentyminen välletään ja että niiden hyvä ekologinen tila tai potentiaali saavutetaan ja säilytetään. Li-

säksi vesitaloushankkeiden lupamenettelyssä tulevat noudatettavaksi yleiset vesitaloudelliset rajoitusperiaatteet, joihin kuuluvat pintavesien pilaamiskielto, vähimmäisvirtaaman turvaaminen ja sulkemisrajoitukset (avonaisuus eli läpäisevyys) (ks. Belinskij ym. 2019).

Vesivoimaluvat eivät ole Saksassa ikuisia. Lupa vesirakentamiseen annetaan määräajaksi, joka vain erityisestä syystä voi ylittää 30 vuotta. Lupa tulee tämän jälkeen uudelleenarvioitavaksi, minkä yhteydessä noudatetaan myös WHG:ssa tarkoitettuja vesienhoidon ympäristötavoitteita (Belinskij ym. 2019).

### 8.3.2.2 Kansallinen ohjeistus merkittävän haitan arvioinnista

Saksassa on annettu liittovaltiotason ohjeistusta vesienhoidon toimeenpanoa varten. Tässä ohjeistuksessa määritetään myös KeVoMu-nimeämisen ja merkittävän haitan määrittämisen puitteet. Ohjeistuksen mukaan haitan merkittävyys määritetään funktionaalilla tavalla siten, että haitta suhteutetaan pintavesimuodostuman käytöstä (vesivoiman tuotanto) saataviin hyötyihin (LAWA 2015).

Vesivoiman tuotannolle aiheutuvaa haittaa ei ohjeistuksen perusteella pidetä merkittävänä, jos toimenpiteet vesimuodostuman ekologisen tilan parantamiseksi eivät heikennä energiantuotantoa yli luonnollisen vaihtelutason. Toimia, jotka saattavat aiheuttaa merkittäviä haitallisia vaikutuksia vesivoimalle, voivat olla esimerkiksi tulvanhallintatoimenpiteet tai vesistöjen uudelleen reititys (LAWA 2015). Tarkkaa tietoa merkittävästä haitasta ei ole juuri dokumentoitu vesienhoitosuunnitelmiin (komissio 2019a).

Kansallisessa ohjeistuksessa otetaan kantaa myös vesivoimatoimintojen hyötyjen tuottamiseen ympäristöllisesti paremmilla keinoilla. Tällaisia keinoja voivat olla esimerkiksi vesivoimalaitoksesta saadun energian korvaaminen muun uusiutuvan energian tuotannolla tai sähkötuotannon siirtäminen toiseen vesivoimalaitokseen (LAWA 2015).

Ohjeistuksessa todetaan, että vesivoima on tärkeä osa energiasiirtymää ja tälle tulisi antaa painoarvoa merkittävän haitan ja vaihtoehtojen arvioinnissa. Vesivoiman huomattavaksi hyödyksi todetaan säätövoimakapasiteetti ja sen keskeinen rooli osana energiahuoltovarmuutta. Arvioinnissa tulisi punnita keskenään myös vesivoiman ympäristövaikutusten ja ilmastotavoitteita (LAWA 2015).

Siten Saksassa on ohjeistuksessa annettu yleiset suuntaviivat KeVoMu-nimeämisen käyttämiselle ja merkittävän haitan arvioinnille vesivoiman yhteydessä. Tarkempi intressien punninta ja vesivoiman yhteiskunnallisen merkittävyyden arviointi on kuitenkin jätetty vesienhoitoviranomaisten toteutettavaksi vesienhoitoalueiden ja vesimuodostumien tasolla.

## 8.3.3 Itävalta

### 8.3.3.1 Tausta

Vesivoimalla on merkittävä osa Itävallan energiantuotannossa. Vuonna 2022 Itävallan sähköntuotannosta 81 % koostui uusiutuvista energialähteistä, pääosin vesivoimasta. Mittauskaudella 2005–2022 vesivoima kattoi sähköntuotannosta 54–67 % osuuden tuotanto-olosuhteista riippuen. Vuoden 2022 lopussa Itävallassa oli 3 151 vesivoimalaitosta, joiden asennettu kokonaiskapasiteetti oli noin 14,9 GW. Näistä 3 035 oli jokivoimalaitoksia ja 116 säättövoimalaitoksia. Suuret laitokset ovat hyvin isoja, mitä kuvaa se, että 95 % vesivoimalaitoksista on alle 10 MW:n laitoksia, joiden osuus on alle 10 % vesivoimakapasiteetista ja noin 14 % vuosituotannosta (komissio 2022; Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie 2023).

Itävallassa katsotaan, että säättövoimatuotantoon osallistuvat vesivoimalaitokset ovat erittäin tärkeitä kansallisen energiahuoltovarmuuden ja energijärjestelmän vakauden kannalta. Säättövoimalaitokset tukevat myös laajemmin Euroopan sähkömarkkinoiden vakautta (Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus 2021).

### 8.3.3.2 Kansallinen ohjeistus

Komissio totesi vuoden 2019 palautteessaan Itävallan vesienhoitosuunnitelmista, että niissä ei ole käytetty tarkkoja kynnysarvoja merkittävien haitallisten vaikutusten määrittelyyn. Itävalta oli määritellyt vesivoimasta saataviksi hyödyiksi sähköntuotannon (perusvoima), joustavan sähköntuotannon (käyttöreservituotanto ja tehoreservituotanto) sekä alueellisen ja kansallisen energiahuoltovarmuuden ja -jakeluverkoston toiminnan turvallisuuden (komissio 2019b; Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus 2020a).

Itävallassa merkittävien haitallisten vaikutusten arviointi tehdään suhteessa pintavesimuodostuman käytöstä saataviin hyötyihin. Perusvoiman tuotannon merkittävien haitallisten vaikutusten arvioinnin kriteerinä on kansallisen vuotuisen sähköntuotannon prosenttiosuus, jota ei kuitenkaan ole yksilöity. Joustavan sähköntuotannon suhteen arvioitavia haitallisia vaikutuksia ovat tehoreservituotannon heikkeneminen ja heikennykset käyttöreservituotannon ja säättövoiman tarjontaan. Arviointikriteereinä ovat kansallisen vuotuisen tehoreservin sähköntuotannon prosenttiosuus ja paikallisen/kansallisen säättövoimatuotannon prosenttiosuus, joita ei kuitenkaan myöskään yksilöidä. Säättövoiman merkitys on merkittävän haitan arvioissa suurempi kuin perusvoiman (Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus 2020a).

Alueellisen ja kansallisen energian huoltovarmuuden sekä jakeluverkoston toiminnan turvallisuutta arvioitaessa otetaan Itävallassa huomioon turvallisuuden mahdollinen väheneminen vesienhoidon toimenpiteiden takia. Pelkkä riskin aiheutuminen näille tavoitteille nähdään merkittävänä haittana pintavesimuodostuman käytölle. Merkittävä haitallinen vaikutus voi johtua myös vesivoimasta saatavan vähäpäästöisen energian menetyksestä lieventämistoimenpiteiden seurauksena. Tässä suhteessa merkittävien haitallisten vaikutusten olemassaolon arviointi tehdään vertailulla kansallisiin ilmastotavoitteisiin ja CO<sub>2</sub>-päästöjen vähentämistavoitteisiin (Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus 2020a).

Merkittävän haitan skaalan arvioinnista taustadokumentissa on todettu muun muassa, että toimenpiteiden käytön vaikutusten ja niiden merkityksen arviointi tehdään yleensä alueellisella tai kansallisella tasolla. Merkittävä haitallinen vaikutus paikallisella tasolla ei välttämättä ole sitä alueellisesti tai kansallisesti. Merkittävän haitan yhteydessä on siten tärkeää määritellä, millä tasolla vesimuodostuman käytöllä on merkitystä (Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus 2020b). Ohjeistus siten seuraa tältä osin EU:n yhteisen toimeenpanostrategian ohjeistusta

## 8.3.4 Ranska

### 8.3.4.1 Tausta

Ranskassa on noin 25,7 gigawattia (GW) vesivoimakapasiteettia, mikä tekee siitä yhden Euroopan suurimmista vesivoiman tuottajista. Tämä kapasiteetti vastaa noin 20 % maan sähkökapasiteetista. Vuosittainen vesivoiman tuotanto vaihtelee voimakkaasti hydrologisten olosuhteiden mukaan riippuen ajankohdasta. Vuosittainen tuotantoteho on noin 67 terawattituntia (Ministere de la transition écologique et de la cohésion des territoires 2024).

Ranskassa on yli 2 000 vesivoimalaitosta. Näistä vesivoimalaitoksista pieniä (alle 1 MW tuotanto) on noin 67 %. Nämä pienet vesivoimalat muodostavat kokonaistehosta vain noin 2 %. Noin 11 % vesivoimaloista on yli 10 MW:n suuruisia. Nämä suuret vesivoimalat tuottavat noin 91 % vesivoiman tuotantotehosta (Ministre de la transition écologique 2021).

### 8.3.4.2 Kansallinen ohjeistus

Lieventämistoimenpiteiden aiheuttamaa merkittävää haittaa on käsitelty yleisellä tasolla Ranskan kansallisessa ohjeistuksessa. Ohjeistuksen perusteella on kuitenkin mahdollista hahmottaa, miten Ranskassa lähestytään merkittävän haitan käsitettä vesivoiman suhteen (komissio 2019c).

Sen määrittämiseksi, onko lieventämistoimenpiteillä merkittävä haitallinen vaikutus vesivoimatuotantoon, käytetään Ranskassa taulukkoa, jossa punnitaan vesistön käyttötapojen, muutosten, paineiden ja lieventämistoimenpiteiden suhteita. Taulukon avulla on mahdollista tunnistaa yleisellä tasolla, onko lieventämistoimenpiteellä mahdollisesti merkittävä haitallinen vaikutus vesistön käyttöön (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires 2023).

Taulukossa on mainittu säätövoiman ja vesivoiman tuotantoon liittyviksi merkittävästi haitallisiksi lieventämistoimenpiteiksi muun muassa seuraavat:

1. Turbiinien kohdennettu sulkeminen vaeltavasta kalalajista riippuen (toimi vaelluska-  
lojen elinolojen kohentamiseksi)
2. Sedimenttien siirtäminen padon yläjuoksusta alajuoksuun (ruoppaamalla tai avaa-  
malla pohjaventtiilejä)
3. Varastoaltaan vedenpinnan hallinta (esim. sisään virtauksen lisääminen)
4. Veden juoksutuksen vähentäminen turbiinien läpi (toimi, jolla pyritään vähentä-  
mään ranta-alueiden kulumista)
5. Virtaustehon vaihtelu (toimi, jolla pyritään vähentämään esimerkiksi ympäröivän  
luonnon eroosiota)
6. Luonnollisten virtausvaihteluiden palauttaminen (toimi, jolla pyritään lieventämään  
erinäisiä kielteisiä vaikutuksia eliöstöön ja niiden elinympäristöön).

Toimenpiteestä aiheutuvaa haittaa voidaan pitää merkittävänä, jos se vaarantaa käytön pitkän aikavälin kannattavuuden. Olennaista merkittävän haitan tunnistamisessa on tehdä arviointi oikeassa mittakaavassa (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable 2006).

Tämä merkittävän haitan arvioinnin mittakaava voi ulottua yksittäisestä vesimuodostumasta vesipiiriin. Tavallisesti arviointi aloitetaan yksittäisen vesimuodostuman mittakaavasta. Voimakkaasti muutetun pintavesimuodostuman nimeämisen mittakaava voi tarkoittaa useampaa vierekkäistä pintavesimuodostumaa, jos tähän liittyvät käyttötarkoitukset ja intressit ulottuvat niihin. Arviointi voidaan suorittaa vesipiirin mittakaavassa, jos taloudellinen kannattavuus edellyttää eri vedenkäyttömuotojen yhteensovittamista (esimerkiksi merenkulku ja vesivoiman tuotanto) (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable 2006).

## 8.4 Suomen lupajärjestelmä

### 8.4.1 Vesiluvan tarve ja lupamääräykset

Viime kädessä vesienhoidon ympäristötavoitteiden ja vesivoimaloiden säätövoimakäytön yhteensovittaminen tapahtuu kansallisen lupajärjestelmän puitteissa. Siten seuraavassa on syytä tarkastella vielä sitä, miten Suomen lupajärjestelmä mahdollistaa vesivoimalupien ja erityisesti lyhytaikaisäännöstelyyn oikeuttavien lupien muuttamisen ympäristöperusteilla. Käytännössä yhteensovittaminen voi tarkoittaa paitsi itse vesilupien säännöstelymääräysten myös kalatalousmääräysten tarkistamista.

Vesivoimalaitoksen rakentaminen ja käyttö edellyttävät vesilain (587/2011) tai aikaisemman lainsäädännön mukaista lupaa (VL 3:3 ja 19:4). Lupapäätöksessä annetaan määräykset muun muassa veden enimmäis- tai vähimmäiskorkeudesta ja veden juoksutuksen järjestämisestä (VL 3:10) sekä tarvittaessa kalatalousmääräykset kalatalousveloitteesta ja kalatalousmaksusta (VL 3:14). VL 3:8:stä ilmenevän pääsäännön mukaan vesivoimaluvat ovat voimassa toistaiseksi.

Vesilaissa säädetään erikseen säännöstelystä, jolla tarkoitetaan muuta kuin vähäistä veden virtaaman ja korkeuden jatkuvaa säätelyä (VL 7:1). Säännöstelyyn tarvitaan lupa, jossa tulee määrätä veden juoksuttamisesta (VL 7:2). Vesilaissa ei säädetä selväpiirteisesti lyhytaikaisäännöstelystä.

Korkein hallinto-oikeus totesi Uljuan tapauksessa KHO 2005:7, että lyhytaikaisäännöstely edellyttää sitä nimenomaisesti koskevaa vesilain mukaista säännöstelylupaa. Tällaisen lyhytaikaisäännöstelyluvan oikeudelliset edellytykset ratkaistaan itsenäisesti riippumatta mahdollisesta vuosisäännöstelyyn annetusta luvasta. Uljuan tapauksessa säännöstelyluvan perustana oleva suunnitelma tai asian asiakirjat eivät osoittaneet, että säännöstelyluvasta päätettäessä kyse olisi ollut muusta kuin vuosisäännöstelystä.

Siten ennen kuin lupajärjestelmän puitteissa pohditaan lyhytaikaisäännöstelyyn vaikuttavien lupamääräysten muuttamista, on varmistuttava, että voimalaitokselle on ylipäänsä oikeus lyhytaikaisäännöstelyn harjoittamiseen. Tämän oikeuden tulee ilmetä selvästi vesiluvasta tai vähintään säännöstelyluvan perustana olevasta suunnitelmasta tai lupa-asian muista asiakirjoista. Joissain tapauksissa nämä kirjaukset voivat olla hyvin tulkinnanvaraisia. Jos asiasta on epäselvyyttä, tulee vesilain mukaisen valvontaviranomaisen puuttua asiaan ja edellyttää luvan hakemista lyhytaikaisäännöstelylle.

## 8.4.2 Lupamääräysten muuttaminen

### 8.4.2.1 Vesilain keskeiset luvantarkistamissäännökset

Vesilaissa säädetään lupamääräysten tarkistamisesta yleisesti (VL 3:21) ja erityisesti kalatalousmääräysten (kalatalousvelvoite ja kalatalousmaksu, VL 3:22) sekä vanhan säännöstelyhankkeen määräysten (VL 19:7) tarkistamisesta. Vanhoja säännöstelyhankkeita ovat sellaiset hankkeet, joille on myönnetty lupa ennen 1.5.1991.

Nämä kaikki kolme vesilain luvantarkistamissäännöstä voivat liittyä lyhytaikaissäännöstelyluvan muuttamiseen. Perussäännös tähän on VL 19:7 vanhojen säännöstelylupien muuttamisesta. Kuitenkin myös VL 3:22:ssä tarkoitettu kalatalousmääräysten muuttaminen voi vaikuttaa merkittävästi lyhytaikaissäännöstelystä saataviin hyötyihin, jos tarkistaminen tarkoittaa esimerkiksi uusista vaellusratkaisuista ja niihin liittyvistä virtaamista määräämistä. VL 3:21:ssä tarkoitettu luvan tarkistamisen yleissäännös voi soveltaa tilanteeseen, jossa säännöstelyyn liittyviä lupamääräyksiä ei voida tarkistaa kahden edellisen säännöksen perusteella.

### 8.4.2.2 Yleissäännös lupien muuttamisesta ja pysyvyyssuojasta

VL 3:21:ssä tarkoitetun yleisen luvantarkistamissäännöksen käyttöala on verraten kaipa. Sen nojalla lupamääräyksiä voidaan tarkistaa ja uusia määräyksiä antaa esimerkiksi sillä perusteella, että hankkeen toteuttamisesta lupamääräysten mukaisesti aiheutuu olosuhteiden muutosten vuoksi haitallisia vaikutuksia, joita ei muutoin voida riittävästi vähentää.

Lupien vahvaa pysyvyyssuojaa VL 3:21:ssä ilmentää se, että kun hankkeen valmistumisesta on kulunut yli kymmenen vuotta, i) lupamääräysten tarkistaminen tai uusien määräysten antaminen ei saa sanottavasti vähentää hankkeesta saatavaa hyötyä ja ii) tarkistamisesta tai uusien määräysten antamisesta aiheutuvat muut kuin vähäiset edunmenetykset määrätään hakijan korvattaviksi (VL 3:21) (Belinskij ym. 2019).

### 8.4.2.3 Kalatalousmääräysten tarkistaminen

Kalatalousmääräysten tarkistamisen edellytykset ovat VL 3:21:ää väljemmät. VL 3:22:n nojalla kalatalousmääräyksiä voidaan tarkistaa hakemuksesta olosuhteiden olennaisen muuttumisen perusteella (VL 3:22). Jos kyse on ennen vesilain voimaantuloa annetuista kalatalousmääräyksistä, lisäedellytyksenä on, että tarkistamista on pidettävä yleisen tai tärkeän yksityisen edun kannalta tarpeellisenä (VL 19:10). Kalatalousmääräysten tarkistamiselle ei ole asetettu erityisiä hankkeen hyödyn vähenemiseen tai edunmenetysten korvaamiseen liittyviä edellytyksiä. Tässä suhteessa analogiaa voidaan

hakea siitä, että kalatalousvelvoitteen asettaminen uuteen lupaan ei saa aiheuttaa siitä saatavaan hyötyyn verrattuna kohtuuttomia kustannuksia hankkeesta vastaavalle (VL 3:14) (Koljonen ym. 2017).

Korkein hallinto-oikeus otti tapauksessa KHO 2015:63 kantaa kalatalousmääräysten kohtuuttomuuteen. Se totesi, että kun kysymys on toimenpiteestä, jolla pyritään ehkäisemään meritaimenen luonnonkannan häviämistä, ei kalatien toteuttamisen ja ylläpidon kustannuksia voida pitää kohtuuttomina saavutettavaan hyötyyn nähden.

VL 3:22 soveltuu vain olemassa olevien kalatalousmääräysten muuttamiseen, ei kokonaan uusien määräysten antamiseen (KHO 4.4.2013 t. 1160). Jos vesilupa ei lainkaan sisällä kalatalousmääräyksiä, tulee uusien määräysten antamiseen soveltaa VL 3:21:n yleistä luvantarkistamissäännöstä. Sen perusteella vesiluvan pysyvyyssuoja rajoittaa merkittävästi uusien määräysten antamista (Belinskij ym. 2019).

#### 8.4.2.4 Vanhan säännöstelyluvan tarkistaminen

Jos vanhalla säännöstelyhankkeella on huomattavia haitallisia vaikutuksia vesiympäristölle ja sen käytölle, tulee valtion valvontaviranomaisen selvittää mahdollisuudet niiden vähentämiseen erityisen selvitysmenettelyn avulla (VL 19:7). Tarkistamisen edellytyksenä on, että siitä saatava hyöty on yleisen edun kannalta olosuhteisiin nähden merkittävä. Tarkistaminen ei myöskään saa vähentää huomattavasti säännöstelystä saatavaa kokonaisyötyä tai muuttaa olennaisesti sen alkuperäistä tarkoitusta (VL 19:7).

VL 19:7:n nojalla vanhan säännöstelyhankkeen tarkistamisesta aiheutuvat edunmenetykset, jolleivät ne ole vähäisiä, määrätään hakijan korvattaviksi. Maksettavia korvauksia voidaan kuitenkin sovitella ottaen huomioon tarkistamisesta saatavat hyödyt ja siitä aiheutuvat edunmenetykset sekä aika, jonka hyödynsaaja on voinut käyttää säännöstelyä hyväkseen (VL 19:7). Vanhojen voimalaitosinvestointien kohdalla sovittelumahdollisuudet ovat siten uusia investointeja laajemmat (HE 17/1994 vp).

Korkein hallinto-oikeus otti tapauksessa KHO 29.1.2013 t. 357 kantaa säännöstelyhyödyn menetyksen korvaamiseen säännöstelyluvan muutostilanteessa vanhan vesilain (264/1961) 8:10 b:n perusteella. Kyseinen lainkohta vastasi nykyistä VL 19:7:ää. Korkein hallinto-oikeus arvioi, että 30 vuoden käytön jälkeen voimalaitosinvestoinneista on poistamatta noin 10–15 %. Lisäksi on otettava huomioon, että vesilain vuoden 1994 muutoksen jälkeen luvanhaltija on pystynyt ennakoimaan vanhan säännöstelyhankkeen tarkistamisen mahdollisuuden. Näillä perusteilla korvauskynnys oli asetettava melko korkeaksi.

Korkein hallinto-oikeus piti tapauksessa yleisen edun kannalta merkittävänä hyötynä lisävirtaaman johtamista kyseessä olleeseen jokeen järvilohen suojelemiseksi, kun taas lisäjuoksutuksen vuoksi menetetyin vesivoimain merkitys oli ilmasto- ja energiastrategian näkökulmasta vähäinen. Se katsoi myös, ettei 5 % sähkötuotannon väheneminen voimalaitoksen koko tuotannosta ole sellainen huomattava kokonaishyödyn väheneminen, että se muuttaisi olennaisesti säännöstelyn alkuperäistä tarkoitusta tuottaa vesivoimalla sähköä, kun otettiin huomioon myös lisäjuoksutusveloitteen määräämiskäytäntö. Näin ollen se katsoi, että luvanhaltija ei ollut oikeutettu korvauksiin.

#### 8.4.2.5 Lupamääräysten muuttaminen vesienhoidon ympäristötavoitteiden perusteella

Ympäristöllisten lupien muuttamisen mahdollisuuksia vesienhoidon ympäristötavoitteiden perusteella on tarkasteltu LupaMuutos-hankkeessa, jonka loppuraportti julkaistiin vuonna 2019. Hankkeen selvänä päätelmänä oli, että vesipuidedirektiivin valossa erityisesti vesilain sääntelyn lupien muuttamisesta tulisi tarkistaa. Kuten aikaisemmin on tullut ilmi, vesipuidedirektiivin 11 artiklassa edellytetään yksiselitteisesti, että lupia muutetaan kansallisella tasolla, jos tämä on tarpeen ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi (Belinskij ym. 2019).

Vesilaissa lupamääräysten muuttamisen sääntely on ympäristötavoitteiden saavuttamisen kannalta ongelmallista sekä aineellisesti että menettelyllisesti. Aineellisena ongelmana on ensinnäkin, että vesienhoidon ympäristötavoitteita ei mainita lupien muuttamisen perusteena eikä lupien muuttamista ole muutenkaan sovitettu yhteen vesienhoidon suunnittelun kanssa. Toiseksi erityisesti VL 3:21:n perusteella lupien pysyvyysuoja on siten vahva, että luvan muuttaminen ei saa juuri vähentää hankkeesta saatavaa hyötyä ja että se johtaa helposti velvollisuuden suorittamiseen korvauksia luvanhaltijalle. Menettelyllisenä haasteena on se, että tarkistaminen on tapauskohtaista ja että viranomaisten on tehtävä kaikki tarkistamiseen liittyvä selvitystyö (Belinskij ym. 2019).

Vesilain valuvikaa suhteessa vesipuidedirektiivin vaatimuksiin lieventää lyhytaikais-säännöstelyn kannalta hieman se, että VL 3:22:ssä tarkoitettu kalatalousmääräysten muuttaminen ei johda korvausten suorittamiseen. Pykälässä tarkoitettua olosuhteiden olennaisen muuttumisen vaatimusta on myös tulkittu siten väljästi, että esimerkiksi kalastoa koskevan tiedon lisääntyminen ja vesistön tilan parantuminen on voinut täyttää sen (KHO 2004:98, KHO 2015:63, KHO 2016:84), minkä perusteella myös vesienhoidon ympäristötavoitteiden saavuttamisen tarve voi olla merkityksellinen kalatalousmääräysten muuttamisen peruste. Voidaan myös ajatella, että vesienhoidon ympäristötavoitteiden vaarantuminen täyttää VL 3:21:ssä tarkoitettua ennakoimattoman haitan tai olosuhteiden muutoksen edellytyksen (Puharinen 2017).

Edelleen VL 19:7:ssä vanhoista säännöstelyhankkeista saatu hyöty vähentää toiminnanharjoittajiin kohdistuvaa haittaa luvan muuttamisesta ja alentaa tästä maksettavia korvauksia. Vanhan säännöstelyhankkeen muuttamisella tulee kuitenkin olla selvä yhteys siitä aiheutuneisiin huomattaviin haitallisiin vaikutuksiin, joiden arvioinnissa vesienhoidon ympäristötavoitteiden rooli on epäselvä.

## 8.5 Oikeudellisen sääntelyn arviointi ja kehittämistarpeet

### 8.5.1 Vesimuodostuman voimakkaasti muutetuksi nimeäminen suhteessa erilaisiin vesivoimalaitoksiin

Vesipuidedirektiivissä sekä vesien- ja merenhoitolaissa tarkoitettujen edellytysten (fyysinen muutos, merkittävä haitta, ei vaihtoeitoja) valossa on selvää, että vesivoimalaitoksen kokoluokka ja sen mahdollinen säätövoimakapasiteetti ovat ratkaisevia sen voimakkaasti muutetuksi nimeämisen kannalta. Lyhytaikaissäännöstelyä harjoittavat tyypillisesti suuremmat laitokset. Säännöstely ja siihen liittyvät rakennustyöt ovat todennäköisesti aiheuttaneet vesimuodostumaan merkittäviä fyysisiä muutoksia, joiden poistaminen johtaisi merkittävään haittaan perus- ja säätövoiman tuotannolle. Suurten laitosten tuottaman perus- ja säätövoiman hyötyjä ei välttämättä voida myöskään saavuttaa ympäristön kannalta paremmilla keinoilla. Sellaisten pienten laitosten, jotka eivät harjoita lyhytaikaissäännöstelyä, yhteydessä nämä edellytykset eivät tavallisesti täyty.

Suomessa KeVoMu-nimeämisen sääntely vesien- ja merenhoitolaissa noudattaa vesipuidedirektiivin linjauksia. Käytännön haasteena kuitenkin on, että nimeämisen perusteita suhteessa vesivoimaan ei ole ilmaistu kovin selvästi lakia tukevassa vesienhoidon ohjeistuksessa. Suomessa ei esimerkiksi ole Ruotsin tapaan jaettu voimalaitoksia kolmeen luokkaan niiden merkittävyyden ja säätövoimakapasiteetin perusteella. Myöskään vesivoimalla tuotetun säätövoiman merkittävyyteen ei ole otettu perusteellisesti kantaa.

EU:n tai Suomen tasolla ei ole selvästi linjattu, mitä ympäristöllisesti merkittävästi paremmilla vaihtoehtoilla tarkoitetaan tai millä skaalalla niitä tulisi tarkastella KeVoMu-nimeämisen yhteydessä. Jäsenvaltioilla on yhtäältä paljon päätäntävaltaa järjestää oma energiapolitiikkaansa. Toisaalta vaihtoehtoiset uusiutuvan sähköenergian lähteet ja kysyntäjoustomekanismit kehittyvät nopeasti, mikä saattaa jatkossa korostaa tai vähentää vesivoimalla tuotetun säätövoiman merkitystä.

Vesimuodostuman voimakkaasti muutetuksi nimeämisen haasteet tiivistyvät siihen, millä skaalalla merkittävää haittaa toiminnoille tulisi arvioida. Selvää tässä suhteessa on, että kyse on yksittäisen voimalaitoksen skaalaa laajemmasta yleisten ja yhteiskunnallisten etujen skaalasta. Näin ollen KeVoMu-nimeämisen arvioinnissa on keskityttävä erityisesti siihen, mikä merkitys vesivoimalaitoksella on Suomen energijärjestelmän kannalta. Skaalakysymykseen ei kuitenkaan oteta selvää kantaa lainsäädännössä eikä sitä ole ratkaistu oikeudellisesti sitovalla tavalla unionin tuomioistuimen oikeuskäytännössä.

On myös otettava huomioon, että vesimuodostuman voimakkaasti muutetuksi nimeäminen on tarkistettava vesienhoitokausittain kuuden vuoden välein. Kyse on siten dynaamisesta prosessista, jossa nimeämisen edellytykset voivat poistua, jos esimerkiksi hyvän ekologisen tilan saavuttaminen on mahdollista myöhemmin ilman merkittävän haitan aiheuttamista.

## 8.5.2 Hyvän ekologisen potentiaalin ja säättövoimatuotannon yhteensovittaminen

Vesimuodostuman nimeäminen voimakkaasti muutetuksi ei merkitse vapautusta toteuttaa vesien tilan heikentymistä estäviä ja tarvittaessa tilaa parantavia ympäristötoimenpiteitä. Vesivoiman yhteydessä nämä toimenpiteet liittyvät erityisesti jokijatkumon takaamiseen ja ympäristövirtaamiin. Kaikki sellaiset toimenpiteet on toteutettava, joista ei aiheudu merkittävää haittaa perus- ja säättövoiman tuotannolle.

Tilan parantamisen tarpeet ovat pitkälti sidoksissa vesimuodostuman luokitteluun. Valtaosa Suomen KeVoMu-vesimuodostumista on hyvää saavutettavissa olevaa ekologista tilaa huonommassa tilassa.

EU:n tai kansallisen oikeuden perusteella ei voida yksiselitteisesti todeta, mikä on merkittävän haitan skaala hyvän ekologisen potentiaalin / hyvän saavutettavissa olevan ekologisen tilan arvioimisessa. Ääri vaihtoehtoina ovat suppea tulkinta, jonka mukaan merkittävällä haitalla tarkoitetaan vain vesivoimalaitoksen tuottamille yhteiskunnallisille hyödyille aiheutuvaa haittaa, ja laaja tulkinta, jonka perusteella huomiota kiinnitetään myös toiminnanharjoittajalle aiheutuviin yksityisiin menetyksiin.

Vesipuidedirektiivin systematiikka ja yhteinen toimeenpanostrategia huomioon ottaen on selvää, että merkittävän haitan määrittäminen ei voi perustua ainoastaan toiminnanharjoittajan taloudellisiin intresseihin. Sen lisäksi on kiinnitettävä huomiota yleisiin etuihin, kuten esimerkiksi sähköverkon toiminnan kannalta merkittävään sähköntuotannon

tai säätökyvyn menetykseen. Tässä suhteessa tarkastelun tulee kohdistua vesivoimalaitoksille asetettaviin ympäristövaatimuksiin yksittäisen laitoksen tapauskohtaista harjontatilannetta laajemmin.

Vesipuidedirektiivin perusteella on selvää, että vesivoimalaitosten lupamääräyksiä on tarkasteltava ja tarvittaessa päivitettävä vesienhoidon ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi. Myös KeVoMu-nimeämiä ja tavoitteenasettelua tulee arvioida kuuden vuoden välein. Näin ollen hyvän ekologisen potentiaalin määrittämisessä ei voida ottaa lähtökohdaksi vanhan luvan ja lupamääräysten lähtötasoa. Ympäristötavoitteiden on heijastuttava lupaan tarvittaessa sen tarkistamisen kautta.

Vesipuidedirektiivin ohella lyhytaikaissäännöstelystä aiheutuviin ympäristövaikutuksiin sovelletaan ympäristövastuudirektiivin vaatimuksia. Ympäristövastuudirektiivissä tarkoitettu vesille aiheutuvan ympäristövahingon määritelmä nojaa vesipuidedirektiivin tavoitteisiin. Siten hyvän ekologisen potentiaalin saavuttaminen tavallisesti poistaa riskin myös siitä, että toiminnanharjoittajan katsottaisiin syyllistyvän merkittävien ympäristövahinkojen aiheuttamiseen.

Ruotsissa on pyritty energiapolitiikan puitteissa määrittämään merkittävää haittaa yksityiskohtaisesti. Saksa, Itävalta ja Ranska nojautuvat tässä suhteessa puolestaan pitkälti EU:n ohjeistukseen, jossa keskeisiä dokumentteja ovat vesipuidedirektiivin yhteisen toimeenpanostrategian oppaat.

Ruotsin kansallisessa ohjeistuksessa on käytännössä pyritty sulkemaan säätövoimat tuotanto kokonaan pois vesivoimalupien ympäristöehtojen modernisoinnin piiristä. EU-oikeuden näkökulmasta Ruotsin tulkinta siitä, että pienikin vesivoiman säätövoimakapasiteetin menetys merkitsisi vesipuidedirektiivissä tarkoitettua merkittävää haittaa vesivoiman tuotannolle, saattaa olla liian pitkälle menevä.

EU-oikeudessa haetaan jonkinlaista tasapainoa vesienhoidon ympäristötavoitteiden ja säätövoimat tuotannon välille. On selvää, että EU-oikeudessa yhtäältä painotetaan jatkumun ekologista merkitystä ja että säätövoimat tuotantoa harjoittavia vesivoimalaitoksia ei ole suljettu tämän tavoitteen ulkopuolelle. Toisaalta vesivoimaa ja sen säätövoimakapasiteettia arvostetaan EU:n energiapolitiikan merkittävänä osana ja jäsenvaltioille jätetään paljon energiapoliittista liikkumatilaa.

Suomessa haasteena on, että vesivoiman tuottaman säätöenergian merkitystä kansallisen energijärjestelmän kannalta ei ole kartoitettu yksityiskohtaisesti. Siten asia jää pitkälti arvioitavaksi yksittäisten vesimuodostumien ja vesivoimalaitosten tasolla vesimuodostumien luokittelussa, vesienhoitotyössä ja lupien muutosprosesseissa. Ei ole esimerkiksi selvää, voiko erilaisten ylös- ja alasvaellusratkaisujen toteuttaminen, joissa

virtaamasta ohjataan pois maltillinen osa vesivoimatuotannosta, johtaa vesienhoitolainsäädännössä tarkoitettuun merkittävään haittaan.

### 8.5.3 Vesivoimalupien päivittäminen Suomen oikeusjärjestelmässä

Suomen oikeusjärjestelmä tarjoaa tiettyjä mahdollisuuksia vesivoimalupien mukaan lyhytaikaisäännöstelyn päivittämiseen. Ennen päivittämiseen ryhtymistä on kuitenkin syytä varmistua korkeimman hallinto-oikeuden Uljua-ratkaisun KHO 2005:7 valossa, että lyhytaikaisäännöstelylle on ylipäänsä erityinen lupa olemassa. Tarvittaessa valvontaviranomaisen tehtävänä on velvoittaa tällaisen luvan hakemiseen.

Vesilain yleisessä luvantarkistamissäännöksessä korostuu vesilupien pysyvyyssuoja siten, että tarkistaminen ei saa sanottavasti vähentää hankkeesta saatavaa hyötyä ja että muut kuin vähäiset edunmenetykset määrätään hakijan korvattaviksi (VL 3:21). Säättövoiman vaikutusten lieventämisen kannalta keskeisten kalatalousmääräysten (VL 3:22) ja vanhan säännöstelyhankkeen määräysten (VL 19:7) muuttamisen edellytykset ovat astetta väljemmät.

Menettelyllisesti vesilain lupajärjestelmä ei ole siinä mielessä toimiva, että lupien muuttaminen voi käytännössä tapahtua vain valvonta- tai kalatalousviranomaisen aloitteesta ja tämän toteuttamien mittavien selvitysten jälkeen. Ruotsissa lainsäädäntöä on muutettu siten, että vanhojen vesivoimalupien tarkistaminen tapahtuu luvanhaltijan hakemuksesta ja että lupamääräykset eivät saa olla yli 40 vuotta vanhoja.

Keskeisenä haasteena Suomen järjestelmässä on, että vesilupien muuttamisesta ei ole liitetty vesienhoidon ympäristötavoitteisiin. Vesienhoitoasetuksen 24 §:n perusteella ELY-keskuksen tulee tarkastella vesienhoidon toimenpiteenä lupien saattamista ajan tasalla, mutta vesilakiin ei ole rakennettu yhteyttä näihin vesienhoidon toimenpiteisiin. Vesipuidedirektiivin perusteella on selvää, että lupien muuttamisen tulee olla mahdollista myös KeVoMu-vesimuodostumissa hyvän ekologisen potentiaalin saavuttamiseksi.

### 8.5.4 Kansallisen sääntelyn kehittämistarpeet

Suomessa vesienhoidon lainsäädäntö on pitkälti vesipuidedirektiivin mukaista. Tässä suhteessa kaivattaisiin kuitenkin tarkempaa kansallista ohjeistusta siitä, miten merkittävien haitallisten vaikutusten edellytystä tulisi soveltaa suhteessa säättövoimaan. Vesilainsäädännön keskeiset kehittämistarpeet liittyvät siihen, miten vesilaissa voitaisiin mahdollistaa lupien päivittäminen nykyistä sujuvammin.

Vesienhoitolainsäädäntöön liittyvässä ohjeistuksessa voitaisiin ottaa kantaa vesivoimalle ja erityisesti säätövoimalle aiheutuvien haittojen merkittävyyteen. Tämä olisi tarpeen niin KeVoMu-nimeämisten kuin hyvän saavutettavissa olevan ekologisen tilan saavuttamiseksi tarpeellisten toimenpiteiden arvioimisen kannalta.

Tällainen ohjeistus ei olisi oikeudellisesti sitovaa, mutta se voisi muodostaa nykyistä paremman perustan merkittävän haitan arvioimiselle. Siinä voitaisiin ottaa esimerkiksi kantaa, minkälaisiin eliöstön vaellusratkaisuihin tulisi tähdätä ja kuinka paljon vesivoiman säätövoimakapasiteetista voidaan tinkiä ympäristötoimenpiteiden perusteella. Ohjeistuksesta voitaisiin saada tukea tapauskohtaisten ympäristötoimenpiteiden suhteuttamiselle energiajärjestelmätason vaikutuksiin.

Mallia ohjeistukselle voitaisiin ottaa Ruotsista samoin kuin jossain määrin muista tässä luvussa käsitellyistä vertailumaista. Ruotsin ohjeistus vaikuttaa kuitenkin siinä määrin turhan ehdottomalta, että sen tavoitteena on säätövoimakapasiteetin säilyttäminen koskemattomana.

Vesilainsäädäntöä olisi syytä muuttaa siten, että vesivoimalupien päivittäminen onnistuisi pysyvyyssuojan tätä estämättä ja että myös vesilain mukaiset menettelyt tukisivat tätä. Vesipuidedirektiivissä edellytetään, että lupia tulee tarvittaessa muuttaa ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi.

## 9 Yhteenveto ja johtopäätökset

### 9.1 Selvityksen tavoitteisiin vastaaminen

Tämän selvityksen päätavoitteena on ollut koota yhteen tietoa ja luoda sen pohjalta katsaus i) säätövoiman tarpeen ja tarjonnan nykytilaan ja tulevaisuuden näkyymiin keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä sekä erityisesti ii) vesivoiman rooliin säätövoiman tuottajana. Osatavoitteina on ollut:

1. Luoda esimerkkitarkastelun avulla yleinen arviointimenetelmä merkittävän haitan arviointiin; erityisesti siihen, miten ympäristötoimenpiteet vaikuttavat lyhyt-aikaissäätöön ja säätövoimaan.
2. Käydä läpi merkittävän haitan arviointia ja vaikutuksia vesivoiman säätökykyyn kansainvälisten esimerkkien avulla sekä esimerkkikohteisiin liittyvää sääntelyä.
3. Tuottaa kuvaus vesienhoidon toimenpiteiden vaikutusmekanismeista sekä numeeriset arviot toimenpiteiden vaikutuksista säätötuotteiden eri markkinoilla

Säätövoiman nykytilan arvioimiseksi olemme määrittäneet säätövoiman käsitteen ja sen kytkennät sähkömarkkinoihin. Vesienhoidon ympäristötoimenpiteiden kustannukset muodostuvat erityisesti niiden vaikutuksista sähköntuotantoon, ja sähköntuotannon rajoittaminen vaikuttaa hyvinvointiin sähkömarkkinoiden kautta. Sähkömarkkinat (ml. vesivoimaan liittyvät tarkastelut) muodostavat siis vesienhoitotyön hyvinvointivaikutusten ja siten myös tämän selvityksen ytimen.

Päätavoitteeseen vastaamiseksi olemme tässä selvityksessä käyneet läpi sähkömarkkinoiden toimintamekanismit (2.1), reservien tarpeen (2.2), kysynnän ja tarjonnan tasapainottamisen eli säädön toteuttamisen teknologiset mahdollisuudet (2.3) sekä hyvinvointivaikutusten kannalta keskeisen taloudellisen tehokkuuden käsitteen (2.4). Säädön nykytilaa ja siihen johtanutta kehitystä on tarkasteltu luvussa 2.5, ja säädön tulevaisuuden näkymiä keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä luvussa 5.2.

Vuonna 2021 vesivoiman tuotantomuutokset ovat vastanneet 19,3 %:a tunnin sisäisestä jäännöskysynnän tasapainotustarpeesta Suomessa. Tässä selvityksessä olemme osoittaneet, että vesivoiman tuotannon rajoittaminen ei tarkoita säätökyvyn muuttumista samassa suhteessa. Vesienhoitotoimenpiteiden vaikutus vesivoiman kykyyn osallistua säätövoiman tuotantoon riippuu niistä taloudellisista lainalaisuuksista, joiden perusteella vesivoimalaitos päättää tuottaa kullakin hetkellä ja kussakin vesiti-

lanteessa tietyn määrän sähköä ja myydä sen eri markkinapaikoille. Osa näistä markkinapaikoista on säätötuotteiden markkinoita. Nämä lainalaisuudet on käyty läpi luvussa 4.

Luvussa 5 on tarkasteltu esimerkkitapausten ja eri tulevaisuuden skenaarioiden kautta, miten eri vesienhoitotoimenpiteet vaikuttavat vesivoimalaitosten valintaan tuottaa sää-tösähköä ja sitä kautta säätösähkömarkkinoihin. Luku on tuonut yhteen markkina- ja vesivoimamallin. Se on vastannut työn **kolmanteen osatavoitteeseen**.

**Työmme ensimmäisenä osatavoitteena** on ollut luoda yleinen tästä hetkestä riippu-maton menetelmä sen arvioimiseen, miten voimakkaasti erilaiset vesienhoidon toimen-piteet vaikuttavat vesivoimalaitosten mahdollisuuksiin ja optimaaliseen valintaan tuot-taa sähköä eri säätötuotteiden markkinoille ja miten tämä vaikuttaa viranomaisen (Fingrid) kykyyn toteuttaa sähköverkon tasapainottamisvelvoitetta. Arviointimenetel-mää on käytetty vaikutusten arvioimiseen tulevaisuuden skenaarioissa, joissa varioi-daan uusiutuvan energian kapasiteetin kasvua ja sähkömarkkinoiden dynamiikkaa. Hankkeessa luotu arviointimenetelmä ja sen pohjalta laaditut suositukset ovat relevant-teja myös selvityksessä käytettyjen skenaarioiden ulkopuolella.

Hankkeessa kehitetty arviointimenetelmä tukee viranomaisten päätöksentekokapasi-teetin vahvistamista lyhyellä ja pitkällä aikavälillä. Yleisen päätöksentekokapasiteetin vahvistaminen on tärkeää siksi, että sähkömarkkinat, mukaan lukien säätötuotteiden tarjonta ja tarve, ovat tällä hetkellä ennen näkemättömän nopeassa muutoksessa.

Tulevan sähkömarkkinakehityksen epävarmuudesta huolimatta Suomessa on tehtävä jatkuvasti ilmasto- ja energiapoliittisia päätöksiä. Tämän selvityksen tekemistä on han-kaloittanut näiden päätösten tueksi tarvittavan kansallisen koordinaatiokehikon puute. Mikäli jokaista yksittäistä päätöksentekotilannetta varten luodaan omia skenaarioita, edellyttää kokonaiskuvan ymmärtäminen huomattavia resursseja päätöksentekijöiltä ja näitä tukevilta ministeriöiltä.

Tämän hankkeen tavoitteiden kannalta aiemmista selvityksistä voidaan tunnistaa sel-laisia tulevan kehityksen mahdollisia suuntia ja mittasuhteita, jotka noudattelevat kul-loinkin asetettuja poliittisia tavoitteita tai toimialojen näkemyksiä. Näistä selvityksistä saatuja mallinnustuloksia voidaan vertailla tämän hankkeen tuloksiin. Tässä hank-keessa tehdyt skenaariotarkastelut kattavat viimeaikaisissa selvityksissä esitetyt tule-vaisuuden kehityspolut tuuli- ja aurinkovoiman sekä kulutuksen kasvun osalta. Hank-keen mallinnustulokset eivät ole yllättäviä verrattuna aiempiin tuloksiin.

**Toinen osatavoite** vesienhoidon lainsäädännön tarkastelusta on keskittynyt säätövoiman tuotannolle aiheutuvan merkittävän haitan määrittelyyn EU:n ja Suomen oikeudessa ja eri maiden kansallisten esimerkkien avulla. Vesipuidedirektiivissä sekä Suomessa vesien- ja merenhoitolaissa säädetään pintavesimuodostuman nimeämisestä keinotekoiseksi tai voimakkaasti muutetuksi (KeVoMu) sekä hyvän ekologisen potentiaalın / hyvän saavutettavissa olevan tilan tavoitteesta näille vesimuodostumille.

Vesienhoitolainsäädännössä tietyille tärkeille toiminnoille, kuten vesivoiman tuotannolle ja veden säännöstelylle, vesienhoidon toimenpiteistä aiheutuva merkittävä haitta on sekä KeVoMu-nimeämisen että hyvän saavutettavissa olevan tilan keskeinen kriteeri. Vesimuodostuma voidaan nimetä voimakkaasti muutetuksi, jos hyvän ekologisen tilan saavuttamiseksi tarvittavista muutoksista aiheutuisi merkittäviä haitallisia vaikutuksia näille toiminnoille. Nimeämisen jälkeen ympäristötoimenpiteitä tulee toteuttaa merkittävän haitan rajaan asti hyvän saavutettavissa olevan tilan saavuttamiseksi.

Merkittävän haitan määrittämisessä olennainen kysymys on, mikä on haitan tarkasteluskala. Tässä selvityksessä on päädytty tulkintaan, jonka mukaan kyse on yleisiin etuihin kohdistuvasta merkittävästä haitasta, ei yksittäisen vesivoimalaitoksen taloudellisista menetyksistä. Myös vertailumaiden esimerkit tukevat tätä tulkintaa. Yksittäiset vesivoimalaitokset osallistuvat säätövoimaan liittyvien yleisten etujen tuottamiseen Suomen sähköjärjestelmän tasolla. Tämä oikeudellinen päätelmä sopii hyvin yhteen sen kanssa, että selvityksen muissa osissa vesienhoidon toimenpiteiden vaikutuksia on tarkasteltu skenaarioiden avulla sähkömarkkinoiden tasolla.

Skaalakysymykseen ei oteta suoraan kantaa lainsäädännössä eikä unionin tuomioistuın ole ratkaissut asiaa oikeuskäytännössään. Siten merkittävän haitan arvioimista sähköjärjestelmän tasolla ei ole vahvistettu oikeudellisesti sitovalla tavalla. Euroopan komissio ja jäsenvaltiot ovat kuitenkin sitoutuneet yleisten etujen skaalaan merkittävän haitan arvioinnissa vesipuidedirektiivin yhteisen toimeenpanostrategian puitteissa.

## 9.2 Päätulokset

Tässä luvussa avaamme tutkimukseen liittyviä tuloksia yksityiskohtaisesti. Luvun loppuun (Taulukko 22) olemme keränneet päätulokset osatavoitteiden mukaan jaoteltuna.

Teknologisesti vesivoima kykenee tarjoamaan tunnin sisäistä säätökapasiteettia ja -energiaa kantaverkkoyhtiö Fingridin eri reservimarkkinapaikoille taajuusohjatuista reserveistä aina taajuuden palautusreserveihin. Reservimarkkinoille osallistuville toimijoille maksetaan korvausta varatusta kapasiteetista ja säätöenergiasta. Vuoden 2021 aineistolla arvioituna vesivoimatuotannon eri markkinapaikoilta saama euromääräinen

tulovirta jakautui siten, että 96 % kertyi sähkön vuorokausimarkkinoilta ja 4 % reservimarkkinoilta (Taulukko 4).

Joustavana teknologiana osa vesivoimasta osallistuu kysynnän ja tarjonnan tunnin sisäiseen tasapainotukseen. Vuoden 2021 vesivoimatuotantoaineiston perusteella 95 % vesivoiman tuotantovaihteluista 3 minuutin aikavälein on tapahtunut välillä [-39,8 42,3] MW (Taulukko 2). Vastaavasti 15 minuutin aikavälein 95 % vesivoiman tuotantomuutoksista on tapahtunut välillä [-125,0 134,5] MW (Taulukko 2). Vesivoiman tuotantomuutokset ovat vastanneet 19,3 % tunnin sisäisestä jäännöskysynnän tasapainotustarpeesta Suomessa (Kuvio 8).

Vesienhoidon ympäristötoimien aiheuttamat tuotantorajoitukset vesivoimalaitokselle vaikuttavat laitoksen tuotantopäätöksiin sähkön vuorokausimarkkinoilla ja reservimarkkinoilla. Koska vesivoimalaitoksen vuorokausimarkkinoiden tuntikohtainen tuotantoprofiili vaikuttaa vesivoiman kykyyn tarjota säätökapasiteettia ja -energiaa, vesienhoitorajoitteiden vaikutus vesivoiman reservitarjontaan ei ole yksiselitteinen. Erilaiset ympäristötoimenpiteiden tuomat rajoitukset vesivoimatuotannolle vaikuttavat eri tavoin vesivoiman säätökykyyn. Ympäristövirtaama turbiinien ohi vähentää vesivoimatuottajan käytössä olevaa energiamäärää, mutta ei vähennä voimalaitoksen käytössä olevaa säätökykyistä tuotantokapasiteettia. Minimivirtaaman nosto muuttaa osan vesivoimatuotannosta tasaiseksi *base/load*-tuotannoksi, ja vähentää näin ollen joustavan tuotannon kokonaismäärää. Samalla minimivirtaaman nosto kaventaa vesivoimatuottajan käytössä olevaa säätökykyistä tuotantoaluetta.

Tässä selvityksessä mallinnetuilla simulointiesimerkeillä havainnollistetaan vesivoimatuotantoon 2 %:n keskimääräisen tuotantomenetyksen, minimivirtaaman 10 %:n noston ja toimien yhdistelmän vaikutus voimalaitosten tuotantotulokertymään ja reservimarkkinatarjontaan. Pienen vesivoimalaitoksen osalta mallinnettu 2 %:n keskimääräinen tuotannon aleneminen vähentää hieman reservikapasiteetin tarjontaa (Taulukko 12). Vaikutus tulee pääosin nollavirtaamapäivien lisääntymisen myötä, koska nollavirtaamapäivinä tuotantolaitos ei kykene tarjoamaan säätökykyistä kapasiteettia reservimarkkinoille. Suuren voimalaitoksen osalta 2 %:n keskimääräinen tuotannon aleneminen ei näy juuri reservituotetarjonnassa (Taulukko 14). Sen sijaan minimivirtaaman nosto, joka kaventaa käytettävissä olevaa tuotantoaluetta 10 %, vähentää reservikapasiteetin ja säätöenergian tarjontaa useilla prosenteilla.

Esimerkkivoimalaitosten simulointitulokset perustuvat oletukseen, että laitoksen tulovirtaama ja yläaltaan energiavarastointikapasiteetin rajat vastaavat Suomen vesivoimalaitosten kokonaisuutta koskevien arvioiden mukaisia tietoja. Vesivoimalaitoksen säätökykyrajoitteet perustuvat vastaavasti yleisiin arvioihin Suomen säätökykyisen vesivoimatuotannon toimintarajoista. Jos yksittäisen laitoksen tai vesistöalueen peräkkäisten laitosten toimintarajat poikkeavat keskiarvo-oletuksista, voivat vesienhoitorajoitusten

vaikutukset poiketa vesistökohtaisesti tässä esitettyjen esimerkkivoimalaitoksen tulok-  
sista. Lisäksi on huomioitava, että useamman peräkkäisen voimalaitoksen tapauk-  
sessa yhdelle laitokselle asetetut rajoitteet voivat vaikuttaa myös muiden laitosten toi-  
mintaan. Turbiineihin ohjattavan keskivirtaaman vähennyksen vaikutuksia tarkasteltiin  
päivävirtaamatasolla Kemi-, Ii- ja Oulujoen laitoksilla.

Kun vesienhoitotoimenpide, jossa osa vedestä johdetaan turbiinien ohi, otetaan käyt-  
töön voimatalousvesistöissä, turbiinivirtaaman jakauma siirtyy hieman kohti minimivir-  
taama-aluetta. Näin ollen vesistön voimalaitosten reservimarkkinoille tarjottava säätö-  
kyky rajoittuu. Päivävirtaama-aineistojen perusteella erotamme virtaamaa-alueen,  
jossa voimalaitoksen säätökyky rajoittuu *jossain määrin* ja alueen, jossa säätökyky ra-  
joittuu *suuren säätötarpeen tapauksissa*. Kun suurilla voimatalousjoilla Kemi-, Ii- ja Ou-  
lujoella vähennettiin mekaanisesti 2 % päivävirtaamasta, niin *jossain määrin* rajoitetun  
säätötarjonnan virtaama-alueen todennäköisyys kasvoi 0.2 % – 1.3 % voimalaitoksesta  
ja voimatalousjoesta riippuen.

Tehdyissä sähkömarkkinoihin liittyvissä tarkasteluissa vesivoimalla näyttää olevan vä-  
häinen rooli sähkön kulutuksen kausivaihtelun ja lyhyen aikavälin tasapainotuksessa.  
Kausivaihtelun tasaaminen Suomessa tapahtuu enemmän muiden teknologioiden  
avulla ja pääosa Suomen lyhyen aikavälin tasapainotuksesta on vuosien 2015–2023  
tarkasteluvälillä tapahtunut rajasiirtoyhteyksien kautta. Vesivoimalla on ollut rajasiirto-  
jen kanssa yhtäläinen merkitys kysynnän tasapainottamisella tuntitasolla ja näitä tunti-  
tason vaikutuksia on tarkasteltu selvityksessä tarkemmin.

Tuntitason vaikutuksia on arvioitu tässä selvityksessä sähkön vuorokausimarkkinan ta-  
sapainohintojen laskentaa jäljittelevän rakenteellisen mallin avulla. Vaikutuksia on tar-  
kasteltu nykytilaa vastaavassa vuoden 2023 toisinnossa ja kolmessa kuvitteellisessa  
skenaariossa, jossa tuuli- ja aurinkovoiman tuotantoa ja sähkönkulutusta on lisätty vas-  
taamaan muualla esitettyjä arvioita lyhyen ja pidemmän aikavälin kehityksestä. Vesien-  
hoidon toimenpiteistä on tarkasteltu vesivoiman kokonaistuotannon vähentämistä  
2 %:lla ja vesivoiman kokonaistuotannon minimirajan nostoa suhteessa 10 %:lla.

Tarkasteltujen vesienhoidon toimenpiteiden sähkömarkkinavaikutukset jäävät kaikissa  
skenaarioissa pieniksi. Vesivoiman tuotantomahdollisuuksien heikentäminen nostaa  
markkinahintoja, minkä seurauksena sähkönkulutus vähenee. Tämä menetetty kulu-  
tushäviö tuottaa hyvinvointitappioita sähkömarkkinalla. Sähkönkulutuksen vä-  
hentyminen ja siitä seuraavat hyvinvointivaikutukset ovat kuitenkin vain promillen suu-  
ruusluokkaa suhteessa sähkökaupan arvoon sähkömarkkinalla. Suhteessa oikeudelli-  
sessa sääntelyssä tarkoitettuun vesivoimatuotannolle aiheutuvan merkittävän haitan  
rajaan vaikutukset näyttävät maltillisilta.

Muutoksen vähäisyys ei ole yllättävää aiempien sähkömarkkinaselvitysten ja talouden perusoppien valossa. Koska vesivoiman osuus Suomen sähkönkulutuksesta on vajaa viidennes, tarkoittaa parin prosentin tuotantomäärien rajoittaminen vain joidenkin promillien muutosta kotimaiseen kokonaistarjontaan sähkömarkkinalla. Lisäksi vesivoiman mahdollisuus optimoida tuotantoa uudelleen, rajasiirtoyhteydet ja muut markkinamekanismit liudentavat tehokkuustappioita. Hankkeen käytössä ollut tietopohja on ollut osin puutteellinen, mikä on rajoittanut mahdollisuuksia kehittää uusia menetelmiä markkina-vaikutuksien arviointiin. Tästä huolimatta mikään ei viittaa siihen, että muilla menetelmillä tai tarkemmalla lähtöaineistolla päädyttäisiin markkinavaikutusten osalta erilaisiin suuruusluokkiin vaikutusten osalta.

Tarkastelluista vesienhoidon toimenpiteistä ei aiheudu merkittävää haittaa sähkön tuntimarkkinoilla, joissa vesivoimalla on aiemmin ollut merkittävä rooli sähköjärjestelmän tasapainottamisessa. Vesivoimalla on ollut huomattavasti vähäisempi rooli lyhyen aikavälin tasapainottamisessa ja selvityksen pohjalta ei ole voitu tunnistaa merkittäviä haittoja myöskään erilaisten reservien kannalta, mikäli vesivoiman tuotantomahdollisuudet muuttuvat selvityksessä läpikäydyltä tavalla.

Tarkastelluilla vesienhoidon toimenpiteillä ei myöskään ole oleellista merkitystä sähkön toimitusvarmuuden tai huoltovarmuuden näkökulmasta. Vesivoiman tuotannon sääriippuva vaihteluväli on lähtökohtaisesti moninkertainen suhteessa tarkasteltuihin toimenpiteisiin ja energiahuollon turvaamisen näkökulmasta esimerkiksi ilmastonmuutoksen aiheuttama epävarmuus tarkoittaisi tarvetta vähentää vesivoiman roolia sähköjärjestelmän tasapainotustehtävässä esimerkiksi poikkeuksellisen kuivan kauden varalle. Siten tiettyjä vesienhoidon toimenpiteitä jokien ekologisen jatkumon parantamiseksi on mahdollista suorittaa vesienhoitolainsäädännön perusteella ilman merkittävän haitan aiheuttamista.

Lyhyen aikavälin säätömahdollisuuksien osalta vesienhoidon toimenpiteiden vaikutuksia tulevaisuudessa on pyritty arvioimaan vuosien 2015–2023 toteumatietojen avulla. Vaikka tuulivoiman tuotantokapasiteetti on aikavälillä noussut alle 1 000 MW:ista lähes 7 000 MW:iin, ei vesivoiman lyhyen aikavälin kokonaistuotannossa näytä tapahtuneen merkittäviä muutoksia. Tämä on ymmärrettävää, koska vesivoima on jo aiemmin toteuttanut sähköjärjestelmän tasapainotusta käytettävissä olevan säätökapasiteettinsa puitteissa. Siten vesivoimalla ole tarjota lisää säätökapasiteettia, vaikka markkinaolosuhteen muuttuisivat.

Tarkastelluissa skenaarioissa tuuli- ja aurinkovoiman tuotanto kasvavat entisestään jopa moninkertaiseksi nykyisestä. Vaihtelevan tuotannon kasvusta seuraava lisääntynyt ennustamaton tasapainotustarve on katettava ensisijaisesti muilla teknologioilla ja vesivoiman suhteellinen merkitys markkinan tasapainotuksessa vähenee. Eri resursien jakoon sähkömarkkinan ja reservien välillä liittyy kuitenkin epävarmuutta.

Vesienhoidon toimenpiteiden toteuttaminen ei tapahdu yllättäen ja äkillisesti, vaan mahdollisten päätöksien toimeenpano vie aikaa. Markkinatoimijoiden kannalta tiedossa olevat, mutta myöhemmin toteutuvat, muutokset markkinalla antavat mahdollisuuden ennakoida muutoksia ja sopeuttaa sekä tuotannon että kulutuksen rakenteita vastaamaan muuttuvaa tilannetta. Riittävällä sopeutumisajalla markkina sopeutuu suuriinkin muutoksiin. Esimerkiksi Fingrid Oyj:n sähköjärjestelmävisiossa on luotu toteutumiskelpoinen skenaario, jossa vesivoiman kokonaistuotanto vähenee kolmanneksella nykyisestä eli selvästi yli kertaluokkaa enemmän kuin tämän selvityksen tarkasteluissa. Riittävä sopeutumisaika voi siten vähentää ympäristötoimenpiteistä aiheutuvia haittoja.

Tiettyjen vesienhoidon toimenpiteiden, kuten jokien ekologisen jatkumon ja ympäristövirtaamien edistämisen seurauksena vesivoiman tuotantomahdollisuudet heikentyvät ja tämä tuottaa taloudellisia tappioita voimalaitoksien omistajille. Tulkintamme mukaan tällainen laitostason taloudellinen tappio ei kuitenkaan itsessään merkitse lainsäädännössä tarkoitettua merkittävää haittaa. Koska taloudellisen tehokkuuden heikentymisen vaikutukset sähkömarkkinalla ovat vähäisiä, kuvastaa tämä taloudellinen tappio valtaosaa yhteiskunnan kokonaisyhyvinvointitappiosta. Tämä tarkoittaa, että yksinkertaisempi analyysi, jossa tarkastellaan vain toimijalle kohdistuvaa tuotannon alentumisesta markkinahinnoilla laskettua tappiota, on hyvä approksimaatio yhteiskunnalle aiheutuvasta hyvinvointitappiosta.

Mikäli sähkömarkkinavaikutuksia ei oteta huomioon, heikentynyt mahdollisuus aloittaa vesivoiman tuotantoa optimaalisesti alentaisi myös vesivoimatuotannosta saatavaa keskihintaa. Vesivoimatuotannon rajoittaminen nostaa kuitenkin myös markkinahintoja, mikä aiheuttaa tulonsiirron sähkökäyttäjiltä sähköntuottajille. Sähköntuottajien kokonaistuotot nousevatkin kiristyneiden ympäristörajoitusten seurauksena. On perusteltua ottaa huomioon myös nämä markkinavaikutukset esimerkiksi, jos päädyttäisiin kansallisen lainsäädännön perusteella sellaiseen tulkintaan, että tietyistä ympäristötoimenpiteistä tulisi maksaa suurille yhtiöille korvauksia.

Oikeudellisesta näkökulmasta tämän selvityksen perusteella voidaan esittää seuraavat keskeiset tulokset. Niiden perusteella on syytä miettiä kansallisen lainsäädännön tarkistamista ja käydä KeVoMu-nimeämiseen ja hyvän saavutettavissa olevan ekologisen tilaan liittyvä ohjeistus läpi:

1. Vesivoimalaitoksen kokoluokka ja sen säätövoimakapasiteetti ovat ratkaisevia vesimuodostuman voimakkaasti muutetuksi nimeämisen kannalta. Nimeämisen edellytykset eivät yleensä täyty, jos kyseessä on sellainen pieni vesivoimalaitos, joka ei harjoita lyhytaikaisäännöstelyä. Nimeäminen on myös siinä mielessä dynaamista, että sen perusteiden täytyminen tulee tarkistaa vesienhoitokausittain ja että siihen vaikuttavat siten esimerkiksi kulloisetkin arviot tarvittavan säätövoiman määrästä.

2. Vesipuidedirektiivin ja sen yhteisen toimeenpanostrategian valossa merkittävän haitan määrittämisessä tulee kiinnittää huomiota yleisiin etuihin, kuten säätökyvyn menetyksen vaikutuksiin sähkömarkkinoiden toimintaa. Tässä suhteessa tarkastelun tulee kohdistua vesivoimasektorille asetettaviin ympäristövaatimuksiin yksittäisen laitoksen tapauskohtaista harkintatilannetta ja mahdollisia taloudellisia menetyksiä laajemmin. Tässä selvityksessä tarkastelluista virtaamamuutoksista aiheutuu edellä esitetyn mukaisesti vain maltillisia vaikutuksia sähkömarkkinoiden toimintaan.
3. Suomen vesilainsäädäntö ei tarjoa riittäviä mahdollisuuksia vesivoimalupien päivittämiseen. Vesipuidedirektiivissä edellytetään selvästi, että lupien tulee olla muutettavissa vesienhoidon ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi, mutta Suomessa vesivoimalupien päivittämiselle on sekä aineellisia rajoituksia että menettelyllisiä haasteita.

## Kooste tuloksista raportin osatavoitteiden mukaan luokiteltuna

### Esimerkkitapauksen mallinnus ja yleinen arviointikehikko

- Esimerkkivoimalaitosten valinta ja mallinnus: Mallinnuksessa käytettiin edustavaa esimerkkitapausta kahdesta vesivoimalaitoksesta: pienestä (10 MW) ja suuresta (50 MW) voimalaitoksesta. Näiden avulla arvioitiin, miten vesienhoitotoimenpiteet vaikuttavat voimalaitosten tuotantoon ja niiden kykyyn osallistua eri markkinoille
- Esimerkkitapauksen skenaarioiden valinta: Mallinnuksessa tarkasteltiin neljää skenaariota: "Keskivirtaama -2 %", "Minimivirtaama +10 %", "Keski- ja minimivirtaama", ja "Nyky säätökyky". Näiden skenaarioiden avulla simuloitiin, miten vesienhoitotoimenpiteet vaikuttavat vesivoimatuotannon kapasiteettiin ja säätökykyyn ja voimalaitosten osallistumiseen eri markkinoilla.
- Esimerkkivoimalaitoksen mallinnuksen kytkeminen eri markkinoille: Mallinnuksessa tarkasteltiin skenaarioiden vaikutuksia sähkön vuorokausimarkkinoilla sekä reservimarkkinoilla (FCR-N, aFRR ja mFRR). Simuloinnit osoittivat, että ympäristötoimenpiteet vaikuttavat tuotantotuloihin ja reservien tarjontaan eri tavoin riippuen siitä, kuinka paljon säätökyvystä menetetään näiden toimenpiteiden seurauksena. Esimerkiksi minimivirtaaman nosto kaventaa joustavan tuotannon kokonaismäärää ja vähentää reservitarjontaa useilla prosenteilla erityisesti suuremmilla voimalaitoksilla kun taas keskivirtaaman vähentäminen aiheuttaa selvästi pienempiä vaikutuksia tarjontaan.

## **Merkittävän haitan arviointi suhteessa vesivoiman säätökykyyn lainsäädännön ja kansainvälisten esimerkkien valossa**

- Merkittävän haitan käsitettä vesienhoidossa tulisi tulkita laajemmasta yhteiskunnallisesta näkökulmasta eikä vain yksittäisten vesivoimaloiden taloudellisten menetysten kautta. Vesipuidedirektiivin ja vertailumaiden esimerkkien perusteella merkittävän haitan arvioinnissa on otettava huomioon säätövoiman tuottamiseen liittyvät yhteiskunnalliset hyödyt, kuten sähköverkon tasapainottaminen ja energiaturvallisuus. Merkittävä haittaa tulee siten arvioida ensisijaisesti suhteessa yleisiin etuihin, jotta vesienhoidon tavoitteet ja sähköjärjestelmän toimivuus voidaan yhteensovittaa.
- Kansainvälisissä esimerkeissä, kuten Ruotsissa, Saksassa, Itävallassa ja Ranskassa, vesivoiman tuottama säätövoima on tärkeä osa sähköjärjestelmän toimintaa. Merkittävän haitan määrittäminen on pitkälti sidoksissa siihen, miten vesivoiman käyttö vaikuttaa koko sähköjärjestelmään. Ruotsissa asiasta on linjattu yksityiskohtaisimmin. Siellä ympäristötoimenpiteiden maksimivaikutukset vesivoiman perus- ja säätötuotantoon on määritetty poliittisesti. Ympäristötoimenpiteiden vaikutukset säätökykyyn on pyritty estämään kokonaan, mikä ei välttämättä ole EU-oikeuden kannalta perusteltu ratkaisu.

## **Vesienhoidon toimenpiteiden vaikutukset ja säätötuotteiden eri markkinoilla**

### ***Vaikutukset vesivoimatuottajiin:***

- Vesienhoitoon liittyvät ympäristötoimenpiteet, kuten jokien ekologisen jatkumon parantaminen ja ympäristövirtaamien ylläpitäminen, vaikuttavat vesivoiman kykyyn osallistua eri markkinoiden säätöön. Ympäristötoimenpiteet, kuten minimivirtaamarajoitteet ja keskivirtaamien muuttaminen, voivat heikentää vesivoiman säätökykyä, koska ne rajoittavat voimalaitosten mahdollisuutta optimoida vesivarantojen käyttöä joustavasti eri markkinapaikoilla. Tämä johtaa taloudellisiin menetyksiin erityisesti vesivoimatuottajille, koska tuotantokapasiteetti pienenee ja voimaloiden mahdollisuudet tarjota reservituotteita (kuten FCR-N, aFRR ja mFRR) vähenevät. Raportissa esitetyt mallinnukset osoittavat kuitenkin, että sähkön markkinahintojen nousu voi osittain kompensoida tulojen menetyksiä. Vesivoimatuottajien kokonaistuotot vähenevät keskimäärin 1,2–1,6 % riippuen tarkasteltavista skenaarioista.

**Vaikutukset energiamarkkinoille:**

- Vaikka taloudelliset vaikutukset yksittäisille vesivoimatuottajille voivat olla yllä mainittua suuruusluokkaa (1,2–1,6 %), tulostemme mukaan energiamarkkinatasolla ne jäävät varsin maltillisiksi. Tämä johtuu siitä, että vesivoima on vain yksi teknologia markkinoilla joka osallistuu tuotantoon ja säätöön. Lisäksi on jo kehitteillä uusia teknologioita, kuten akkuvarastointiratkaisuja ja kysyntäjoustoja, jotka voivat korvata vesivoiman säätökapasiteetin vähenemistä. Näiden molempien rooli lyhytaikaisessa säätelyssä kasvaa tulevaisuudessa, ja niiden integroiminen markkinoille lieventää vesivoiman menetetyä säätökykyä vaikutuksia. Voidaankin todeta, että vaikka vesivoiman tuotanto ja/säätökyky vähenee ympäristötoimenpiteiden seurauksena, uusien teknologioiden kehittyminen sekä markkinoiden sopeutumiskyky voivat tasapainottaa tilannetta pitkällä aikavälillä. Ympäristötoimenpiteiden myötä voi myös syntyä uusia markkinamahdollisuuksia esimerkiksi energian varastoinnin ja uusiutuvien energiamuotojen joustavuuden kehittämisen kautta. Energiamarkkinoiden tasolla vesienhoitotoimenpiteet voivat johtaa uusiin liiketoimintamalleihin, joissa yhdistetään vesivoima, energian varastointi ja kysyntäjoustot.
- Yhteenvedon tuloksista voidaan todeta, että vesienhoitotoimenpiteet aiheuttavat suoria taloudellisia vaikutuksia vesivoimatuottajille, mutta niiden vaikutukset energiamarkkinatasolla jäävät suhteellisen maltillisiksi, erityisesti uusien teknologioiden ja kysyntäjoustopuun kehittyessä. Oikeudellisesti merkittävän haitan arvioinnissa on tärkeää ottaa huomioon vaikutukset laajemmassa yhteiskunnallisessa kontekstissa.

## 9.3 Johtopäätöksiä ja kehitysehdotuksia

Sähkömarkkinoiden ja vesienhoitotoimenpiteiden yhteensovittaminen on keskeinen kysymys, kun pyritään tasapainottamaan ympäristönsuojelun ja energiantuotannon tarpeita. Vesienhoitotoimenpiteistä aiheutuu sekä hyötyjä että kustannuksia. Esimerkiksi kalateiden rakentaminen ja siihen liittyvä turbiinivirtaaman vähentyminen vaikuttaa suoraan tuotetun sähkön määrään, mikä voi lyhyellä aikavälillä alentaa voimalaitosten tuottoja. Samaan aikaan nämä rajoitteet edistävät luonnon monimuotoisuutta ja parantavat vesistöjen ekologista tilaa, mikä tuo pitkällä aikavälillä ympäristöhyötyjä, kuten edistää vaelluskalakantojen elpymistä.

Vaikka ympäristötoimenpiteet voivat lyhyellä aikavälillä lisätä vesivoimaloiden kustannuksia ja menetyksiä, niillä voi olla pitkän aikavälin taloudellisia ja imagohyötyjä. Vesivoimatuotannolle voi syntyä taloudellista hyötyä vesienhoitotoimenpiteistä sähkön markkinahinnan nousun kautta. Kun ympäristörajoitteet vähentävät tarjontaa, sähkön markkinahinta nousee hieman. Tämä hintojen nousu kompensoi osittain voimalaitosten tuotannon menetyksiä, sillä jäljelle jäävästä sähköntuotannosta voidaan saada korkeampia markkinatuottoja. Imagohyödyt liittyvät siihen, että kalateiden rakentaminen ja muiden ekologisten toimenpiteiden toteuttaminen voi parantaa vesivoimatuotannon mainetta. Vesivoimayhtiöt voivat siten myös hyötyä lisääntyvästä yhteiskunnallisesta ja lainsäädännöllisestä paineesta siirtyä kohti ympäristöystävällisempiä tuotantomuotoja. Näkemyksemme mukaan vesistöjen hyvä ekologinen tila tai potentiaali on mahdollista saavuttaa ja samalla varmistaa energijärjestelmän luotettavuus.

Ekosysteempipalvelujen näkökulmasta lyhytaikaissäännöstelyn vaikutuksia tulisi tarkastella laajempänä yhteiskunnallisena kysymyksenä. Kun arvioidaan ympäristötoimenpiteiden kustannuksia ja hyötyjä, on tärkeää ottaa huomioon, että ekosysteempipalvelujen, kuten vedenlaadun parantumisen, kalakantojen elpymisen ja luonnon monimuotoisuuden ylläpidon, taloudelliset ja yhteiskunnalliset hyödyt voivat olla merkittäviä. Nämä palvelut edistävät ympäristön ja yhteiskunnan resilienssiä, mikä tulisi sisällyttää kokonaisvaltaisiin kustannus-hyötyanalyysiin lyhytaikaissäännöstelyn vaikutuksia arvioidessa.

Yhteiskunnallinen keskustelu vesivoiman, lyhytaikaissääntelyn ja ekosysteempipalveluiden yhteensovittamisesta on vaikeaa, koska niihin liittyvät arvot koetaan hyvin voimakkaasti. Sähkö onkin nyky-yhteiskunnalle korvaamatonta, mutta vaihtoehtoiset tavat tuottaa sähköä eri markkinapaikoille eivät ole. Ne ovat markkinahyödykkeitä, joilla on mitattavissa oleva arvo. Tämä selvitys voidaan nähdä ponnistuksena kehittää menetelmiä tämän arvon mittaamiseen. Jotta se tukisi päätöksentekoa vielä paremmin, meidän tulisi edelleen kehittää myös ekosysteempipalveluiden arvon mittaamista. Yhteistarkastelun kehittämisessä nyt käsillä oleva raportti yhdistettynä ekosysteempipalveluiden arvon määrittämiseen luovat hyvät askelmerkit. Lyhytaikaissäännöstelyn kokonaisvaikutusten arviointiin.

Esitämme tässä muutamia keskeisiä kehitysehdotuksia, joiden avulla vesienhoidon ja sähkömarkkinoiden tavoitteet voidaan sovittaa nykyistä paremmin yhteen.

### 1. Vesienhoitotoimenpiteiden ympäristötavoitteiden edistäminen

Merkittävän haitan määrittely asettaa rajat vesivoimaan vaikuttavien ympäristötoimenpiteiden laajuudelle. KeVoMu-vesimuodostumien merkittävän haitan määrittelyn ja ekologisen potentiaalin arvioinnin tulee kuitenkin elää ajassa. Tämä tarkoittaa huomion kiinnittämistä yhteiskunnan energiajärjestelmän muutokseen ja teknologiseen kehitykseen niin säätövoiman tarpeen ja tarjonnan kuin vesienhoidon toimenpiteiden kannalta.

Vesienhoidossa vesimuodostumien tila-arviointi ja toimenpideohjelmat päivitetään kuuden vuoden välein. Tässä yhteydessä tulisi ottaa rohkeasti käyttöön tunnettuja toimenpiteitä tilatavoitteiden saavuttamiseksi. Tässä tulee nojautua viimeisimpään tietoon ja tutkimukseen.

Vesienhoidon ympäristötavoitteiden edistämiseksi VL 3:22:ssä tarkoitetuilla kalatalousmääräysten muutoshakemuksilla on keskeinen merkitys. Velvoitemuutosten hakijana on yleensä yleistä kalatalousetua valvova kalatalousviranomaisen, joka ei ole päävastuussa vesienhoidon suunnittelusta. Nykytilanteessa on keskeistä, että yhteistyö vesienhoitoviranomaisen ja kalatalousviranomaisen välillä on toimivaa.

Suomessa tulisi pohtia lainsäädännön ja sen taustalla olevien linjausten päivittämistä vesienhoidon ympäristötavoitteiden edistämiseksi. Kuten olemme tuoneet ilmi, vesilaki ei mahdollista vesipuidedirektiivissä edellytetyllä tavalla lupien päivittämistä. Vesilaissa vesilupien aineellinen pysyvyysuoja on liian vahva ja menettelyllisesti vastuu lupien päivittämisestä on liikaa viranomaisten harteilla toiminnanharjoittajien sijaan.

Samalla kun lainsäädäntöä muutetaan, on syytä tarkentaa vesivoimatoiminnoille aiheutuvan merkittävän haitan määrittelyä yleisellä tasolla, jotta tämä ei jäisi pelkästään tapauskohtaisten lupapäivitysten varaan. EU-oikeuden näkökulmasta voidaan yhtäältä todeta, että jäsenvaltioilla on runsaasti harkintavaltaa energiapolitiikan toteuttamisessa. Toisaalta on selvää, että myös säätövoimatuoianto kuuluu vesienhoidon ympäristötoimenpiteiden piiriin merkittävän haitan rajaan asti. Kansallisella tasolla olisi syytä linjata tutkimustietoon perustuen, minkälaisia menetyksiä vesivoiman säätökapasiteettiin voidaan sallia ympäristötoimenpiteiden perusteella. Tässä selvityksessä mallinnetut vesienhoidon ympäristötoimenpiteistä aiheutuvat vesivoiman säätökapasiteetin menetykset ovat kokonaisuudessaan maltillisia.

Vertailumaista Ruotsin malli vaikuttaa potentiaalisimmalta Suomen esimerkiksi vesienhoidon ympäristötavoitteiden edistämiseksi tietyin varauksin. Ruotsissa edellytetään, että vesivoimalaitoksille asetetaan tietyllä aikavälillä modernit ympäristövaatimukset ja

että toiminnanharjoittajilla tulee olla aktiivinen rooli lupapäivitysten hakemisessa. Ruotsi on myös jakanut vesivoimalaitokset kolmeen luokkaan ympäristötoimenpiteiden ja KeVoMu-luokittelun näkökulmasta sekä linjannut poliittisesti hyväksyttävistä perus- ja säättövoimatuotannon menetyksistä. Ruotsin mallin varaukset liittyvät kuitenkin siihen, että säättövoimatuotanto on pyritty poliittisissa linjauksissa käytännössä sulkemaan kokonaan ympäristötoimenpiteiden ulkopuolelle, mikä ei vaikuta EU-oikeuden mukaiselta ratkaisulta, ja että mallin täytäntöönpano on viivästynyt.

## 2. Valtiohallinnon roolin kehittäminen ja selkeyttäminen

Vesienhoitotoimenpiteitä on kehitettävä ensisijaisesti valtionhallinnon johdolla, vahvistaen viranomaisten kyvykkyyttä säädellä alaa itsenäisesti, ilman että ollaan riippuvaisia yritysten tarjoamasta tietopääomasta. Tämä on erityisen tärkeää, sillä aiempia väitteitä esimerkiksi säättövoiman tarpeesta ei ole voitu riippumattomasti varmentaa. Tavoitteena tulee olla sekä vesivoimalle aiheutuvien haittojen huomioiminen että jokien ekologisen jatkumon optimoiminen ilman, että annetaan yrityksille mahdollisuus viivyttaa tarvittavia toimia. Vaelluskalakantojen palauttamisessa tulisi määritellä selkeät, vesistökohtaiset tavoitteet, mihin eri sidosryhmät sitoutetaan. Tällä tavalla toteutukseen osataan valita juuri ne toimenpiteet, mitkä tukevat ennalta asetettuja tavoitteita.

## 3. Sähkön markkinadynamiikan parantaminen

Sähkön markkinadynamiikkaan on tärkeää parantaa energiatransition edistyessä. Konkreettisena toimenpiteenä tulisi keskittyä Fingridin tekemiin hankintoihin eri reserveistä ja näiden sähkömarkkinavaikutusten parempaan ymmärtämiseen ja sääntelyyn. Nykyisin toimitusvarmuuden nimissä tehdään toimenpiteitä, kuten säättökykyisen kapasiteetin poistamista markkinoilta, joiden vaikutuksia ei ole riippumattomasti arvioitu ja joiden valvonta on puutteellista. Tällaisiin käytäntöihin puuttuminen ja niiden läpinäkyvyyden parantaminen voisi merkittävästi tukea tasapuolisempaa ja tehokkaampaa sähkömarkkinoiden dynamiikkaa.

## 4. Tietopohjan parantaminen

Vesienhoidon toimenpiteiden ja sähkömarkkinavaikutuksien tutkimusta hankaloittaa puutteellinen tietopohja esimerkiksi lyhytaikaissäädön vaikutuksista ja erilaisten reservien toiminnasta. Viranomaiset ovat usein tulkinneet julkisuuslainsäädäntöä siten, että tietopyyntöihin vastaamisessa yhtiöiden liiketoimintaedut ovat saaneet korostuneen merkityksen suhteessa päätöksenteon tueksi tehtävän tutkimuksen turvaamiseen. Mikäli analyysin kannalta keskeisten tietojen tarjoaminen on toiminnanharjoittajien päätettävissä, on riskinä annettavien tietojen valikointi ja sitä kautta riippumattoman tutkimuksen rajoittaminen. Tämä rapauttaa yhteiskunnan mahdollisuuksia tehdä perusteltuja ja

pitkäaikaisesti kestäviä päätöksiä vesienhoidon ja sähkömarkkinoiden yhteensovittamisesta. Tarvittaessa tietopohjan turvaaminen on erikseen otettava huomioon lainsäädännössä. Viranomaiset ovat usein tulkinneet julkisuuslainsäädäntöä siten, että yhtiöiden liiketoimintaedut ovat saaneet korostuneen merkityksen suhteessa päätöksenteon tueksi tehtävän tutkimuksen turvaamiseen.

## Lopuksi

Energiantuotannon turvaaminen on yhteiskunnan keskeisimpiä tehtäviä. Vesivoimaan, kuten kaikkeen energiantuotantoon, liittyy haitallisia ulkoisvaikutuksia, jotka kuluttavat yhteisesti omistamaamme luontopääomaa. Myös ympäristön ja luontopääoman turvaaminen nykyisille ja tuleville sukupolville kuuluu yhteiskunnan tehtäviin viime kädessä ympäristöperusoikeuden nojalla.

Energiantuotannon ja ympäristön turvaamisen tehtävien tasapainottamiseksi on kyettävä taloudellisen tilanteen ja ympäristön muutoksiin reagoivaan päätöksentekoon. Tasapainoinen päätöksenteko edellyttää erilaisten vaihtoehtojen seurausten kvantifioimista läpinäkyvästi. Olemme tarkastelleet tässä selvityksessä, mitä seurauksia sähköjärjestelmälle ja erityisesti säätövoiman tuottamiselle on siitä, että osa vesisähköntuotantoon nyt menevästä vedestä allokoidaan ympäristö- ja minimivirtaamiin. Toivomme, että tuloksemme ja suosituksemme auttavat viranomaisia ja poliitikkoja laadukkaiden ja tasapainoisten päätösten tekemisissä.

## Liitteet

### Liite 1 Arvioita tulevasta kehityksestä

Suomessa on teetätetty kansallisen päätöksenteon tueksi VN TEAS -selvitys sähkömarkkinoiden tulevasta kehityksestä vuonna 2021. Selvityksessä on luotu joukko skenaarioita, joissa on käytetty pohjatietoina eri teollisuussektoreiden laatimia vähähiilisyystiekarttoja, EU-maiden kansallisia energia- ja ilmastosuunnitelmia erityisesti Suomen osalta, selvitystä tehneen konsultin sähkömarkkinamallinnuksessa luotuja näkemyksiä sekä muita selvityksiä (Forsman 2021). Kaikki näin luodut skenaariot ovat kuitenkin vanhentuneita Venäjän tuonnin keskeytymisen, Fennovoiman ydinvoimahankkeen kariutumisen ja tuulivoiman skenaarioiden oletuksia suuremman kasvun myötä. Selvityksessä on käytetty selvitystä tehneen konsultin ei-julkisia tietoja ja laskentamallia, joten tulosten luotettavuutta ei voida arvioida tieteellisten käytäntöjen mukaisesti.

Sähkön siirtoverkkoihin tehtävien investointien suunnittelu ja toteutus kuuluu eurooppalaisessa sääntely-ympäristössä monopoliasemassa oleville kansallisille kantaverkkoyhtiöille<sup>101</sup>. Kansalliset kantaverkkoyhtiöt tekevät omia arvioitaan tulevasta kehityksestä ja lisäksi kantaverkkoyhtiöiden välistä yhteistyötä koordinoidaan eurooppalaisella ja alueellisella tasolla. Pohjoismaisissa selvityksissä onkin arvioitu myös Suomen sähkömarkkinan kehittymistä, tosin ainakin nojautuen suomalaisiin näkemyksiin (Energinet, Fingrid, Statnett, and Svenska kraftnät (2023)).

Vuoden 2023 lopussa oletuksiltaan edelleen ajantasaisia julkisia skenaarioita Suomen sähkömarkkinan kehityksestä ovat esittäneet kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj ja Sitra (Fingrid (2023), Roques ym. (2021)). Näissä skenaarioissa on otettu lähtökohdaksi sähkökulutuksen voimakas kasvu yhteiskunnan sähköistymiskehityksen myötä. Oletetun kulutuksen kasvun perusteella on mallinnettu sähköjärjestelmän toimintaa ja haettu kustannustehokasta tuotantorakennetta osin skenaariokohtaisin määrärajoittein ja kustannusoletuksin. VN TEAS -selvityshanke Perusskenaariot energia- ja ilmastotoimien kokonaisuudelle kohti päästöttömyyttä (PEIKKO) on valmistunut kesällä 2024, eikä sen tuloksia ole ollut käytettävissä tämän hankkeen aikana.

---

<sup>101</sup> Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukset (EU) N:o 347/2013 Euroopan unionin laajuisten energiainfrastruktuurien suuntaviivoista ja Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukset (EU) 2019/943.

Fingrid Oyj:n sähköjärjestelmävisiossa tarkastellaan sähköjärjestelmän tulevaa kehitystä luomalla neljä skenaariota, joiden perusteella on arvioitu sähköverkon kehitystarpeita. Skenaariossa kuvataan tuleva sähkönkulutuksen ja sähköntuotannon rakenne, ja lähtöoletukset muokataan skenaarioiden kuvauksiin sopiviksi. Esimerkiksi maataluvoiman määrää on rajoitettu ja pienydinvoiman tuotantokustannuksien on oletettu alempaan hyvin aggressiivisesti joissakin skenaarioista. Rajasiirtoyhteyksien yli tapahtuvien muutoksien osalta skenaarioissa energijärjestelmän optimointia on tehty Suomea laajemmalla alueella tekemällä oletuksia uusiutuvan energian minimi- ja maksimituotantokapasiteeteista eri alueilla. Fingrid Oyj:n skenaarioiden numeeristen tulosten tuottamiseen on käytetty ei-julkisia tietoja ja laskentamallia, joten tulosten luotettavuutta ei voida arvioida tieteellisten käytäntöjen mukaisesti.

Fingrid Oyj:n esittämiä skenaarioita arvioitaessa täytyy ottaa huomioon mahdollinen eturistiriita yhtiön verkkoinvestoinneista saamien tuottojen ja yhtiön strategisen suunnittelun välillä.<sup>102</sup> Fingridin skenaariosta puuttuu esimerkiksi alkuvuode 2024 tilanteen perusteella mahdollinen matalan sähkönkulutuksen kehityspolku, jolla edettäessä tarpeet verkostoinvestoinneille olisivat huomattavasti Fingridin skenaarioiden mukaisia olosuhteita pienemmät (Fingrid (2023)).

Sitran esittämät skenaariot ovat normatiivisia ja niissä on otettu lähtökohdaksi hiilineutraalisuus Suomessa vuoteen 2035 mennessä. Tähän tavoitteeseen pääsemiseksi esitellyissä kahdessa skenaariossa vertaillaan sähköistymistä suoraan tai epäsuorasti vedyn ja muiden synteettisten polttoaineiden valmistuksen kautta. Kulutuksen taso määräytyy skenaariossa ulkoisesti talouden kasvuennusteiden perusteella. Sähköntuotantorakenne määräytyy mallissa eri teknologioille tehtyjen kustannusoletusten perusteella. Sähköjärjestelmän mallinnuksessa otetaan huomioon rajasiirtoyhteyksien kautta lisääntyvä joustavuus naapurimaista, mutta oletuksia muiden maiden kehityksestä ei esitellä tarkemmin (Roques ym. (2021)). Myös Sitran skenaarioiden numeeristen tulosten tuottamiseen on käytetty selvitystä mukana olleen konsultin käyttämiä ei-julkisia tietoja ja laskentamallia, joten tulosten luotettavuutta ei voida arvioida tieteellisten käytäntöjen mukaisesti.

---

<sup>102</sup> Fingrid Oyj:n sähkönsiirrosta saamat tuotot perustuvat verkkotoimintaan sitoutuneen pääoman määrään, ks. Energiavirasto (2023), Valvontamenetelmät, Sähkön kantaverkkotoiminta, Dnro 3172(040300/2023).

## Liite 2 Laskentamallien kuvaukset

### Edustavan voimalaitoksen mallinnus

Käytetty optimointimalli on Markov päätösprosessi, joka koostuu

- äärellisestä joukosta tilamuuttujia  $S$ ,
- äärellisestä joukosta päätösmuuttujia  $A$ ,
- palkkiofunktioista  $R: S \times A \rightarrow \mathbb{R}$ ,
- tilasiirtymätodennäköisyysfunktioista  $P: S \times A \times S \rightarrow [0,1]$ , jolle

$$\forall s \in S, a \in A: \sum_{s' \in S} P(s, a, s') = 1, \quad (L1)$$

- sekä alkutilajakaumasta  $\mu: S \rightarrow [0,1]$ , jolle

$$\sum_{s \in S} \mu(s) = 1. \quad (L2)$$

Päätösprosessi alkaa alkutilasta  $s^0 \in S$ . Ajanhetkellä  $t$  päätöksentekijä havaitsee tilan  $s^t \in S$  ja valitsee toiminnan  $a^t \in A$  politiikkafunktion  $\pi(a^t | s^t)$  mukaisesti. Politiikkafunktio kertoo valinnan  $a^t$  todennäköisyyden, kun päätöksentekijä havaitsee tilan  $s^t$ . Lopuksi tilan  $s^t$  ja päätöksen  $a^t$  mukaisesti prosessi siirtyy seuraavaan tilaan  $s^{t+1} \in S$  todennäköisyydellä  $P(s^t, a^t, s^{t+1})$ , ja päätöksentekijä saa palkkion  $r^t = R(s^t, a^t)$ . Prosessi toistuu, kunnes maksimimäärä  $T$  tilasiirtymää on toteutunut.

Määritetään diskonttotekijällä  $\beta \in [0,1)$  diskontattu palkkiosarja seuraavasti

$$u^t = r^t + \beta r^{t+1} + \beta^2 r^{t+2} + \dots = r^t + \beta u^{t+1}. \quad (L3)$$

Toiminnan arvofunktiio  $Q^\pi(s, a)$  tuottaa odotetun palkkiosarjan, kun valitaan toiminta  $a$  tilassa  $s$

$$Q^\pi(s, a) = E_\pi[u^t | s^t = s, a^t = a] = E_\pi[r^t + \beta u^{t+1} | s^t = s, a^t = a]. \quad (L4)$$

Vesivoimatuottaja saa tuotantotuloa sähkön vuorokausimarkkinoilta  $R^s$  (€), reservimarkkinoiden kapasiteettikorvauksen  $R^{r,cap}$  (€), sekä reservimarkkinoiden energiakorvauksen  $R_h^{r,energy}$  (€). Vesivoimatuottajan päivakohtainen tuotantotulo  $R(s, a)$  määritetään seuraavasti:

$$R(s, a) = \sum_{h=1}^H \{R_h^s(a) + R_h^{r,cap}(a) + R_h^{r,energy}(a)\} - Y(s, a), \quad (L5)$$

missä

$$R_h^s(a) = p_h^s q_h(a), \quad (L6)$$

$$R_h^{r,cap}(a) = p_h^{cap} c(a) + p_h^{mFRR} n_h(a), \quad (L7)$$

$$R_h^{r,energy}(a) = p_h^{mFRR} b_h(a). \quad (L8)$$

Yhtälön (L6) termi  $R_h^s$  kuvaa tuotantotuloa sähkön vuorokausimarkkinoilta tunnille  $h$ . Tuotantotulo on vuorokausimarkkinoiden tuntihinta  $p_h^s$  (€/MWh) kerrottuna vesivoimalla tuotetulla määrällä  $q_h$  (MWh). Yhtälön (L7) termi  $R_h^{r,cap}$  kuvaa reservimarkkinoilta saatavaa kapasiteettituloa. Se koostuu kapasiteettihinnasta  $p_h^{cap}$  (€/MW) kerrottuna varastusta kapasiteetista (MW) sekä säätöenergiarahinnasta  $p_h^{mFRR}$  (€/MWh) kerrottuna tunnin  $h$  nettosäätöenergialla  $n_h$  (MWh). Termi  $R_h^{r,energy}$  kuvaa mFRR-reservimarkkinoiden säätöenergiatuloa. Se koostuu tunnin  $h$  säätöenergiarahinnasta  $p_h^{mFRR}$  (€/MWh) sekä nettosäätömäärästä  $b_h$  (MWh). Termi  $Y(s, a)$  kuvaa vesivoimatuottajan optimointialgoritmissa käytettyä sakkofunktiota tilanteessa, jossa tilamuuttuja  $s$  ja päätösmuuttuja  $a$  johtavat yläaltaaseen varastoidun energiamäärän minimirajoitteen alittumiseen.

Määritetään vesivoimatuotannolle seuraavat rajoitteet tuotannon muutosnopeudelle tunnin, 15 minuutin, 5 minuutin ja 3 minuutin aikaväleihin. Oletetaan, että vesivoimatuottaja voi muuttaa tuotannon määrää tunnilta  $h$  tunnille  $(h + 1)$  maksimissaan 50 % voimalaitoksen nimellistehosta:  $\theta = 0,50\bar{q}$ . Tunnin sisäisen säädön osalta oletetaan, että vesivoimatuottaja voi muuttaa tuotantoa 15 minuutin aikaväleihin maksimissaan 25 % nimellistehosta. Tätä rajoitetta käytetään mFRR säätöenergiarajoitteena,  $\underline{b} = -0,25\bar{q}$  ja

$\bar{b} = 0,25\bar{q}$ . Tunnin sisäisen säädön rajoitteeksi 5 minuutin aikavälillä asetetaan 8 % nimellistehosta,  $\bar{c}^{aFRR} = 0,08\bar{q}$ , ja 3 minuutin aikavälillä 5 % nimellistehosta,  $\bar{c}^{FCR-N} = 0,05\bar{q}$ .

Asetamme lisäksi markkinaosuusrajoitteen edustavalle vesivoimalaitokselle aFRR ja mFRR markkinapaikoilla. Vesivoiman kuukauden  $m$  osuus mFRR säätötarjonnasta arvioidaan vuosien 2018–2021 kuukausitason teknologiaosuuksien keskiarvona,  $s_h^{mFRR} \forall h \in H_m$ , jossa  $H_m$  on kaikkien kuukauden  $m$  tuntien joukko (Aineisto: Fingrid, 2022a). Vesivoiman osuus aFRR kapasiteetille asetetaan vakioksi,  $s_h^{aFRR} = 1.0$  (Aineisto: Fingrid, 2022a). Oletamme, että mallinnetun esimerkkivesivoimalaitoksen osuus vesivoiman mFRR ja aFRR säätöenergia- ja kapasiteettitarjonnasta on  $s^{hp} = 0.02$ . Tällä oletuksella simuloitu tuotantotulojakauma vuorokausimarkkinoiden ja reservimarkkinoiden välillä '2023 Toisinto' – skenaariossa (Taulukko 14) asettuu lähelle datasta arvioitua tuotantotulojakaumaa (Taulukko 4). Tunnille  $h$ , kun sähköjärjestelmässä tilataan mFRR-markkinapaikan ylösäättöä  $B_h > 0$ , markkinaosuusrajoite on  $\bar{b}_h^{ms} = B_h s_h^{mFRR} s^{hp}$  (MWh). Tunnille  $h$ , kun sähköjärjestelmässä tilataan mFRR-markkinapaikan alassäättöä  $B_h < 0$ , markkinaosuusrajoite on  $\underline{b}_h^{ms} = B_h s_h^{mFRR} s^{hp}$  (MWh). Samoin aFRR kapasiteetille markkinaosuusrajoitteet esitetään termeillä  $\bar{c}_h^{ms} = C_h^{up} s^{hp}$  (MW), tunnille  $h$ , kun aFRR-markkinapaikalla tilataan ylösäättökapasiteettia  $C_h^{up} > 0$  ja  $\underline{c}_h^{ms} = C_h^{down} s^{hp}$  (MW), kun aFRR-markkinapaikalla tilataan alassäättökapasiteetilla  $C_h^{down} < 0$  (MW). Simulointimallissa profiilit tilatuille mFRR-markkinapaikan säätömäärille  $B_h$  (MWh) ja aFRR-markkinapaikan kapasiteeteille  $C_h^{up}$  (MW) ja  $C_h^{down}$  (MW) perustuvat vuosien 2020–2023 reservimarkkinatulemiin (Fingrid Avoin Data, 2024).

Vesivoimatuottajan optimointipäätös on seuraava. Tuottaja päättää, että paljonko varaa säätökykyistä kapasiteettia (MW) reservimarkkinapaikalle FCR-N pienen voimalaitoksen tapauksessa tai reservimarkkinapaikalle aFRR suuren voimalaitoksen tapauksessa. Tämä kapasiteettimäärä  $c$  (MW) vaikuttaa vesivoimatuottajan vuorokausimarkkinoiden tarjontafunktioon siten, että kapasiteetin mukaisesti varaudutaan ylös- ja alassäättöön seuraavan vuorokauden tunneille. Valitun kapasiteettimäärän  $c$  mukaisesti valitaan tarjontafunttioparametrin  $a_1 = c$  taso, eli vesivoimatuottaja varaa säätökyvyn  $c$  seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille vuorokausimarkkinoiden tarjontafunktion määrittymisen yhteydessä.

Suurelle vesivoimalaitokselle mallinnetaan reservimarkkinapaikan mFRR tarjonta. Varatun aFRR-reservikapasiteetin  $c$  ja vuorokausimarkkinoiden tuntituotantoprofiilin,  $q_h, h \in \{1, \dots, H\}$ , funktiona määrittyy vesivoimatuottajan kyky tarjota mFRR-säätöenergiaa reservimarkkinapaikalle. Ylösäättötunnille, eli kun mFRR säätöenergian lisäystä tarvitaan nettona tunnille  $h$ , vesivoimatuottajan ylösäättörajoite,  $b_h > 0$  (MWh), on seuraava:

$$b_h = \min \left\{ \bar{b}, \bar{b}_h^{ms}, \bar{q} - q_h, \theta - \max\{0, (q_h - q_{h-1}^{net})\}, \theta - \max\{0, (q_h - q_{h+1})\} \right\}. \quad (L9)$$

Yhtälössä (L9) termi  $\bar{b}$  mFRR-reservituotteen tekninen yläraja ylössäätökyvyille, termi  $\bar{b}_h^{ms}$  on voimalaitokselle lasketun ylössäätötarjonnan markkinaosuuden mukainen yläraja, ja termi  $\bar{q} - q_h$  on elpot-tuontituotantotason ja maksimituotantotason välinen erotus. Termi  $q_{h-1}^{net}$  on edellisen tunnin vuorokausimarkkina- ja reservienergian nettoenergiämäärä. Termi  $\theta - \max\{0, (q_h - q_{h-1}^{net})\}$  ottaa huomioon, että vesivoimalaitos ei voi muuttaa tuotantoaan tuntien  $(h - 1)$  ja  $h$  välillä ylöspäin enemmän kuin tuotannonmuutosrajoite  $\theta$ . Vastaavasti termi  $\theta - \max\{0, (q_h - q_{h+1})\}$  ottaa huomioon tuotannonmuutosrajoitteen tunneille  $h$  ja  $(h + 1)$ .

Alassäätötunnille, eli kun mFRR säästöenergian vähennystä tarvitaan nettona tunnille  $h$ , vesivoimatuottajan alassäätörajoite,  $b_h < 0$  (MWh), on

$$b_h = \max \left\{ \underline{b}, \underline{b}_h^{ms}, \underline{q} - q_h, -\theta - \min\{0, (q_h - q_{h-1}^{net})\}, -\theta - \min\{0, (q_h - q_{h+1})\} \right\}. \quad (L10)$$

Yhtälössä (L10) termi  $\underline{b}$  on mFRR-reservituotteen tekninen raja alassäätökyvyille, termi  $\underline{b}_h^{ms}$  on voimalaitokselle lasketun alassäätötarjonnan markkinaosuuden mukainen alaraja, ja termi  $\underline{q} - q_h$  on minimituotantotason ja elpot-tuntituotantotason välinen erotus. Termi  $-\theta - \min\{0, (q_h - q_{h-1}^{net})\}$  ottaa huomioon, että vesivoimalaitos ei voi muuttaa tuotantoaan tuntien  $(h - 1)$  ja  $h$  välillä alaspäin enemmän kuin tuotannonmuutosrajoite  $-\theta$ . Vastaavasti termi  $-\theta - \min\{0, (q_h - q_{h+1})\}$  ottaa huomioon tuotannonmuutosrajoitteen tunneille  $h$  ja  $(h + 1)$ .

Vesivoimatuottaja maksimoi odotetun tuotantotulon sähkön vuorokausimarkkinoilta ja reservimarkkinoilta

$$E \left\{ \sum_{t=1}^T \beta^{t-1} R_t \right\}, \quad (L11)$$

missä termi  $R_t$  on yhtälössä (L5) esitetty päiväkohtainen tuotantotulo (€), termi  $\beta$  kuvaa päiväkohtaista diskonttokerrointa ja  $T = 365$  on päivien lukumäärä vuodessa. Oletamme, että vesivoimatuottaja käyttää 5 % vuotuista diskonttokerrointa,  $\rho = 0.05$ , jolloin päiväkohtainen diskonttokerroin asetetaan tasolle  $\beta = (1/(1 + \rho))^{(\frac{1}{T})}$ .

Yhtälössä (L1) tilamuuttujavektorin  $s^t = [t, \bar{i}_t, e, q_{H,(t-1)}]$  siirtymä seuraavaan tilaan  $s^{t+1}$  transiio perustuu yksittäisten tilamuuttujien siirtymäfunktioihin. Tilamuuttuja vuoden

päivä  $t \in \{1, \dots, T = 365\}$  päivittyä deterministisesti päivästä seuraavaan. Vuoden viimeisenä päivän jälkeen siirrytään jälleen tilaan  $t = 1$ . Tilamuuttuja toteutuneen sisäänvirtaavan energian suhde ajanjakson keskiarvoon  $\bar{i}_t = i_t/\tilde{i}_t$  päivittyä toteutuneen sisäänvirtaaman  $i_t$  (MWh) ja ajanjakson keskiarvon  $\tilde{i}_t$  (MWh) funktiona. Tilamuuttuja varastoidun energian määrä yläaltaassa  $e_t$  (MWh) päivittyä toteutuneen sisäänvirtaaman ja tuotetun vuorokausimarkkinoiden ja reservimarkkinoiden energian funktiona  $e_{t+1} = \min\{\bar{e}_{t+1}, e_t - \sum_{h=1}^H(q_{h,t} + n_{h,t} + b_{h,t}) + i_t\}$ . Tapauksessa, jossa yläaltaan suurin mahdollinen energiamäärä  $\bar{e}_{t+1}$  (MWh) ylittyisi, ylimääräinen vesi juoksetetaan ohi turbinieneista. Tilamuuttujan siirtymään liittyy epävarmuutta, koska sisäänvirtaavan energian määrä,  $i_t$ , määräytyy 13 virtaamavuoden (2010–2022) profiilin perusteella ja säätöenergian tarveprofiili,  $\sum_{h=1}^H(n_{h,t} + b_{h,t})$ , määräytyy 4 reservimarkkinavuoden toteumaprofiilin (2020–2023) perusteella. Tilamuuttuja päivän ( $t - 1$ ) viimeisen tunnin tuotantomäärä  $q_{H,(t-1)}$  päivittyä edellisen päivän päätösmuuttujan  $a^{t-1}$  perusteella.

Dynaamisen optimoinnin malli ratkaistaan Q-learning algoritmin avulla. Määritetään optimaalisen toiminnan arvofunktion  $Q^*(s, a)$  Bellmanin optimiyhtälö seuraavasti:

$$Q^*(s, a) = \sum_{s' \in S} P(s, a, s') \left[ R(s, a) + \beta \max_{a' \in A} Q^*(s', a') \right]. \quad (L12)$$

Kun optimaalinen toiminnan arvofunktio  $Q^*$  on ratkaistu, saadaan optimipolitiikka valitsemalla toiminta  $a$ , joka maksimoi odotetun diskontatun palkkiosarjan (suurin Q-arvo) jokaisessa tilassa  $s$

$$\pi^*(s) = \arg \max_{a \in A} Q^*(s, a). \quad (L13)$$

Q-learning on vahvistusoppimisen muoto, jossa päätöksentekijä oppii tekemään päätöksiä keräämällä kokemuksia  $(s^t, a^t, r^t, s^{t+1})$  toimintaympäristössä.  $\epsilon$ -greedy politiikalla päätöksentekijä valitsee toiminnan joko satunnaisesti tai parhaaseen arvioon perustuen tietyn todennäköisyysjakauman mukaisesti. Q-learning päivityssääntö on

$$Q(s^t, a^t) \leftarrow Q(s^t, a^t) + \alpha \left[ R(s^t, a^t) + \beta \max_{a' \in A} Q(s^{t+1}, a') - Q(s^t, a^t) \right]. \quad (L14)$$

Pseudokoodi Q-learning algoritmilta esitetään kohdassa **Algoritmi 1**.

---

**Algoritmi 1** Q-learning käyttäen  $\epsilon$ -greedy politiikkaa

---

1. Alustetaan:  $Q(s, a) = 0$  kaikille  $s \in S, a \in A$
  2. Toistetaan jokaiselle episodille:
  3. **kun**  $t = 0, 1, 2, \dots$  **tee**
  4. Havaitaan tila  $s^t$
  5. Todennäköisyydellä  $\epsilon$ : valitaan satunnaisesti toiminta  $a^t \in A$
  6. Muutoin: valitaan toiminta  $a^t \in \arg \max_a Q(s^t, :)$
  7. Suoritetaan toiminta  $a^t$ , havaitaan palkkio  $R$  ja seuraava tila  $s^{t+1}$
  8. Päivitetään toiminnan arvofunktio (kaava L3)
- 

Q-learning konvergoituu optimipolitiikkaan  $\pi^*$  kun tila-toimintayhdistelmiä  $(s, a) \in S \times A$  kokeillaan riittävän useasti oppimisjakson aikana. Samoin oppimisparametrin  $\alpha$  tulee pienentyä oppimisprosessin aikana siten, että

$$\text{kaikille } s \in S, a \in A: \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k(s, a) \rightarrow \infty \text{ ja } \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k(s, a)^2 < \infty. \quad (L15)$$

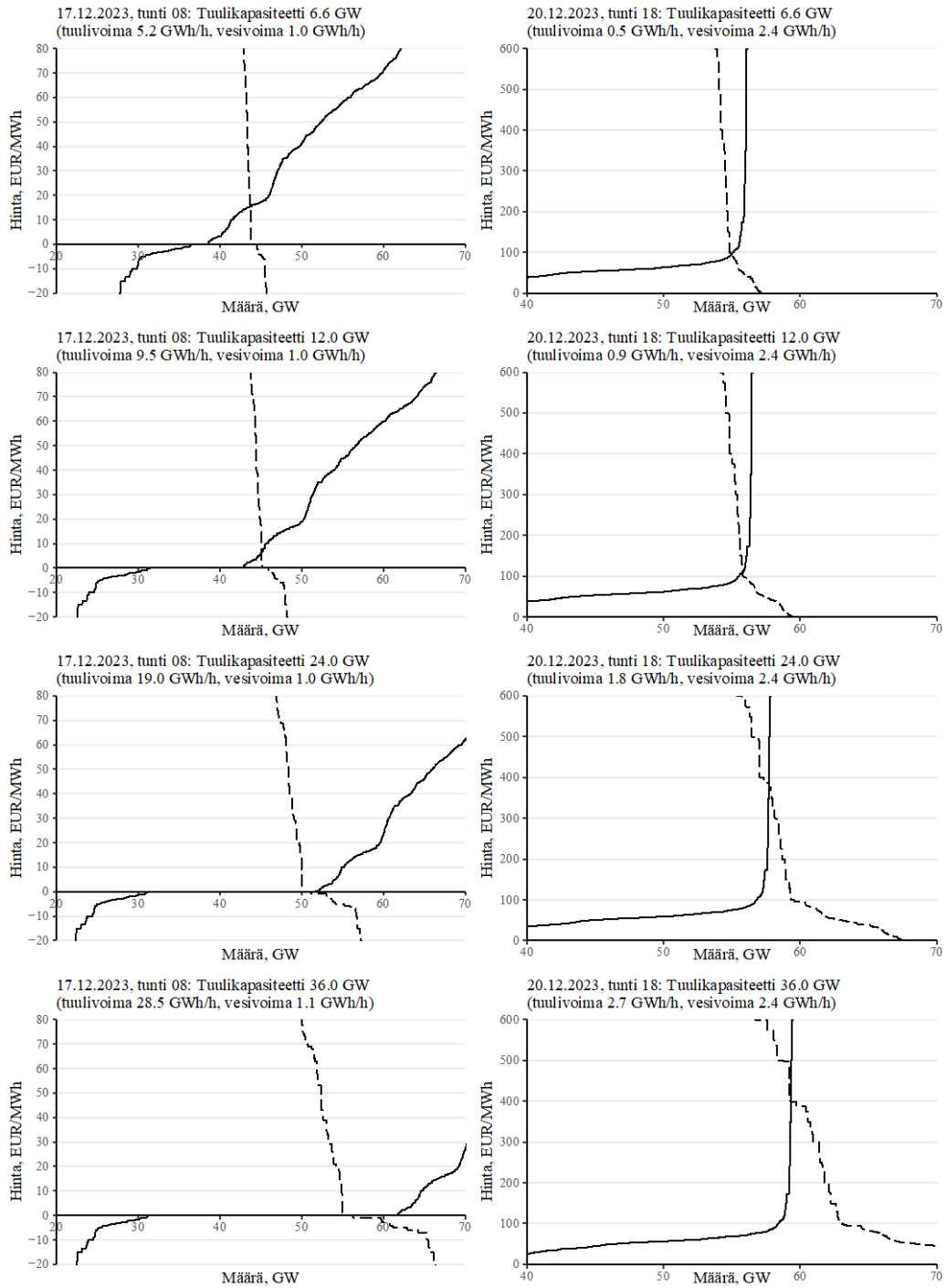
## Luku 5: Laskentamallien kuvaukset

Spot-markkinan mallinnuksessa käytetyt laskentamenetelmät on dokumentoitu yksityiskohtaisesti aiemmassa tutkimuksessa (Vehviläinen, 2023), eikä niitä toisteta tässä. Viitatus tutkimuksen kautta on saatavilla myös replikaatiokoodit, joiden avulla voidaan toistaa vastaavia laskelmia, kuin mitä tässä selvityksessä on tehty. Kaikkia lähtötietoja ei voida luovuttaa suoraan eteenpäin, koska tiedot on hankittu Nord Poolin ylläpitämästä maksullisesta tietokannasta.

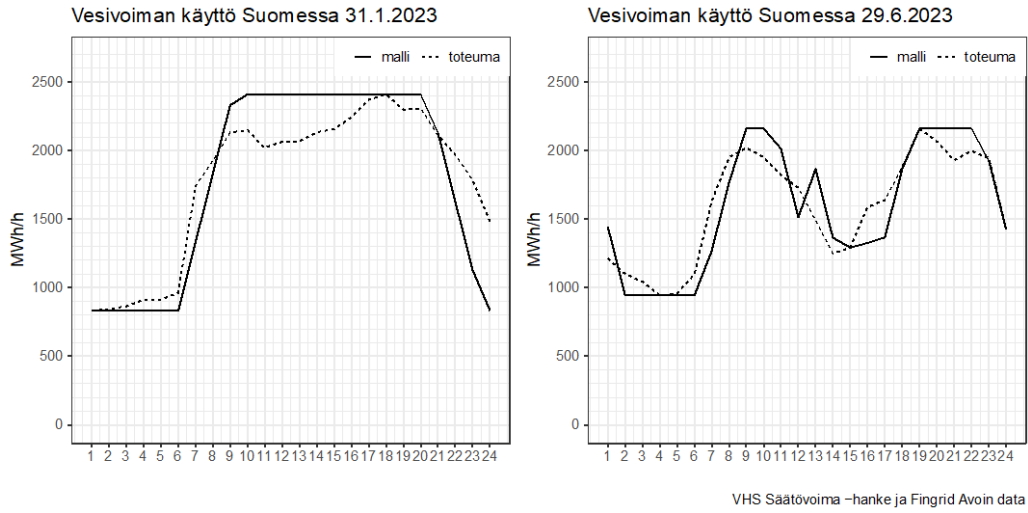
Kuvassa L.1 havainnollistetaan tuulivoiman ja kulutuksen lisääntymisen vaikutusta laskennassa käytettyihin tarjontakäyriin kahden eri tunnin aikana. Tuulivoiman lisääntymisen on mallinnettu nollahintaisena tarjouksena, joka siirtää tarjontakäyrää oikealle. Kun tuulta on historiallisesti ollut paljon (vasemman puolen kuvat), muutos on suurempi, kuin tilanteessa, jossa tuulta on ollut vähän (oikean puolen kuvat). Samassa kuvassa näkyy myös joustavan kysynnän skaalaamisen vaikutus kokonaiskysyntäkäyrään.

Kuvassa L..2 esitetään esimerkki spot-markkinamallissa käytetystä suomalaisen vesivoiman kokonaistuotannon optimoinnista. Vesivoiman tuotannon ala- ja ylärajat luetaan kunkin päivän tuotantotiedoista, samaten kuin vesivoiman kokonaistuotantomäärä. Lisäksi vesivoiman tunneittaista muutosta rajoitetaan välille  $\pm 500$  MWh/h, mikä vastaa historiallista vaihteluväliä. Kuvassa esitetään replikaatio vuoden 2023 tilanteesta kahden päivän aikana, jotka kuvastavat tyypillistä vesivoiman tuotannon vaihtelua. Kuvan laskennassa kysyntä- ja tarjontakäyrät vastaavat suoraan vuoden 2023 dataa ja vesivoiman tuotantomahdollisuuksia ei ole rajoitettu vesienhoidon toimenpiteiden seurauksena.

**Kuva L.1.** Tarjontakäyrien muokkaaminen skenaarioissa tuulivoiman ja joustavan kysynnän mukaan.



**Kuva L.2.** Vesivoiman optimointi.



## Lähteet

- AFRY (2020). Ympäristövirtaamaselvitys. Saatavilla: <https://energia.fi/julkaisut/ymparistovirtaamaselvitys-afry-2020/>
- AFRY Management Consulting Oy (2023). Kapasiteettiratkaisujen arviointi sähkön riittävyyden arvioimiseksi Suomessa. Viitattu 20.9.2024 [kapasiteettiratkaisujen\\_arviointi\\_sahkonriittavyyden\\_varmistamiseksi\\_suomessa.pdf \(afry.com\)](#)
- Ambec, S. ja Doucet, J.A., 2003. Decentralizing hydro power production. *Canadian Journal of Economics/Revue canadienne d'économique*, 36(3), pp.587-607.
- Andrés-Cerezo, D. ja Fabra, N., 2023. Storing power: Market structure matters. *The RAND Journal of Economics*, 54(1), pp.3-53.
- Aronsoo, K., Vikström, R., Marjomäki, T.J., Wennman, K., Pakkala, J., Mäenpää, E., Tuohino, J., Sarell, J., Ojutkangas, E. 2019. Rehabilitation of two northern river lamprey (*Lampetra fluviatilis*) populations impacted by various anthropogenic pressures – lessons learnt in the past three decades. Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 2/2019.
- Aroviita, J., Mitikka, S., Vienonen, S., 2019. Pintavesien tilan luokittelu ja arviointiperusteet vesienhoidon kolmannella kaudella. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 37/2019.
- Arthington, A.H., Kennen, J.G., Stein, E.D., Webb, J. A. 2018. Recent advances in environmental flows science and water management—Innovation in the Anthropocene. *Freshwater Biology* 63: 1022-1034. DOI: 10.1111/fwb.13108
- ARVOVESI, 2022. Vesivoimakatsaus – vesivoiman toimintaympäristö Suomessa ja Oulujoen vesistöalueella. ARVOVESI-hankkeen raportti 3/2022. Saatavilla: <https://oulujokivisio.com/aineistot/>
- Ashraf, F. B., Haghighi, A. T., Riml, J., Alfredsen, K., Koskela, J. J., Kløve, B., & Marttila, H. 2018. Changes in short term river flow regulation and hydropeaking in Nordic rivers. *Scientific Reports* 8: 17232. doi:10.1038/s41598-018-35406-3
- Auer, S., Zeiringer, B., Führer, S., Tonolla, D., Schmutz, S. 2017. Effects of river bank heterogeneity and time of day on drift and stranding of juvenile European grayling (*Thymallus thymallus* L.) caused by hydropeaking. *Science of the Total Environment* 575, 1515–1521. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.029>

- Bakken, T., Aase, A., Hagen, D., Sundt, H., Barton, D., Lujala, P., 2014. Demonstrating a new framework for the comparison of environmental impacts from small- and large-scale hydropower and wind power projects. *Journal of Environmental Management* 140C, s. 93–101.
- Bakken, T., H., Harby, A., Forseth, T. Ugedal, O., Sauterleute, J.,F., Halleraker, J. H., Alfredsen, K. 2023. Classification of hydropeaking impacts on Atlantic salmon populations in regulated rivers. *River Research and Applications* 39: 313-325. DOI: 10.1002/rra.3917
- Baladrón, A., Bejarano, M. D., Sarneel, J. M., Boavida, I. 2022. Trapped between drowning and dessication: Riverine plants under hydropeaking. *Science of The Total Environment* 829, 154451.
- Bejarano, M.D., Jansson, R., Nilsson, C. 2018. The effects of hydropeaking on riverine plants: a review. *Biological Reviews* 93, 658–673. doi: 10.1111/brv.12362
- Belinskij, A., Aroviita, J., Kauppila, J., Kymenvaara, S., Leino, L., Mäenpää, M., Raitanen, E., Soininen, N., 2018. Vesienhoidon ympäristötavoitteista poikkeaminen – perusteet ja menettely. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 42/2018.
- Belinskij, A., Hepola, M., Hollo, E., Kauppila, J., Mäenpää, M., Määttä, T., Römpötti, E., Valve, H., – Soininen, N., 2019. Ympäristöllisten lupien muuttaminen vesienhoidon ympäristötavoitteiden perusteella – Lainsäädännön kehittäminen ja sen valtiosääntöoikeudelliset perusteet. LupaMuutos-hankkeen loppuraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 26/2019.
- Bejarano, M.D., Sordo-Ward, Á., Alonso, C., Jansson, R., Nilsson, C. 2020. Hydropeaking affects germination and establishment of riverbank vegetation. *Ecological Applications* 30, e02076.
- Becker, C.D., Neitzel, D.A., 1985. Assessment of intergravel conditions influencing egg and alevin survival during salmonid redd dewatering. *Environ. Biol. Fish* 12, 33–46.
- Bjørnås, K. L., Railsback, S. F., Calles, O., & Piccolo, J. J. (2021). Modeling Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*S. trutta*) population responses and interactions under increased minimum flow in a regulated river. *Ecological Engineering*, 162, 106182. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106182>
- Bohn, R.E., Caramanis, M.C. ja Schweppe, F.C., 1984. Optimal pricing in electrical networks over space ja time. *The Rand Journal of Economics*, pp.360-376.

Bond, M.J., Jones, N.E., Haxton, T.J. 2016. Growth and life history patterns of a small-bodied stream fish, *Cottus cognatus*, in hydropeaking and natural rivers of northern Ontario. *River Research and Applications* 32, 721–733. doi: 10.1002/rra.2886

Bondar-Kunze, E., Maier, S., Scönauer, D., Bahl, N., Hein, T. 2016. Antagonistic and synergistic effects on a stream periphyton community under the influence of pulsed flow velocity increase and nutrient enrichment. *Science of the Total Environment* 573, 594–602. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.158>

Borenstein, S. ja Bushnell, J., 2015. The US electricity industry after 20 years of restructuring. *Annu. Rev. Econ.*, 7(1), pp.437-463.

Borenstein, S., Bushnell, J.B. ja Wolak, F.A., 2002. Measuring market inefficiencies in California's restructured wholesale electricity market. *American Economic Review*, 92(5), pp.1376-1405.

Bradford, M.J., 1997. An experimental study of stranding of juvenile salmonids on gravel bars and in sidechannels during rapid flow decreases. *Regul. Rivers*. 13:395–401. [http://dx.doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1646\(199709/10\)13:5b395::aid-rrr464N3.0.co; 2-I](http://dx.doi.org/10.1002/(sici)1099-1646(199709/10)13:5b395::aid-rrr464N3.0.co; 2-I).

Bruegel, 2023. National fiscal policy responses to the energy crisis. Saatavilla: <https://www.bruegel.org/dataset/national-policies-shield-consumers-rising-energy-prices>.

Bruno, M.C., Cashman, M.J., Maiolini, B., Biffi, S. Zolezzi, G. 2016. Responses of benthic invertebrates to repeated hydropeaking in semi-natural flume simulations. *Ecology* 9, 68–82. doi: 10.1002/eco.1611

Bruno, M.C., Vallefucio, F., Casari, A., Larsen, S., Dallafior, V., Zolezzi, G. 2023. Moving waters to mitigate hydropeaking: A case study from the Italian Alps. *River Research and Applications* 39, 570–587. doi: 10.1002/rra.4086

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023. Energie in Österreich Zahlen, Daten, Fakten. Ladattavissa: <https://www.bmk.gv.at/themen/energie/publikationen/zahlen.html>

Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, 2020a. Leitfaden zur Ableitung und Bewertung des ökologischen Potentials bei erheblich veränderten Wasserkörpern. <https://info.bml.gv.at/dam/jcr:94bddc31-4431-425f-83c0-748439bae762/20210104%20Leitfaden%20zur%20Bewertung%20des%20guten%20C3%B6kologischen%20Potentials%20%20gsb.pdf>

Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, 2020b. Methodik zur Ausweisung von künstlichen und erheblich veränderten Wasserkörpern. [https://info.bml.gv.at/dam/bm/themen/wasser/wisa/ngp/ngp-2021/hintergrunddokumente/methodik/hmwb\\_2021/20201109-Ausweisung-HMWB\\_gsb.pdf](https://info.bml.gv.at/dam/bm/themen/wasser/wisa/ngp/ngp-2021/hintergrunddokumente/methodik/hmwb_2021/20201109-Ausweisung-HMWB_gsb.pdf)

Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, 2021. Forschungsbericht SuREmMa+ Entwicklung einer Methode zur ökologischen und energiewirtschaftlichen Bewertung von Maßnahmen zur Minderung von negativen schwall- und sunkbedingten ökologischen Auswirkungen. <https://info.bml.gv.at/dam/jcr:5ea8540e-c86e-4079-8524-9b55fd9eeac7/20210201%20SuREmMa+%20gsb.pdf>

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, 2015 (LAWA 2015). Ständiger Ausschuss "Oberirdische Gewässer und Küstengewässer". [https://www.wasserblick.net/servelet/is/142651/WRRL%202.4.1\\_HMWB%20-%20Aktualisierung%2008-2015\\_final.pdf?command=downloadContent&filename=WRRL%202.4.1\\_HMWB%20-%20Aktualisierung%2008-2015\\_final.pdf](https://www.wasserblick.net/servelet/is/142651/WRRL%202.4.1_HMWB%20-%20Aktualisierung%2008-2015_final.pdf?command=downloadContent&filename=WRRL%202.4.1_HMWB%20-%20Aktualisierung%2008-2015_final.pdf)

Bushnell, J., 2003. A mixed complementarity model of hydrothermal electricity competition in the western United States. *Operations research*, 51(1), pp.80-93.

Casas-Mulet, R., Saltveit, S. J., & Alfredsen, K. 2015. The survival of Atlantic salmon (*Salmo salar*) eggs during dewatering in a river subjected to hydropeaking. *River Research and Applications* 31(4): 433–446. doi: 10.1002/rra.2827

Charmasson, J., & Zinke, P. 2011. Mitigation measures against hydropeaking effects: A literature review. SINTEF Energy Research, Report Project 12X67351

Chen, Y.K., Hexeberg, A., Rosendahl, K.E. ja Bolkesjø, T.F., 2021. Long-term trends of Nordic power market: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 10(6).

Cicala, S., 2022. Imperfect markets versus imperfect regulation in US electricity generation. *American Economic Review*, 112(2), pp.409-441.

Cole, W. ja Karmakar, A., 2023. *Cost projections for utility-scale battery storage: 2023 update* (No. NREL/TP-6A40-85332). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

Corey, G.D., Moore, M.J., Sievert, N.A., Paukert, C.P. ja DiStefano, R.J. 2021. Co-occurring lotic crayfishes exhibit variable long-term responses to extreme-flow events and temperature. *Freshwater Science* 40(4): 626-643.

Danish Energy Agency, 2023. Technology Data - Energy Plants for Electricity and District heating generation. First published August 2016 by the Danish Energy Agency and Energinet, version number 0013.

de Souza, J. Marques, ja M. V. Pereira. 1984. Chapter 8 Hydropower System Planning. Teoksessa *Expansion Planning for Electrical Generating Systems - A Guidebook*, ed. W. Buehring, C. Huber ja J. Marques de Souza, 303–336. International Atomic Energy Association.

Elgueta, A., Górski, K., Thoms, M., Fierro, P., Toledo, B., Manosalva, A. ja Habit, E., 2021. Interplay of geomorphology and hydrology drives macroinvertebrate assemblage responses to hydropeaking. *Science of The Total Environment*, 768, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144262>

Energiavirasto (2023), Valvontamenetelmät, Sähkön kantaverkkotoiminta, Dnro 3172(040300/2023.

Energiavirasto 2024. National Report on the state electricity and gas markets in Finland to the European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators and to the European Commission Year 2023. [National Report on electricity and gas markets in Finland - year 2021 \(energiavirasto.fi\)](#) Viitattu 22.9.2024

Energimyndigheten (SEA), Svenska kraftnät och Havs- och vattenmyndigheten (HaV), 2016. Vattenkraftens reglerbidrag och värde för elsystemet: Rapport från Energimyndigheten, Svenska kraftnät och Havs- och vattenmyndigheten. ER 2016:11.

Energimyndigheten (SEA), 2022. Fortsatt hög Elproduktion och Elexport under 2021. <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2022/fortsatt-hog-elproduktion-och-el-export-under-2021>

Energimyndigheten (SEA) och Havs- och Vattenmyndigheten (HaV), 2014. Strategi för åtgärder i vattenkraften: Avvägning mellan energimål och miljö kvalitetsmålet: Levande sjöar och vattendrag. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2014:14.

Energinet, Fingrid, Statnett, and Svenska kraftnät (2023) Solutions for a clean Nordic energy system 2024 - 2030 Strategies to meet the climate and security challenge. [nordic-tso-strategy-incl.-implementation-plan---final.pdf](#)

Eriksson, R., Modig, N. ja Elkington, K., 2018. Synthetic inertia versus fast frequency response: a definition. *IET renewable power generation*, 12(5), pp.507-514.

Euroopan komissio

- Komissio 2003. CIS guidance Document no. 4. Identification and Designation of Heavily Modified and Artificial Water Bodies.
- Komissio 2009. CIS guidance Document no. 20. Guidance Document on Exemptions to the Environmental Objectives. Technical Report - 2009 – 027.
- Komissio 2015. CIS guidance Document no. 31. Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive. Technical Report - 2015 – 086
- Komissio 2017. CIS guidance Document no. 36. Exemptions to the Environmental Objectives according to Article 4(7). New modifications to the physical characteristics of surface water bodies, alterations to the level of groundwater, or new sustainable human development activities.
- Komissio 2018a. Managing Natura 2000 sites — The provisions of Article 6 of the Habitats Directive 92/43/EEC. C (2018) 7621 final.
- Komissio 2018b. Komission tiedonanto: Ohjeasiakirja vesivoimaa koskevista vaatimuksista EU:n luontolainsäädännön valossa. C (2018) 213/01.
- Komissio 2018c. Komission perusteltu lausunto 25.1.2018, dnr UD2018/01748/RS.
- Komissio 2019a. SWD(2019) 41 final. Commission Staff Working Document: Second River Basin Management Plans - Member State: Germany Accompanying the document Report from The Commission to the European Parliament and the Council on the implementation of the Water Framework Directive (2000/60/EC) and the Floods Directive (2007/60/EC) Second River Basin Management Plans First Flood Risk Management Plans.

- Komissio 2019b. SWD(2019) 36 final. Commission Staff Working Document: Second River Basin Management Plans - Member State: Austria Accompanying the document Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the implementation of the Water Framework Directive (2000/60/EC) and the Floods Directive (2007/60/EC) Second River Basin Management Plans First Flood Risk Management Plans.
- Komissio 2019c. SWD(2019) 47 final. Commission Staff Working Document: Second River Basin Management Plans - Member State: France Accompanying the document Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the implementation of the Water Framework Directive (2000/60/EC) and the Floods Directive (2007/60/EC) Second River Basin Management Plans First Flood Risk Management Plans.
- Komissio 2020. CIS guidance Document no. 37. Steps for defining and assessing ecological potential for improving comparability of Heavily Modified Water Bodies.
- Komissio 2022. SWD(2022) 601 final. Commission Staff Working Document 2022 Country Report - Austria Accompanying the document Recommendation for a Council Recommendation on the 2022 National Reform Programme of Austria and delivering a Council opinion on the 2022 Stability Programme of Austria.
- Komissio 2023. Commission staff working document, SWD(2023) 57 final. Energy Storage - Underpinning a decarbonised and secure EU energy system [[https://energy.ec.europa.eu/document/download/12624902-59aa-483f-ade8-d5861181fdd3\\_en?filename=SWD\\_2023\\_57\\_1\\_EN\\_document\\_travail\\_service\\_part1\\_v6.pdf](https://energy.ec.europa.eu/document/download/12624902-59aa-483f-ade8-d5861181fdd3_en?filename=SWD_2023_57_1_EN_document_travail_service_part1_v6.pdf)]

Fabra, N., 2021. The energy transition: An industrial economics perspective. *International Journal of Industrial Organization*, 79, p.102734.

Fingrid, 2022a. Raportti reservimarkkinoiden tarjonnasta ja hankinnasta on julkaistu. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2022/raportti-reservimarkkinoiden-tarjonnasta-ja-hankinnasta-teknologioittain-on-julkaistu/>

Fingrid, 2022b. Tuulivoiman osallistuminen reservimarkkinoille. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/tuulivoima-reservimarkkinoilla.pdf>

Fingrid, 2023. *Fingridin sähköjärjestelmävisio 2023*.

Fingrid, 2023b. Fingrid jatkaa sähköjärjestelmän vapaaehtoisen tuen menettelyä keväälle 2024. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2023/fingrid-jatkaa-sahkojarjestelman-vapaaehtoisen-tuen-menettelya-kevaalle-2024/>

Fingrid, 2024. Kantaverkkoyhtiön lehti. 1/2024. Saatavilla: [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/asiakaslehdet/fingrid\\_1\\_2024.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/asiakaslehdet/fingrid_1_2024.pdf)

Fingrid, 2024b. Kantaverkkoyhtiön lehti 2/2024. Saatavilla: [fingrid\\_2\\_2024\\_300524.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/asiakaslehdet/fingrid_2_2024_300524.pdf)

Forseth, T., and A. Harby. 2014. Handbook for environmental design in regulated salmon rivers. Norwegian Institute for Nature Research NINA Special Report 53. ISBN 978-82-426-2638-7, Trondheim, Norway. (Available from: <http://www.nina.no/archive/nina/PPPBasePdf/temahefte/053.pdf>)

Forsman, J. Närhi, J., Uimonen, H., Semkin, N., Miettinen, V., Toivola, S. (2021). Hiili-neutraalisuus[1]tavoitteen vaikutukset sähköjärjestelmään. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:4. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-029-5>  
Gonzales, L.E., Ito, K. ja Reguant, M., 2023. The investment effects of market integration: Evidence from renewable energy expansion in Chile. *Econometrica*, 91(5), pp.1659-1693.

Gerlagh, R., Liski, M. ja Vehviläinen, I., 2022. *Rational Rationing: A Price-Control Mechanism for a Persistent Supply Shock*. MIT Center for Energy and Environmental Policy Research.

Graf, C., Quaglia, F. ja Wolak, F.A., 2021. Simplified market mechanisms for non-convex markets: Evidence from Italian electricity market. *Mimeo*.

Hajiesmaeili, M., Addo, L., Watz, J., Railsback, S.F. & Piccolo, J., J. 2023. Individual-based modelling of hydropeaking effects on brown trout and Atlantic salmon in a regulated river. *River Research and Applications* 39: 522-537. DOI: 10.1002/rra.4037

Hallituksen esitys HE 17/1994 vp laiksi vesilain muuttamisesta.

Halleraker, J.H., Saltveit, S.J., Harby, A., Arnekleiv, J.V., Fjeldstad, H.-P., Kohler, B., 2003. Factors influencing stranding of wild juvenile brown trout (*Salmo trutta*) during rapid and frequent flow decreases in an artificial stream. *River Research and Applications* 19, 589–603. <https://doi.org/10.1002/rra.752>.

Halleraker, J.H., Sundt, H., Alfredsen, K.T. ja Dangelmaier, G. 2007. Application of multiscale environmental flow methodologies as tools for optimized management of a Norwegian regulated national salmon watercourse. *River Research and Applications*, 23, 493-510.

Harby, A., Alfredsen, K.T., Fjeldstad, H.P., Halleraker, J.H., Arnekleiv, J.V., Borsányi, P., Flodmark, L. E., W., Saltveit, S.J., Johansen, S.W., Vehanen, T., Huusko, A.,

Havs- och Vattenmyndigheten (HaV), 2016. Vägledning för kraftigt modifierat vatten: Fastställande av kraftigt modifierat vatten i vattenförekomster med vattenkraft.

Havs- och Vattenmyndigheten (HaV), 2019. Towards Sustainable Hydropower in Sweden. <https://www.havochvatten.se/en/eu-and-international/towards-sustainable-hydropower-in-sweden.html> (tarkistettu 7.8.2024)

Clarke, K. & Scruton, D. A., 2001. Ecological impacts of hydro peaking in rivers. Teoksessa: *Hydropower in the New Millennium*. Honningsvåg et al. (eds). CRC Press. eBook ISBN9781003078722

Hedger, R. G., Sundt-Hansen, L., E., Juarez-Gomez, A., Alfredsen, K., Foldvik, A. 2023. Exploring sensitivities to hydropeaking in Atlantic salmon parr using individual-based modelling. *Ecohydrology*. 2023;e2553. DOI: 10.1002/eco.2553

Heikkilä, M. [@Mikko\_Heikkila], 2024. Suomessa on käynnissä valtava investointibuuri sähkökattiloihin. Investointipäätöksiä tehty parisenkymmentä, uutta joustavaa sähkönkulutusta tulossa nopealla aikataululla noin 1,5 GW. Kaukolämmöntuotanto sähköistyy ja puhdistuu nopeasti. X. [https://twitter.com/Mikko\\_Heikkila/status/1750049482446635087](https://twitter.com/Mikko_Heikkila/status/1750049482446635087)

Hiltunen E., Tolonen R., Kaski O. & Oikarinen J. 2013. Nahkiainen –Perämeri, Tornio-Kokkola alue. Nahkiainen ennen, nyt ja tulevaisuudessa -hanke, li. 60 s. <https://ka-laaiista.fi/wp-content/uploads/2019/01/2013-NAHKAINEN-ENNEN-NYT-JA-TULEVAISUUDESSA-hanke-loppuselvyys.pdf>

Hirth, L. ja Ziegenhagen, I., 2015. Balancing power and variable renewables: Three links. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1035 – 1051.

Huusko, R., Orell, P., Jaukkuri, M., Sutela, T., van der Meer, O., Lahti, M., Erkinaro, J. & Mäki-Petäys, A. 2018. Lohikalojen alasvaellus lijoessa: Tutkimustuloksia ja alasvaellusreittien yleissuunnitelma. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 45/2018, Luonnonvarakeskus.

Huusko, R., Orell, P., Jaukkuri, M., Mäki-Petäys, A. & Erkinaro, J. 2014. Lohen vaelluspoikasten alasvaellus rakennetuissa joissa – ongelmat ja ratkaisumahdollisuudet. RKTL:n työraportteja 8/2014. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos.

Huusko, R., Hellström, G., Jaukkuri, M., Palm, S. & Romakkaniemi, A. 2023. Spawning migration of salmon and sea trout in the Tornionjoki river. *Natural resources and bioeconomy studies* 29/2023.

Härkönen, L.S., Hyvärinen, P., Rinnevali, R., van der Meer, O., Orell, P., Veneranta, L., Erkinaro, J. & Louhi, P. 2023. Kalastonhoidon kehittäminen Oulujoen vesistöissä. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 47/2023, Luonnonvarakeskus, Helsinki.

IEA 2022. Global EV outlook 2022. [<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>]

IEA, 2024. Batteries and Secure Energy Transitions, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>, Licence: CC BY 4.0

Iho, A., Soininen, N., Vehviläinen, I., Koljonen, S., Artell, J., Belinskij, A., 2023. Rivers under pressure: Interdisciplinary feasibility analysis of sustainable hydropower. *Environmental Policy and Governance* 33(2), s. 191–205.

Immendoerfer, A., Tietze, I., Hottenroth, H., Viere, T., 2017. Life-Cycle Impacts of Pumped Hydropower Storage and Battery Storage. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 8, s. 231–245.

IRENA 2020. Innovation landscape brief: Innovative operation of pumped hydropower storage. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Saatavilla: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA\\_Innovative\\_PHS\\_operation\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Innovative_PHS_operation_2020.pdf)

Ito, K. ja Reguant, M., 2016. Sequential markets, market power, and arbitrage. *American Economic Review*, 106(7), pp.1921-1957.

Jansson, R., Nilsson, C., Renöfält, B. 2000. Fragmentation of riparian floras in rivers with multiple dams. *Ecology* 81, 899–903

Jelovica, B., Marttila, H., Ashraf, F.B., Kløve, B., Haghghi, A.T. 2023. A probability-based model to quantify the impact of hydropeaking on habitat suitability in rivers. *River Research and Applications* 39: 490-500. DOI: 10.1002/rra.4050

- Josefsson, H., 2018. The Environmental Liability Directive, the Water Framework Directive and the Definition of 'Water Damage'. *Environmental Law Review* 20(3), s. 151–162.
- Joskow, P.L., 2008. Lessons learned from electricity market liberalization. *The Energy Journal*, 29, pp.9-42.
- Joskow, P. ja Tirole, J., 2007. Reliability and competitive electricity markets. *The RAND Journal of Economics*, 38(1), pp.60-84.
- Kauppi, O. ja Liski, M., 2008. *An empirical model of imperfect dynamic competition and application to hydroelectricity storage*. MIT Center for Energy and Environmental Policy Research.
- Kelly, B., Smokorowski, K.E., Power, M. 2017. Impact of river regulation and hydropowering on the growth, condition and field metabolism of Brook Trout (*Salvelinus fontinalis*). *Ecology of the Freshwater Fish* 26, 666–675.
- van Kempen, J., 2012. Countering the Obscurity of Obligations in European Environmental Law: An Analysis of Article 4 of the European Water Framework Directive. *Journal of Environmental Law* 24(3), s. 499–533.
- Kennedy, T. A., Muehlbauer, J. D., Yackulic, C. B., Lytle, D. A., Miller, S. W., Dibble, K. L., Kortenhoeven, E. W., Metcalfe, A. N., & Baxter, C. V. 2016. Flow management for hydropower extirpates aquatic in-sects, undermining river food webs. *BioScience* 66(7): 561–575. doi:10.1093/biosci/biw059
- Kjærstad, G., Arnekleiv, J.V., Speed, J.D.M ja Herland, A.K. 2018. Effects of hydropowering on benthic invertebrate community composition in two central Norwegian rivers. *River Research and Applications*, 34(3), 218-231 Klæboe, G., Braathen, J., Eriksrud, A.L. et al., 2022. Day-ahead market bidding taking the balancing power market into account. *TOP*, 30, 683–703. <https://doi.org/10.1007/s11750-022-00645-1>
- Kreps, D.M., 2013. *Microeconomic foundations* (Vol. 1). Princeton university press.
- Koljonen, S., Ahopelto, L., Hellsten, S., Olin, S., & Keto, A. 2016. Ympäristövirtaaman määrittäminen erityyppisissä jokivesistöissä. Suomen ympäristökeskus, loppuraportti.

Koljonen, S., Maunula, M., Artell, J., Belinskij, A., Hellsten, S., Huusko, A., Marttunen, M., Mustajoki, J., Mäki-Petäys, A., Rotko, P., Soininen, N., & Vehanen, T. 2017. Vaelluskalakantojen elvyttäminen – ympäristövirtaama ja muut ratkaisut. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 69/2017. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-461-0>

Korman, J. ja Campana, S.E. 2009. Effects of hydropeaking on nearshore habitat use and growth of Age-0 rainbow trout in a large regulated river. *Transactions of the American Fisheries Society* 138:76–87

Kymenvaara, S., Baaner, L., Anker, T., A., Leino, L., Belinskij, A., 2019. Variations on the same theme: Environmental objectives of the Water Framework Directive in environmental permitting in the Nordic countries. *Review of European, Comparative & International Environmental Law* 28(2), s. 197–209.

Laine, A., Aronsuu, K., Ekholm-Peltonen, M., Heikkinen, M., Helin, M., Hentilä, H., Rintala, J., Tertsunen, J., Tuohino, J., Virtanen, K., 2022. Oulujoen–Iijoen vesienhoitoalueen vesienhoitosuunnitelma vuosille 2022–2027: Osa 1: Vesienhoitoaluekohtaiset tiedot. Pohjois-Pohjanmaan, Kainuun ja Lapin elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukset, raportteja 8/2022.

Lazard, 2003. Levelized Cost of Energy Analysis, Version 16.0, 4/2023.

Lindström, A., Ruud, A., 2017. Swedish hydropower and the EU Water Framework Directive. Stockholm Environment Institute, Project Report 2017-01.

Liski, M. ja Vehviläinen, I., 2020. Gone with the wind? An empirical analysis of the equilibrium impact of renewable energy. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 7(5), pp.873-900.

Liski, M. ja Vehviläinen, I., 2023. *Redistribution through technology: Equilibrium impacts of mandated efficiency in three electricity markets*. MIT Center for Energy and Environmental Policy Research.

Louhi, P., Huusko, A., Huusko, R., Janhunen, M., Orell, P., Syrjänen, J., Härkönen, L.S. & Veneranta, L. 2024. Rakennettujen jokien vaelluskalakantojen hoitotoimenpiteet. Sateenvarjo III -hankkeen loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 55/2024, Luonnonvarakeskus.

Lund, P.D., Lindgren, J., Mikkola, J. ja Salpakari, J., 2015. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renewable and sustainable energy reviews*, 45, pp.785-807.

Lundin, E. ja Tangerås, T.P., 2020. Cournot competition in wholesale electricity markets: The Nordic power exchange, Nord Pool. *International Journal of Industrial Organization*, 68, p.102536.

Lundin, E., 2022. Geographic price granularity and investments in wind power: Evidence from a Swedish electricity market splitting reform. *Energy Economics*, 113, p.106208.

Lönnberg, J. ja Bladh, J., 2016. Relative balancing contribution of hydropower plants and rivers. Revision 2. Vattenfall R&D. Report number VRD-R19:2015-Rev2.

Magoulick, D.D. & Kobza, R.M. (2003). The role of refugia for fishes during drought: A review and synthesis. *Freshwater Biology*, 48(7), 1186–1198.  
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2003.01089.x>

Madsen, J.D., Chambers, P.A., James, W.F., et al., 2001. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia* 444, 71–84. <https://doi.org/10.1023/A:1017520800568> (2001).

Mas-Colell, A., Whinston, M.D. ja Green, J.R., 1995. *Microeconomic Theory*. New York: Oxford University Press.

Massey Jr, F.J., 1951. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American statistical Association*, 46(253), pp.68-78.

Mathiesen, L., Skaar, J. ja Sørsgard, L., 2013. Electricity production in a hydro system with a reservoir constraint. *The Scandinavian Journal of Economics*, 115(2), pp.575-594.

Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, 2006. La désignation des masses d'eau fortement modifiées (MEFM) et des masses d'eau artificielles (MEA) Guide technique : Document final 15/02/2006. [https://rapportage.eafrance.fr/sites/default/files/DCE/2016/documents/FRN\\_Guide-MEFM-2006.pdf](https://rapportage.eafrance.fr/sites/default/files/DCE/2016/documents/FRN_Guide-MEFM-2006.pdf)

Ministre de la Transition écologique, 2021. Chiffres clés des énergies renouvelables - Édition 2021. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energies-renouvelables-2021/10-hydraulique-renouvelable>

Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2023. Guide relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux, plans d'eau). Ladattavissa : <https://www.eaufrance.fr/publications/guide-relatif-levaluation-de-letat-des-eaux-de-surface-continentales-2023-4e-cycle>

Ministere de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2024. Hydroélectricité. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/hydroelectricite>

Moog, O. 1993. Quantification of daily peak hydropower effects on aquatic fauna and management to minimize environmental impacts. *Regulated Rivers: Research & Management* 8, 5-14.

Moreira, M. Hayes, D.S, Boevida, I., Schletterer, M., Schmutz, S., Pinheiro, A. 2019. Ecologically-based criteria for hydropowering mitigation: A review. *Science of the Total Environment* 657, 1508–1522.

Ojutkangas, E., Aronen, K., Laukkanen, E. 1995. Distribution and abundance of river Lamprey (*Lampetra fluviatilis*) ammocoetes in the regulated river Perhonjoki. *River Research and Applications* 10, 239-245. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450100218>

Parasiewicz, P., Schmutz, S., Moog, O. 1998. The effect of managed hydropower peaking on the physical habitat, benthos and fish fauna in the River Bregenzerach in Austria. *Fisheries Management and Ecology*, 5 403–417

Pihalehto, M., Puharinen, S-T., 2023. Uncharted Interplay and Troubled Implementation: Managing Hydropower's Environmental Impacts under the EU Water Framework and Environmental Liability Directives. *Journal of Environmental Law* 36(1), s. 43–66.

Pohjanen, M. 1991. Vesivoimalaitosten lyhytaikaissäädön ekologiset vaikutukset – kirjallisuusselvitys. T&K tiedotteita, IVO-B-01/91. Imatran Voima Oy.

Puffer, M., Berg, O.K., Huusko, A., Vehanen, T., Forseth, T. ja Einum, S. Seasonal effect of hydropowering on growth, energetics and movement of juvenile Atlantic Salmon (*Salmo Salar*). *River Research and Applications*, 31: 1101–1108

Puharinen, S-T., 2017. Vesienhoidon ympäristötavoitteiden vaikutus ympäristöluvan ja vesitalousluvan pysyvyyteen. *Edilex* 8.12.2017.

Puharinen, S-T., Belinskij, A., Soininen, N., 2024. Adapting Hydropower to European Union Water Law: Flexible Governance versus Legal Effectiveness in Sweden and Finland. *Transnational Environmental Law* 13(1), s. 160–189.

Puharinen, S-T., Hakkarainen, M., Belinskij, A., 2021. Suomen merenhoitolainsäädännön toimivuustarkastelu – Merenhoidon tavoitteet ja niistä poikkeaminen. Ympäristöministeriön julkaisuja 2021:14.

Puller, S.L., 2007. Pricing and firm conduct in California's deregulated electricity market. *The Review of Economics and Statistics*, 89(1), pp.75-87.

Pursiainen, M., Westman, K., 1982. The restoration of the crayfish (*Astacus astacus*) in river Siikajoki, Finland. EIFAC Technical Paper No. 42. S 412-421.

Pöyry, 2018a. Demand and supply of flexibility. Final report. Pöyry Management Consulting Oy. Saatavilla: [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/kehityshankkeet/dalyve-fingrid\\_flexibility-study\\_final-report\\_v300-id-151641.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/kehityshankkeet/dalyve-fingrid_flexibility-study_final-report_v300-id-151641.pdf)

Pöyry, 2018b. Kivihiilen käytön kieltämisen vaikutusten arviointi, raportti työ- ja elinkeinoministeriölle. Pöyry Management Consulting Oy.

Quaranta, E., Georgakaki, A., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Grabowska, M., Gea Bermudez, J. and Tattini, J., Clean Energy Technology Observatory: Hydropower and Pumped Hydropower Storage in the European Union - 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/841176, JRC134918.

Rand, J., 2018. Overlooked trade-offs of environmentally protective hydropower operation: Impacts to ancillary services and greenhouse gas emissions. *River Res Applic.*, 34, 1123– 1131.

Regeringsbeslut, 25.6.2020. Nationell Plan för Moderna Miljövillkor. <https://www.havochvatten.se/nationellplan>

Regeringens proposition, 2017/18:228. Energipolitikens inriktning.

Regeringens proposition, 2017/18:243. Vattenmiljö och vattenkraft.

Riihimäki, J., Yrjänä, T., van der Meer, O. 1996. Lyhytaikaissäädön elinympäristövaikutusten arviointimenetelmät. Luonto ja luonnonvarat. Suomen ympäristökeskus. Rinne-valli, R., ym 2024. Itämeren nahkiainen – nykytieto ja sen puutteet. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus XX/2024, Luonnonvarakeskus.

Rinnevalli, R., Artell, J., Iho, A., Konu, H., Pokki, H., Ahopelto, L., Ojanen, H., Kuoppala, M., Koljonen, S. & Louhi, P. 2021. Vaellusesteiden purkaminen osana vaelluskalojen elinympäristökunnostuksia. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 29/2021, Luonnonvarakeskus.

Roques, F., Thieis, Y.L., Aue, G., Spodniak, P., Pugliese, G., Cail, S., Peffen, A., Honkapuro, S., Sihvonen, V. (2021) Enabling cost-efficient electrification in Finland, Sitra studies 194, Sitra

Ruohomäki, J. (1984). Lyhytaikaissäätötyön vaikutus joen kasvillisuuteen. Vesihallituksen monistesarja 1984: 281. Vesihallitus. Helsinki 1984.

Räinä, P., Ylikörkkö, J., Lindholm, A., Puro-Tahvainen, A., Pasanen, J., Karjalainen, N., 2022. Kemijoen vesienhoitoalueen vesienhoitosuunnitelma vuosille 2022–2027: Osa 1. Vesienhoitoaluekohtaiset tiedot. Lapin elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus, ra-portteja 31/2022.

Saltvet, S.J., Halleraker, J.H., Arnekleiv, J.V. ja Harby, A. 2001. Field experiments on stranding in juvenile Atlantic salmon (*Salmo Salar*) and brown trout (*salmo trutta*) during rapid flow decreases caused by hydropeaking. *Regulated Rivers: Research & Management*, 17: 609–622

Schillinger, M., 2020. Balancing market design and opportunity cost: The Swiss case. *Utilities Policy*, 64, 101045.

Schmutz, S., Bakken, T.H., Friedrich, T., Greimel, F., Harby, A., Jungwirth, M., Melcher, A., Unfer, G., Zeiringer, B. 2015. Response of fish communities to hydrological and morphological rivers of Austria. *River Research and Applications*, 31, 919–930.

Schäffer, L. E., Adeva-Bustos, A., Bakken, T. H., Helseth A., Korpås, M., 2020. Modeling of Environmental Constraints for Hydropower Optimization Problems – a Review. 17th International Conference on the European Energy Market (EEM), Stockholm, Sweden, pp. 1-7.

Scruton, D.A., Pennell, C.J., Ollerhead, L.M.N., Alfredsen, K., Stickler, M., Harby, A., Robertson, M.J., Clarke, K.D., LeDrew, L.J., 2008. A synopsis of “hydropeaking” studies on the response of juvenile Atlantic salmon to experimental flow alteration. *Hydrobiologia* 609, 263–275. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9409-x>.

Seppälä, J., Tero, H., Kilpeläinen, A., Peltola, H., Pukkala, T., Sihvonen, M., Soimakallio, S., Weaver, S., Vesala, T. ja Ollikainen, M., 2022. Metsät ja ilmasto: Hakkuut, hiilinielut ja puun käytön korvaushyödyt. *Suomen ilmastopaneelin raportti 3/2022*.

Sinisalmi, T., Forsius, J., Muotka, J., Riihimäki, J., Soimakallio, H., Vehanen, T., & Yrjänä, T. 1997. Short-term regulation of hydro powerplants – Studies on the environmental effects. Imatran Voima Oy: Tutkimusraportteja, IVO-A-07/97.

Sioshansi, R., 2011. Increasing the value of wind with energy storage. *The Energy Journal*, 32(2), pp.1-30.

Sitra, Enabling cost-efficient electrification in Finland, 2021.

Skjærseth, J.B., Hansen, T., Donner-Amnell, J., Hanson, J., Inderberg, T.H.J., Nielsen, H.Ø., Nygaard, B. ja Steen, M., 2023. *Wind Power Policies and Diffusion in the Nordic Countries: Comparative Patterns*. Springer Nature.

Statens Offentliga Utredningar, 2013. Ny tid ny prövning – förslag till ändrade vattenrättsliga regler. SOU 2013:69. <https://www.regeringen.se/contentassets/8b7f91f4777141529bf0119c79feeaf0/ny-tid-ny-provning---forslag-till-andrade-vattenrattsliga-regler-sou-201369/>

Suomen ympäristökeskus, 15.3.2013. Vesienhoidon suunnittelun ohjeistus 2.kaudelle: Voimakkaasti muutettujen ja keinotekoisten pintavesien tunnistaminen ja tilan arviointi. <https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Voimakkaasti%20muutettujen%20ja%20keinotekoisten%20p.pdf>

Svenska kraftnät, 2023. Att kartlägga de konsekvenser för elsystemet som omprövning av vattenkraften medför m.m — Redovisning av regeringsuppdrag, Svk 2023/610.

Söderasp, J., Pettersson, M., 2019. Before and After the Weser Case: Legal Application of the Water Framework Directive Environmental Objectives in Sweden. *Journal of Environmental Law* 31(2), s. 265–290.

Taverny, C., Lassalle, G., Ortusi, I., Roqueplo, C., Lepage, M. & Lambert, P. 2012. From shallow to deep waters: habitats used by larval lampreys (genus *Petromyzon* and *Lampetra*) over a western European basin. *Ecology of Freshwater Fish*, 21: 87–99. DOI: 10.1111/j.1600-0633.2011.00526.x

- Tidningen Energi, 2023. Myndigheter kartlägger vattenkraftens miljöprovning. <https://www.energi.se/artiklar/2023/april--2023/myndigheter-kartlagger-vattenkraftens-miljoprovning/>
- Thorstad, E.B., Whoriskey, F., Rikardsen, A.H. & Aarestrup, K. 2011. Aquatic nomads: the life and migrations of the Atlantic salmon. Teoksessa: Aas, Ø., Einum, S., Klemetsen, A. & Skurdal, J. (eds.). *Atlantic salmon ecology*, 1: 1–32
- Tonolla, D., Dossi, F., Kastenhofer, O., Doering, M., Hauer, C., Graf, W., & Schülting, L. 2022. Effects of hydropеaking on drift, stranding and community composition of macroinvertebrates: A field experimental approach in three regulated Swiss rivers. *River Research and Applications* 39(3): 427–443. doi:10.1002/rra.4019
- Trutnevyte, E., McDowall, W., Tomei, J. and Keppo, I., 2016. Energy scenario choices: Insights from a retrospective review of UK energy futures. *Renewable and sustainable energy reviews*, 55, pp.326-337.
- Tuhtan, J.A., Noack, M. ja Wieprecht, S. 2012. Estimating stranding risk due to hydropеaking for juvenile european grayling considering river morphology. *KSCE Journal of Civil Engineering*16(2):197-206
- Turunen, J., Louhi, P., Mykrä, H., Putkonen, E., Huusko, A., Muotka, T. 2018. Combined effects of local habitat, anthropogenic stress, and dispersal on stream ecosystems: a mesocosm experiment. *Ecological Applications*, 28(6), 1606-1615.
- Turunen, J., Koljonen, S. & Hellsten, S. 2023. Ympäristövirtaaman toimeenpano – Ekologisten hyötyjen arviointiin perustuva kriteeristö ja priorisointimenetelmä. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 26/2023. Suomen ympäristökeskus.
- Umwelt Bundesamt, 2023. Nutzung der Was-serkraft. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/nutzung-der-was-serkraft#Strom>
- U.S. EIA, 2023. *Annual Energy Outlook 2023*.
- Uribe, J.M., Mosquera-López, S. ja Guillen, M., 2020. Characterizing electricity market integration in Nord Pool. *Energy*, 208, p.118368.

Vaikuta vesiin 2021. Vesienhoidon toimenpiteiden suunnittelu vuosille 2022–2027. Vesimuodostuman nimeäminen keinotekoiseksi tai voimakkaasti muutetuksi: Ohjeistus III suunnittelukierrokselle. [https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Vesimuodostumien\\_nime%C3%A4minen\\_keinotekoiseksi\\_tai\\_voimakkaasti\\_muutetuksi\\_ohjeistus\\_vuosille\\_2022-2027.pdf](https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Vesimuodostumien_nime%C3%A4minen_keinotekoiseksi_tai_voimakkaasti_muutetuksi_ohjeistus_vuosille_2022-2027.pdf)

Vehanen, T. & Lahti, M. 2003. Movements and habitat use by pikeperch (*Stizostedion lucioperca* (L.)) in a hydropeaking reservoir. *Ecology of Freshwater Fish* 23: 203–215. DOI: 10.1034/j.1600-0633.2003.00026.x

Vehanen, T., Louhi, P., Huusko, A., Mäki-Petäys, A., van der Meer, O., Orell, P., Huusko, R., Jaukkuri, M. & Sutela, T. 2020: Behaviour of upstream migrating adult salmon (*Salmo salar* L.) in the tailrace channels of hydropeaking power plants. *Fisheries Management and Ecology* doi.org/10.1111/fme.12383

Vehviläinen, I., 2023. Greed is good? Of equilibrium impacts in environmental regulation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 122, p.102892.

Vesirakentaja, 2019. Suomen vesivoimalaitokset. Saatavilla: <https://vesirakentaja.fi/>

Viialainen, M. 2022. Palokki-kuntaselvityshenkilön raportti. Heinävesi 7.10.2022. Saatavilla: [https://hiitolanjoki.fi/wp-content/uploads/2022/10/Raporttikalvot\\_Palokki-selvitys\\_2022.pdf](https://hiitolanjoki.fi/wp-content/uploads/2022/10/Raporttikalvot_Palokki-selvitys_2022.pdf)

Weber, C., Nilsson, C., Lind, L. Alfredsen, K. T., Polvi, L. E. 2013. Winter disturbance and riverine fish in temperate and cold regions. *BioScience*, 63: 199–210.

Widén, Å, Renöfält, B.M. & Jansson, R. 2024. Environmental flows in a future climate: balancing hydropower production and ecosystem rehabilitation. *Environmental Flows in a Future Climate: Balancing Hydropower Production and Ecosystem Rehabilitation*. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4717773> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4717773>

Widén, Å., Renöfält, B.M., Degerman, E., Wisaeus, D. & Jansson, R. 2022. Environmental Flow Scenarios for a Regulated River System: Projecting Catchment-Wide Ecosystem Benefits and Consequences for Hydroelectric Production. *Water Resources Research*, 58, e2021WR030297. <https://doi.org/10.1029/2021WR030297>

Wilson, R., 2002. Architecture of power markets. *Econometrica*, 70(4), pp.1299-1340.

Yle, 2024. Tällaisia kontteja yhtiöt pystyttävät nyt kaikessa hiljaisuudessa metsiin ja teiden varsille – voi näkyä sähkölaskussa. Saatavilla: <https://yle.fi/a/74-20106456>

Ympäristöhallinnon verkkopalvelu (2024). Reservoir content and inflow energy. Saatavilla: <https://wwwi2.ymparisto.fi/i2/finergy/indexe.html>

Young, P.,S., Cech, J.,J.,Jr. & Thompson, L.,C. 2011. Hydropower-related pulsed-flow impacts on stream fishes: a brief review, conceptual model, knowledge gaps, and research needs. *Rev Fish Biol Fisheries* 21:713–731. DOI 10.1007/s11160-011-9211-0

tietokayttoon.fi

---

ISBN PDF 978-952-383-144-5  
ISSN PDF 2342-6799