

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT  
LAPPEENRANTA-LAHTI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LUT

LUT School of Energy Systems  
LUT School of Engineering Sciences

## LUT Scientific and Expertise Publications

*Tutkimusraportit – Research Reports*

170

Otto Räisänen, Hannu Karjunen, Päivi Sikiö, Jukka Lassila,  
Jaakko Hyypiä, Markus Salmelin, Tero Tynjälä, Aleksi Kivi-  
maa, Antti Silvast, Matti Kojo, Eero Inkeri, Petteri Laaksonen

### **Etelä-Savon vetylaakso selvitys**

 LUT  
University

Lappeenrannan-Lahden Teknillinen Yliopisto LUT  
Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems  
LUT School of Engineering Sciences

LUT Scientific and Expertise Publications  
Tutkimusraportit - Research Reports 170

## **Etelä-Savon vetylaakso selvitys**

Otto Räisänen, Hannu Karjunen, Päivi Sikiö, Jukka Lassila, Jaakko Hyypiä,  
Markus Salmelin, Tero Tynjälä, Aleksi Kivimaa, Antti Silvast, Matti Kojo,  
Eero Inkeri, Petteri Laaksonen



ISBN: 978-952-412-171-2

Lappeenranta 2024

# Tiivistelmä

## Etelä-Savon vetylaakso selvitys

Otto Räisänen, Hannu Karjunen, Päivi Sikiö, Jukka Lassila, Jaakko Hyypiä, Markus Salmelin, Tero Tynjälä, Alekski Kivimaa\*, Antti Silvast\*, Matti Kojo\*, Eero Inkeri, Petteri Laaksonen

LUT-yliopisto, LUT School of Energy systems, Lappeenranta 2024

\*LUT-yliopisto, LUT School of Engineering Sciences, Lappeenranta 2024

66 sivua, 30 kuvaa, 22 taulukkoa  
Tutkimusraportit 170

Avainsanat: Vety, Tuulivoima, Aurinkovoima, Sähköverkko, Sähkönsiirto, Energiainfrastrukturi

Tässä raportissa kuvataan 1.1.2024-31.10.2024 LUT yliopiston toteuttaman Etelä-Savon vetylaaksohankkeen keskeiset tulokset. Hanke toteutettiin Etelä-Savon Liiton myöntämän alueiden kestävä kasvun ja elinvoiman tukemisen määrärahan (AKKE) sekä Etelä-Savon kuntien rahoituksella. Hankkeen ohjausryhmään kuului Etelä-Savon Maakuntaliiton, alueen kaupunkien (Mikkeli, Pieksämäki, Savonlinna) sekä Suomen vetylaakso ry:n edustajia.

Suomen asettaman 2035 hiilineutraaliustavoitteen saavuttaminen edellyttää päästövähennyksiä kaikilla sektoreilla, sekä merkittävää lisäystä uusiutuvan energian tuotantoon. Maakuntien ja kaupunkien rooli energiamurroksen vauhdittamisessa ja koordinoinnissa on merkittävä, jotta alueille saadaan turvattua investoinneille suotuisat olosuhteet ja hyvät tekniset lähtökohdat. Maantieteellisistä ja geopoliittisista syistä Suomen alueilla on eriarvoistumisen riski energiainvestointien sijoittumisessa.

Hankkeessa toteutettiin alueellinen tarkastelu, jossa selvitettiin Etelä-Savon potentiaalia uusiutuvan tuuli- ja aurinkovoiman tuotannossa, alueen energiainfrastruktuureja sekä olemassa olevia hiilidioksidin pistelähteitä sekä teollista rakennetta, jotka mahdollistavat vety- ja Power-to-X (PtX) -talouden kehittymisen alueella. Lisäksi tarkasteltiin vetytalouden mahdollista merkitystä aluetaloudelle sekä hankkeiden yhteiskunnallista hyväksyttävyyttä.

Etelä-Savon alueella on merkittävästi hyödyntämätöntä tuulivoimapotentiaalia, erityisesti alueen pohjois-, etelä- ja kaakkoisosissa. Itäisen Etelä-Savon tuulivoimapotentiaalini hyödyntämisen haasteena on ilmajohdon yhteensovittaminen. Aurinkovoimapotentiaali on myös merkittävä, mm. alueen turvesoilla sekä käytöstä poistetuilla viljelyalueilla. Etelä-Savon alueella on mahdollisuus tulla selvästi energiapositiiviseksi alueeksi, mikä edellyttää yhteistyötä yli maakuntarajojen ja energiansiirtoinfrastruktuurien vahvistamista erityisesti itä-länsisuunnassa. Uusiutuvan energiantuotantopotentiaalini osalta alueella puhutaan merkittävästä lisäyksestä alueen elinvoimaan talous- ja työllisyysvaikutusten kautta. Etelä-Savon teollisilla toimijoilla on mahdollisuus kasvattaa vientiliiketoimintaansa PtX teknologiasektorilla. Hankkeiden edistämiseksi koulutetun työvoiman saanti sekä avoin viestintä yhteiskunnan hyväksynnän takamiseksi ovat myös keskeisessä roolissa.

# Abstract

## Hydrogen valley survey of Southern Savonia

Otto Räisänen, Hannu Karjunen, Päivi Sikiö, Jukka Lassila, Jaakko Hyypiä, Markus Salmelin, Tero Tynjälä, Alekski Kivimaa\*, Antti Silvast\*, Matti Kojo\*, Eero Inkeri, Petteri Laaksonen

LUT-yliopisto, LUT School of Energy Systems, Lappeenranta 2024

\*LUT-yliopisto, LUT School of Engineering Sciences, Lappeenranta 2024

66 pages, 30 figures, 22 tables

Research reports 170

Keywords: Hydrogen, Wind power, Solar power, Electricity grid, Electricity transmission, Energy infrastructure

This report describes the key results of the Southern Savonia hydrogen valley project implemented by LUT University 1.1.2024-31.10.2024. The project was implemented with funding from the Regional Sustainable Growth and Vitality Fund (AKKE) granted by the Southern Savonia Regional Council and funding from the municipalities of South Savonia. The steering group of the project included representatives of the Southern Savonia Regional Council, the cities of the region (Mikkeli, Pieksämäki, Savonlinna) and Finnish Hydrogen Valley Association.

Achieving the 2035 carbon neutrality goal set by Finland requires emission reductions in all sectors, as well as a significant increase in the production of renewable energy. The role of the municipalities and cities in speeding up and coordinating the energy transition is significant in order to secure favorable conditions for investments and good technical starting points for the regions. Due to geographical and geopolitical reasons, there is a risk of inequality in the distribution of energy investments across Finnish regions.

The project carried out a regional analysis, which investigated the potential of Southern Savonia in the production of renewable wind and solar power, the area's energy infrastructures and existing carbon dioxide point sources, as well as the industrial structure that enables the development of the hydrogen and Power-to-X (PtX) economy in the region. In addition, the possible significance of the hydrogen economy for the regional economy and the social acceptability of the projects were examined.

There is significant untapped wind power potential in the Southern Savonia region, especially in the northern, southern and southeastern parts of the region. The challenge of utilizing the wind power potential of eastern parts is the limitations caused by air surveillance needs. The solar power potential is also significant, e.g. on the area's peatlands and decommissioned agricultural areas. The Southern Savonia region has the opportunity to become a clearly energy-positive region, which requires cooperation across provincial borders and the strengthening of energy transmission infrastructures, especially in the east-west direction. Regarding the renewable energy production potential in the region, there is an opportunity to a significant

increase in the region's vitality through economic and employment effects. The industrial operators of Southern Savo have the opportunity to increase their export business in the PtX technology sector. Access to trained labor and open communication to guarantee society's acceptance also play a key role in the advancement of projects.

## Sisällysluettelo

Sisällysluettelo .....	6
1 Johdanto .....	7
2 Tulevaisuuden energiaympäristö.....	9
2.1 Vedyn valmistus .....	11
3 Vetytalous Etelä-Savossa.....	12
3.1 Tuulivoima.....	13
3.2 Aurinkovoima (aurinkosähkö) .....	17
3.2.1 Turvetuotantoalueiden aurinkosähkötuotantopotentiaali.....	19
3.2.2 Käytöstä poistuneiden maatalousalueiden aurinkosähkötuotantopotentiaali.....	20
3.2.3 Maatalouskäytössä olevien peltojen aurinkosähkötuotantopotentiaali .....	21
3.2.4 Rakennusten kattoasennusten aurinkosähkötuotantopotentiaali .....	23
3.3 Energiansiirtoinfrastruktuuri.....	24
3.4 Kaukolämpöverkot .....	25
3.5 Sähköverkot .....	27
3.5.1 Aurinkosähkötuotannon liitettävyyden nykyiseen sähkönsiirtoinfrastruktuuriin.....	31
3.5.2 Tuotannon liityntätarkastelu ja -kustannukset .....	34
3.6 Hybridilaitokset: Tuuli- ja aurinkovoima.....	38
4 Aluetoimijat ja kehitysmahdollisuudet .....	42
4.1 Hiilidioksidin lähteet ja kuluttajat .....	43
4.2 Hapen lähteet ja tarpeet .....	44
4.3 Vetytalouteen liittyvät suunnitelmat ja projektit .....	45
5 Sektori-integraatio ja sivuvirtojen hyödyntäminen .....	50
5.1 Kaukolämpö .....	50
5.1.1 Varastointitarve .....	54
6 Työllisyys- ja aluevaikutukset .....	58
6.1 Tuulivoiman työllisyysvaikutuksen jakautuminen .....	59
6.2 Tuulivoiman kuntakohtaiset talousvaikutukset .....	60
6.3 Aurinkovoiman työllisyysvaikutukset.....	61
6.4 Vaikutusarviointien haasteet.....	62
7 Johtopäätökset.....	64
Lähteet .....	67
Liitteet .....	72

# 1 Johdanto

Tässä työssä luodaan katsaus Etelä-Savon mahdollisuuksiin osana vedyn arvoketjua ja nopeasti muuttuvaa energiaympäristöä. Tutkimus liittyy osana laajempaa alueellisten vetytalouteen liittyvien tutkimusten sarjaa LUT yliopistossa (Carbon Negative Åland: Strategic Roadmap. Pyrhönen et al., 2021; Bothnian Bay Hydrogen Valley, Karjunen et al., 2021; South-East Finland Hydrogen Valley – Research Report, Karjunen et al., 2022; Pohjois-Savon Vetylaakso selvitys, Karjunen et al., 2022). Selvitykseen osallistui kattavasti asiantuntijoita eri tieteenaloilta LUT-yliopistosta. Hanke toteutettiin Etelä-Savon Liiton myöntämän alueisen kestävän kasvun ja elinvoiman tulemisen (AKKE) sekä Etelä-Savon kuntien rahoituksella.

Tutkimuksessa arvioitiin alueellinen tuuli- ja aurinkovoimatuotannon potentiaali perustuen paikallisiin olosuhteisiin ja maantieteellisiin rajoitteisiin. Resurssitarkastelua laajennettiin myös biogeenisen sekä fossiilisen hiilidioksidin lähteisiin, joiden pohjalta erilaisten Power-to-X (PtX) polttoaineiden ja kemikaalien tuotantopotentiaali arvioitiin perustuen hiilidioksidin saatavuuteen. Analyysiin käytettiin avoimista lähteistä saatavaa paikkatietojärjestelmädataa (GIS), kuten esimerkiksi Maanmittauslaitoksen (2022) maastotietokantaa.

Hankkeessa arvioitiin alueellisille toimijoille suunnatulla kyselytutkimuksella vety- ja PtX-talouteen liittyviä investointisuunnitelmia, sekä niihin liittyviä haasteita ja mahdollisuuksia. Kyselytutkimusta täydennettiin haastatteleamalla potentiaalisia uusiutuvan energian ja vetytalouden hankekehittäjiä sekä -rahoittajia laajemmin.

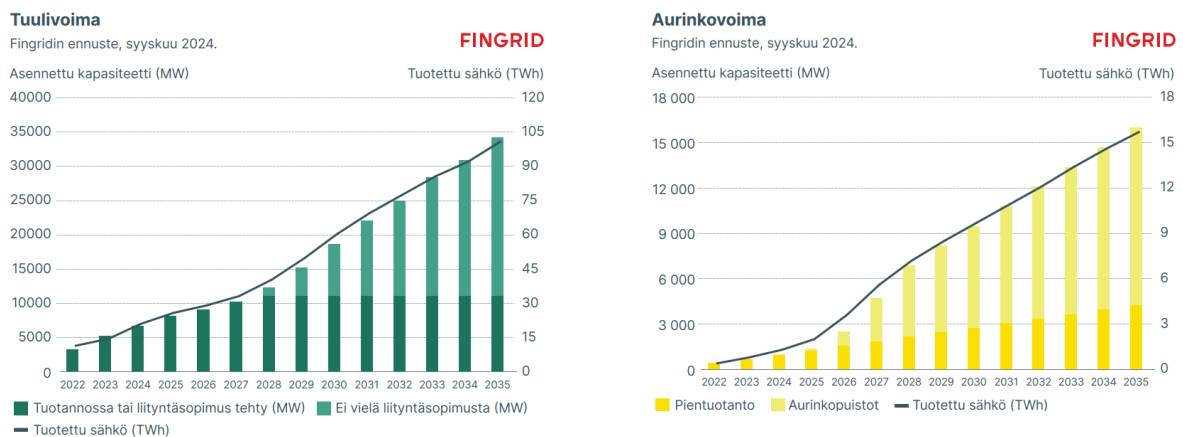
Joustava sektori-integraatio sähkön, lämmön ja PtX-tuotteiden välillä on avainroolissa uusiutuvien energiantuotantomuotojen osuuden onnistuneeseen lisäämiseen. Hankkeessa tarkasteltiin sektori-integraation mahdollisuuksista erityisesti vedyntuotannon hukkalämmön hyödyntämistä kaukolämmöntuotannossa, sekä lämmöntuotannon sähköistämistä lämpöpumppujen avulla. Myös vedyntuotannon sivuvirtana syntyvän hapen hyödyntämismahdollisuuksia tarkasteltiin. Työssä tarkasteltiin lisäksi mahdollisten investointien johdosta syntyviä yhteiskunnallisia työllisyys- ja aluevaikutuksia.

Työn tavoitteena oli tehdä esiselvitys alueen potentiaalista ylemmällä tasolla, rakentaa verkostoja ja järjestää yhteistyötä eri toimijoiden (kaupunkien, teollisuuden, tutkimuslaitosten) välillä alueella. Raportti keskittyy tarjoamaan yleiskuvan eikä se tässä laajuudessa pysty ottamaan kantaa tarkkoihin teknologisiin yksityiskohtiin tai jäsenneltyihin kehityssuunnitelmiin. Työn

myötä voidaan paremmin tarkentaa tulevia rahoitusmahdollisuuksia tämän selvityksen tulosten implementoimiseksi seuraavissa projekteissa, sekä tukea alueen strategista suunnittelua.

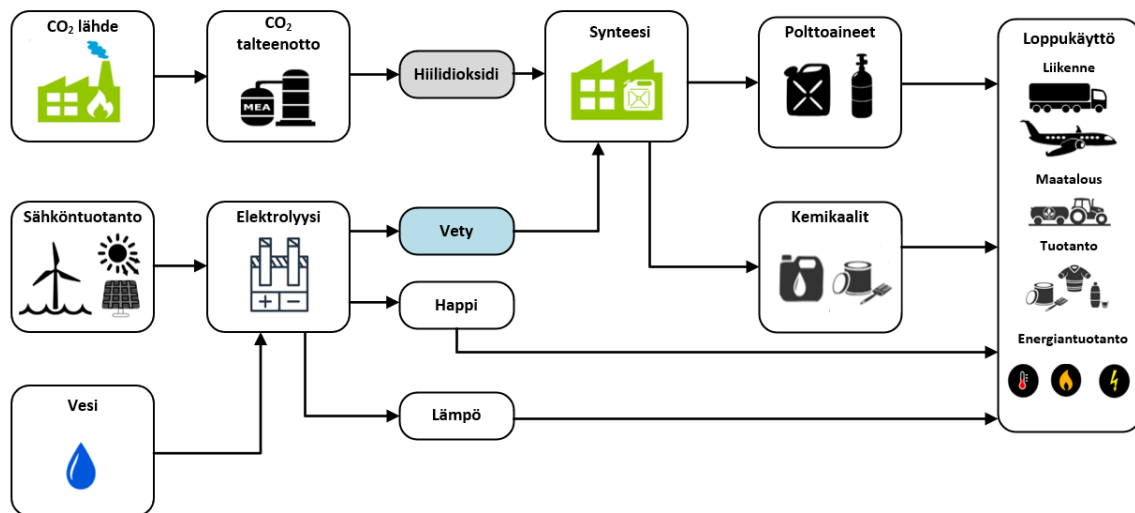
## 2 Tulevaisuuden energiaympäristö

Energiajärjestelmien muutos fossiilisten polttoaineiden käytöstä pois siirryttäessä tulee vaikuttamaan merkittävästi energiantuotantoon ja -kulutukseen. Lisääntyvä säästä riippuvaisen uusiutuvan energian tuotanto asettaa haasteita energiainfrastruktuurille ja lisää energian varastointitarvetta. Power-to-X (PtX) teknologiat voivat olla osa tulevaisuuden energiajärjestelmä-ratkaisua, tasapainottaen energian kulutusta ja mahdollistaen energian varastoinnin PtX-tuotteisiin. Uusiutuvan vedyn käyttöön pohjautuva energiajärjestelmä tulee muuttamaan myös energian tuotannon ja kulutuksen maantieteellistä jakaumaa merkittävästi. Selvä visio ja pitkäjänteinen investointisuunnitelma ovat välttämättömiä, jotta energiainfrastruktuurin vaatimat investoinnit toteutuvat. Fingridin (2024a) arvio tuulivoiman ja aurinkosähkön valtakunnallisesta kehityksestä on esitetty kuvassa Kuva 2.1, jonka mukaan tuulivoiman asennettu kapasiteetti kasvaisi noin kolmin-nelinkertaiseksi vuoteen 2030 mennessä, ja vastaavasti aurinkovoimakapasiteetti jopa kymmenkertaistuisi nykytilanteesta.



Kuva 2.1. Tuulivoiman ja aurinkosähkön ennustettu kehitys Suomessa (Fingrid 2024a)

Power-to-X-prosesseilla tarkoitetaan sähkön muuttamista kemikaaleiksi, polttoaineiksi ja muiksi tuotteiksi (kuva 2.2). Termi pitää sisällään avainteknologioita vihreässä sähköistymisessä, jossa tavoitteena on kasvattaa uusiutuvan energiantuotannon osuutta ja vähentää riippuvuutta fossiilisista energianlähteistä ja kertakäyttöisistä hyödykkeistä. PtX:llä tarkoitetaan yleensä kemikaalien ja polttoaineiden tuotantoa vihreästä vedystä (H<sub>2</sub>) ja talteenotetusta hiilidioksidista (CO<sub>2</sub>). PtX -teknologioilla on tärkeä rooli uusiutuvan energian tuotannon vaihtelujen tasaamisessa, sillä ne voivat lisätä joustavaa sähkön kulutusta ja mahdollistaa energian varastoinnin tai muunnon erilaisiin tuotteisiin.



Kuva 2.2. PtX -tuotepolkujen periaatekuva. Merkittävimpiä sivuvirtoja on myös kuvattu (elektrolyysin tuottama lämpö ja happi), vaikka myös synteesiin ja hiilidioksidin talteenottoon liittyy energiankäyttöä ja sivuvirtoja.

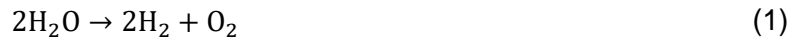
Mahdollisia PtX -konversioiteitä ovat esimerkiksi synteettisen metaanin (CH<sub>4</sub>) tai metanolin (CH<sub>3</sub>OH) tuotanto hiilidioksidista (CO<sub>2</sub>) ja vedystä (H<sub>2</sub>). Myös konversioiteit ilman hiilidioksidia ovat mahdollisia, kuten esimerkiksi ammoniakkin (NH<sub>3</sub>) tuotanto typestä (N<sub>2</sub>) ja vedystä. Laajasti määriteltynä PtX pitää sisällään myös esimerkiksi sähköstä lämmöksi-konversion. Taulukkoon 2.1 on koottu potentiaalisia PtX-tuotteita.

Taulukko 2.1. Muutamia potentiaalisia PtX-tuotteita.

Tuote	Reaktioyhtälö	Käyttötarkoitus
Metaani (CH <sub>4</sub> )	$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \Rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	Käytetään maakaasun korvaajana teollisuudessa, liikennepolttoaineena ja energiantuotannossa
Metanoli (CH <sub>3</sub> OH)	$\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \Rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	Liikennepolttoaine, raaka-aine, josta voidaan jalostaa DME:tä, bensiiniä, muoveja, jne.
Ammoniakki (NH <sub>3</sub> )	$\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \Rightarrow 2\text{NH}_3$	Lannoite, liikennepolttoaine

## 2.1 Vedyn valmistus

Vedyn valmistaminen on tärkeä välivaihe PtX -prosesseissa, sillä vety toimii raaka-aineena ja pääasiallisena energiankuljettajana useimmissa PtX -konversioreiteissa. Sähköstä ja vedestä (H<sub>2</sub>O) voidaan valmistaa vetyä elektrolyytisesti. Tällöin sähkövirran avulla vesimolekyylit pilkottaan hapeksi ja vedyksi, nettoreaktio on esitetty yhtälössä 1.



Elektrolyysit voidaan jakaa kolmeen erityyppiseen teknologiaan: Alkalielektrolyysiin, polymeerielektrolyysiin sekä korkean lämpötilan elektrolyysiin (SOEC). Alkalielektrolyysi on teknologisesti kaikkein korkeimmalla valmiusasteella ja kaupallisesti saatavilla, kun taas korkean lämpötilan elektrolyysit ovat edelleen kehitysasteella. Myös polymeerielektrolyysereitä on kaupallisesti saatavilla (Koponen J. 2020).

Konversioon sähköstä vetyyn liittyy häviöitä, ja alkali- ja polymeerielektrolyysereillä saavutetaan tyypillisesti 60–80 % hyötysuhde (perustuen vedyn korkeampaan lämpöarvoon) (Schmidt, O. et al., 2017). Loppuenergia hukataan pääasiassa lämmöksi (Sakas et al. 2022). Tässä työssä elektrolyyserien tuottaman hukkalämmön talteenotettavaksi määräksi arvioitiin 30 % sähkötehosta. Tarkka sivutuotteena syntyvän lämmön määrä ja hyödynnettävyys riippuu mm. elektrolyysiteknologiasta ja elektrolyyserin käyttöprofiilista. Alkali- ja polymeerielektrolyysit toimivat noin 50–80 °C lämpötilatasossa (Koponen, J. 2020), ja toimintalämpötila sanelee, missä lämpötilassa mahdollista hukkalämpöä olisi otettavissa talteen elektrolyyserin jäähtäyksestä.

Reaktioyhtälöstä 1 nähdään, että vedyntuotannon sivutuotteena syntyy merkittävästi myös happea. Jokaista kahta moolia vetyä kohti syntyy yksi mooli happea. Koska vety on paljon kevyempi alkuaine, massaperusteisesti happea muodostuu jopa noin kahdeksankertaisesti vetyyn verrattuna. Hapen merkitystä on tarkasteltu tarkemmin työn kappaleessa 4.2.

### 3 Vetytalous Etelä-Savossa

Kustannustehokkaan sekä skaalautuvan uusiutuvan sähköntuotannon räjähdysmäisen kasvun myötä mahdollistuu myös teollisuuden, liikenteen ja lämmityssektorin nopea kehitys kestävään suuntaan. Uusiutuvan energian tuotantopotentiaali onkin siten edellytys kehittyneiden teknologioiden käyttöönotolle. Kerrannaisvaikutukset sähkön jalostuneesta käytöstä poikivat moninkertaisesti jalostusasteen kasvaessa, jolla on merkittäviä alueellisia talousvaikutuksia.

Tarkastelualue kattoi Etelä-Savon kuten on esitetty kuvassa 3.1. Alueella on runsaasti vesistöjä, sekä kohtalaisesti teollisuustoimintaa, joka painottuu erityisesti Mikkelin alueelle. Alueen läpi kulkee myös 400 kV kantaverkko. Sähköverkkoa ja muuta alueen infrastruktuuria tarkastellaan tarkemmin osiossa 4. Teollisuustoimintoja ja aluetoimijoita käsitellään puolestaan tarkemmin tämän työn luvussa 5.



Kuva 3.1. Tarkastelualueelta kuvattuna suurimmat asuinalueet, tieyhteydet ja rautatiet.

### 3.1 Tuulivoima

Tuulivoimalla tuotettiin vuonna 2023 Suomessa noin 14.4 TWh sähköä, eli noin 18 % sähkön kokonaiskulutuksesta. Viime vuosina tuulivoimaa on rakennettu tuntuvasti: pelkästään vuonna 2022 tuotantokapasiteettia lisättiin peräti 2430 MW. Määrä on huomattava suhteutettaessa sitä Suomen yhteenlaskettuun tuulivoimakapasiteettiin, jota oli yhteensä 7332 MW vuoden 2024 keväällä. (Suomen uusiutuvat, 2024) Tuulivoimateknologian kehitys ja suuremmat tornikoot mahdollistavat tuulivoiman kannattavan rakentamisen myös sisämaassa.

Etelä-Savon maakuntaliitossa on valmisteilla Etelä-Savon 4. vaihemaakuntakaava, jossa käsitellään tuulivoimatuotantoon soveltuvia alueita. Kaavaluonnoksessa oli osoitettu Kangasniemen alueelle kolme ja Pieksämäelle neljä tuulivoimaloiden aluetta. Tässä selvityksessä toteutettiin LUTin toimesta itsenäinen potentiaalitarkastelu, joka menetelmällisesti pohjautui puskurianalyysiin. Muodostuvia mahdollisia alueita ei rajattu teknistaloudellisesta näkökulmasta eikä maanpuolustuksellisen ilmalvannon rajoitteiden osalta. Tulosten herkkyyttä valittujen suojaetäisyyksien (esim. asutus ja luontokohteet) analysoitiin esittämällä kolme erilaista tarkastelua. Käytetyt suojaetäisyydet eri kohteisiin on esitetty työn liitteessä 1. Etelä-Savon teoreettiset turbiinimäärät näille kolmelle eri skenaariorille olivat n. 50, 420 ja 1700. Tärkeimmät erot näiden kolmen LUT-skenaarioiden välillä on esitetty Taulukko 3.1.

Taulukko 3.1. Tärkeimmät erot LUTin tuulivoiman potentiaalitarkastelun skenaarioiden välillä.

	LUT #1	LUT #2	LUT #2
Etäisyys taajamiin (km)	3	2	1
Etäisyys asutukseen (km)	1.75	1.25	1
Etäisyys luontokohteisiin (km)	3	1	0.5
Etäisyys lentokenttiin (km)	18	10	10

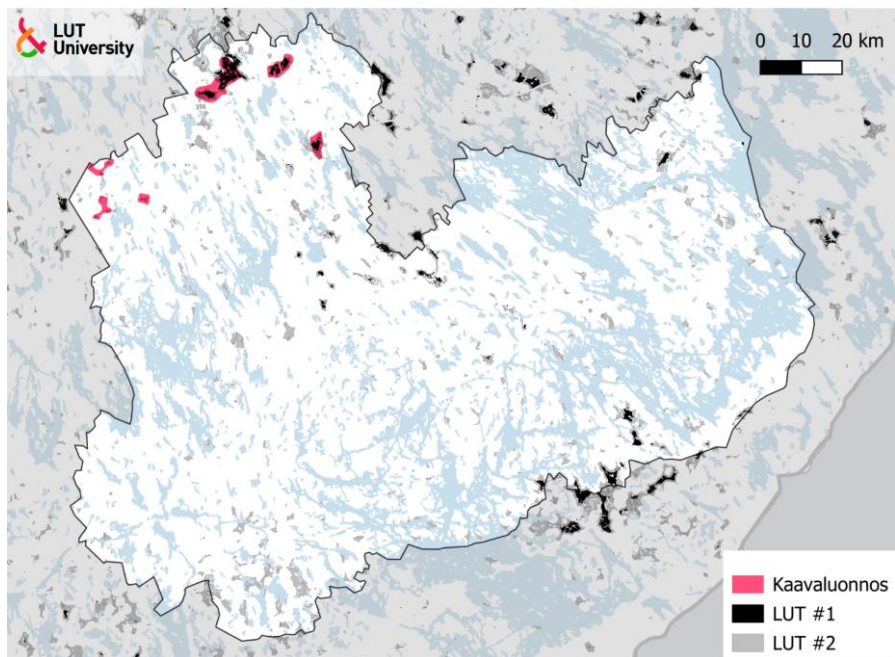
Turbiinit on sijoitettu sallituille tuulivoima-alueille satunnaisesti, kuitenkin säilyttäen vähintään 800 m etäisyyden turbiinien välillä sekä pyrkien samanaikaisesti saavuttamaan keskimääräisen täyttöastetavoitteen, eli 1.5 turbiinia neliökilometrille. Kaikki tämän tarkastelun turbiinit ovat 6 MW yksikkökooltaan. Tuulennopeuden vuosikeskiarvo on arvioitu tuuliatlaksesta (Global Wind Atlas 2022), ja vuosituotanto on arvioitu tuuliturbiinivalmistajan tuotetiedoista ilman häviöitä (Vestas, 2022). Yhteenveto tuloksista on esitetty taulukossa 3.2.

Potentiaalisten tuulialueiden sijoittuminen on esitetty kuvassa 3.2. Samassa kuvassa on myös esitetty maakuntakaavan luonnoksessa esitetyt tuulivoima-alueet. Alueet asettuvat pääpiirteissään samoille seuduille. Aluekaavoituksessa osoitetut alueet sijoittuvat luoteeseen, missä

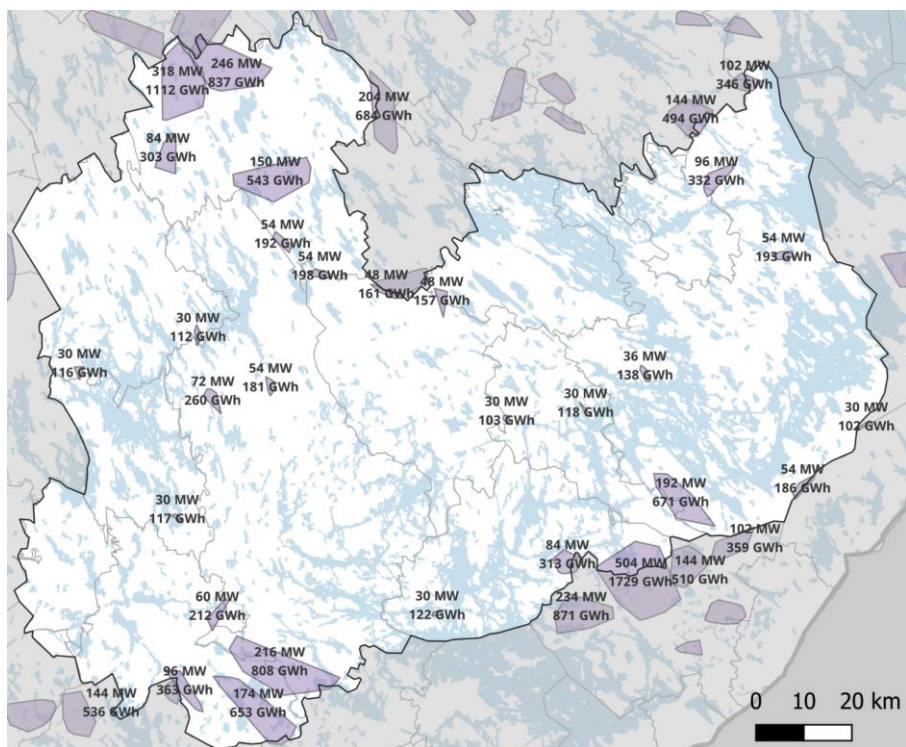
tuulivoiman toteutumiselle on hyvät mahdollisuudet sähköverkon liitettävyyden kannalta. Lisäksi etäisyys itärajaan on näillä kohteilla suurin. LUTin selvityksessä korostuu edellä mainitun luoteisalueen lisäksi kaakon suunnalla Etelä-Karjalan ja Etelä-Savon välinen raja-alue ja Mikkelin eteläpuoli ja Juvan pohjoisalue jatkuen Pohjois-Savon puolelle. Lisäksi alueelta on tunnistettu muutamia pieniä, 5–10 turbiinin puistoalueita. Tuulivoima-alueiden kartoitukseen liittyy monenlaisia sosiaalisia ja teknisiä rajoitteita ja intressejä, joita ei tässä työssä ole kokonaisuudessaan voitu huomioida. Esitettyjä alueita ei tulisikaan huomioida suosituksena tai todennäköisesti toteutuvana tuulipuistoalueena, sillä alueet muodostuvat suodattamattomasti ja suosimatta käytettyjen aluekriteereiden pohjalta. Tarkemmat aluekohtaiset selvitykset, kuten mahdolliset luonto- ja maisemavaikutukset, voivat aiheuttaa merkittäviäkin rajoitteita käytettäviin alueisiin. Kuvassa 3.3 on yhdistetty alueellisen potentiaalinn karttaesitys tuotannollisten lukujen kanssa. Taustalla on käytetty LUT #2 skenaariota.

Taulukko 3.2. Teoreettiset turbiinimäärät, tehot ja sähköntuotantoarviot kunnittain kolmelle eri skenaariolle esitettynä.

Kunta	LUT #1			LUT #2			LUT #3		
	Turbiineja	Teho (MW)	Tuotanto (GWh)	Turbiineja	Teho (MW)	Tuotanto (GWh)	Turbiineja	Teho (MW)	Tuotanto (GWh)
Enonkoski				5	30	104	46	276	988
Hirvensalmi				6	36	141	3	18	66
Juva	7	42	133	19	114	390	246	1 476	5 055
Kangasniemi				8	48	182	182	1 092	3 812
Mikkeli				42	252	908	221	1 326	4 755
Mäntyharju				67	402	1 494	117	702	2 571
Pertunmaa							16	96	343
Pieksämäki	26	156	524	145	870	3 052	408	2 448	8 617
Puumala	8	48	168	39	234	847	102	612	2 204
Rantasalmi				4	24	79	44	264	915
Savonlinna	6	36	127	73	438	1 543	306	1 836	6 566
Sulkava				13	78	283	81	486	1 710
<b>Yhteensä</b>	<b>47</b>	<b>282</b>	<b>951</b>	<b>421</b>	<b>2 526</b>	<b>9 025</b>	<b>1 772</b>	<b>10 632</b>	<b>37 601</b>

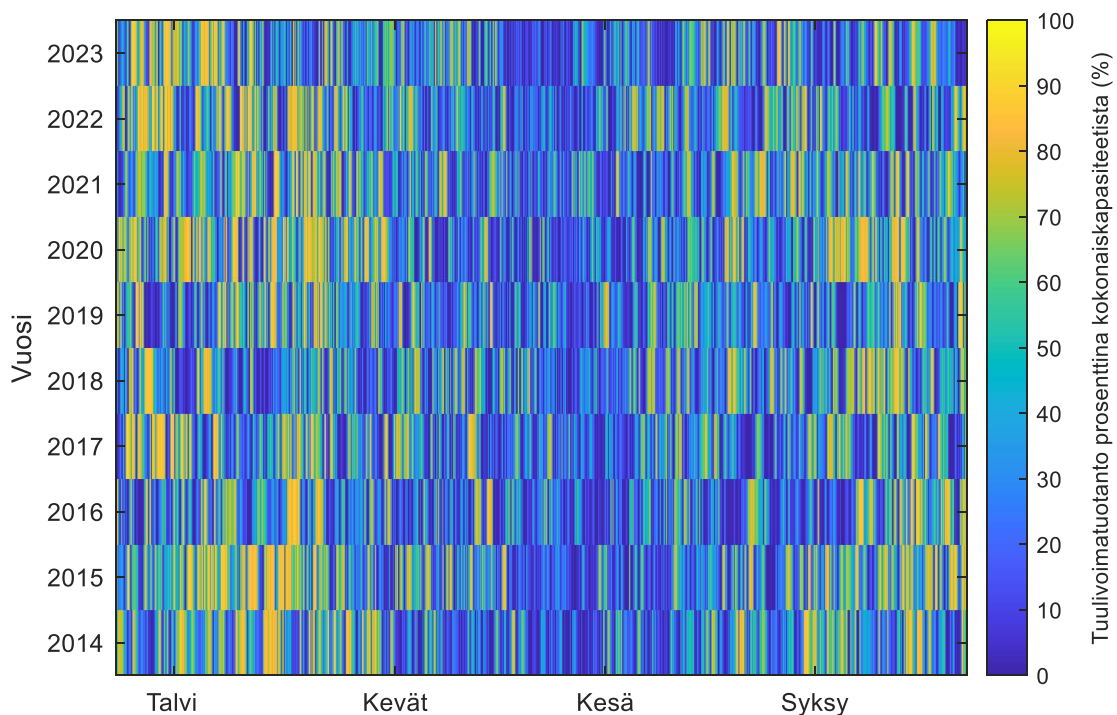


Kuva 3.2. Potentiaaliset tuulivoima-alueet kaavaluonnoksessa sekä LUT-analyysin #1 ja #2 skenaariossa.



Kuva 3.3. Alueen tuulivoimapotentiaali LUT #2 skenaarion mukaan. Numerot viittaavat tuulisähkön aluekohtaisiin asennuspotentiaaleihin (MW) ja arvioituihin vuosituotantoihin (GWh).

Uusiutuvan energian tuotanto vaihtelee merkittävästi, mikä aiheuttaa haasteita sähköjärjestelmään sekä kausi- että vuositasolla. Sähkönsiirtojärjestelmän investoinnit ohjautuvat kuitenkin huippukuormaa ja -tuotantoa mukaillen. Uusiutuvan tuotannon lisääntyessä korostuu myös tarve ja kysyntä lisätä joustavuutta sähkökuluttajien toimesta. Tuulivoiman tuotanto painottuu syksy- ja talvikausille, mutta tämän vaihtelun lisäksi vuosien välillä voi olla suuriakin heilahteluita. Kuvassa 3.4 on havainnollistettu kymmenen vuoden aikajaksolla tuulivoiman tuotannon vaihtelua sekä kausi- että vuositasolla. Tuulivoimatuotannon alueellinen hajauttaminen eri puolille Suomea voi parantaa tuulivoimainvestoinnin kannattavuutta, sekä samalla vähentää koko sähköjärjestelmältä vaadittavia joustomekanismeja. Tällöin esimerkiksi Etelä-Savon hetkellinen tuotanto voisi poiketa länsirannikon senhetkisestä tuulituotannosta, jolloin sähkömarkkinan kautta heijastuvat hintaerot toisivat lisäkannusteita tuotannolle Etelä-Savossa tai hajajoitettuna muualla Suomessa.



Kuva 3.4. Tuulivoiman tuotantovaihtelu kymmenen vuoden ajalta Etelä-Savon alueella.

Kuva 3.4 perustuu LUT-Yliopiston kehittämään tuulivoimatuotantomalliin, joka käyttää pohjana säämittauksiin perustuvaa ERA5-tietoaineistoa (Hersbach H. 2020). Mallissa käytetään

säämittauksia, tuulivoimalan teknisiä tietoja ja tehokkuuskäyrää arvioimaan hetkellistä tuotantopotentiaalia eri aikoina.

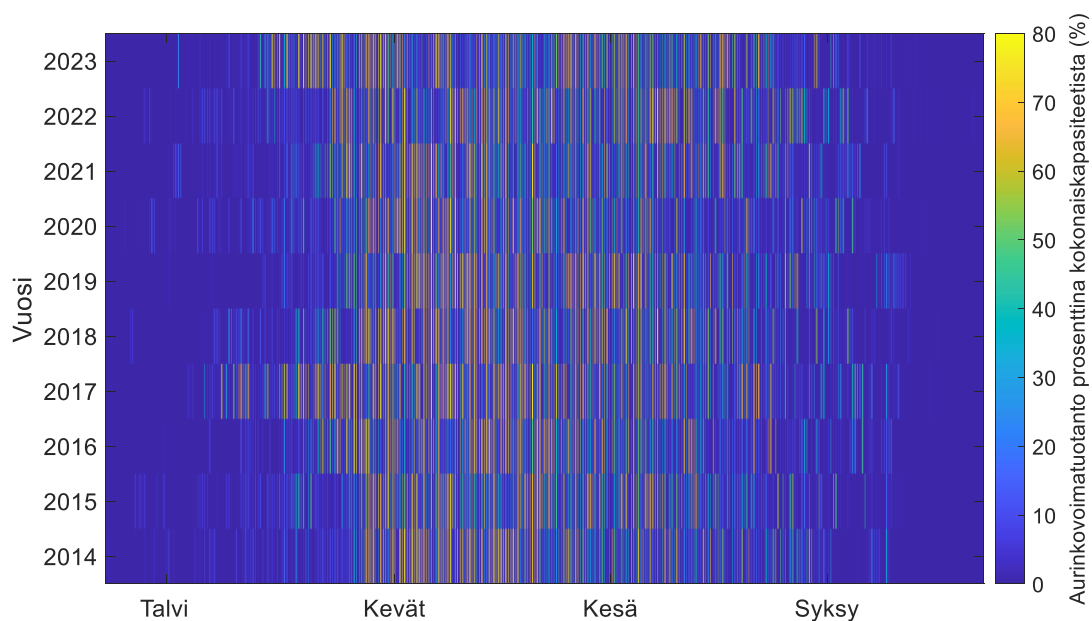
### **3.2 Aurinkovoima (aurinkosähkö)**

Etelä-Savon aurinkosähköpotentiaalia tarkasteltiin teollisen mittakaavan maa-asennuksille sopivilla maa-alueilla. Potentiaalisina alueina huomioitiin turvetuotantoalueet, maatalouskäytössä olevat pellot ja käytöstä poistuneet maatalousalueet (niityt). Näiden alueiden lisäksi hankkeessa tarkasteltiin Etelä-Savon rakennuksien kattoasennuspotentiaalia.

Etelä-Savon alueelle on aiemmin toteutettu FCG:n (2023) toimesta aurinkopotentiaaliselvitys, jossa vastaavasti kuin edellä mainitussa tuulivoimaselvityksessä hyödynnettiin poissulkevaa puskurianalyysiä sekä yleispiirteistä teknistaloudellista arviointia. Etelä-Savon vetylaaksohanketta varten toteutettiin LUTin toimesta itsenäinen potentiaalitarkastelu, joka menetelmällisesti pohjautui paikkatietoanalyysiin FCG:n selvityksen tapaan. FCG:n selvityksessä potentiaalisiksi aluetyypeiksi on valittu turvetuotantoalueet, harvapuustoiset suoalueet ja maataloustukijärjestelmän ulkopuoliset maatalousmaat. LUT:n selvityksessä harvapuustoiset alueet on jätetty tarkastelun ulkopuolelle, koska niiden soveltuvuus aurinkosähkötuotantoon on hyvin tapauskohtaista. Toisaalta tarkasteluun otettiin FCG:n selvityksestä poiketen myös käytössä olevat maatalousalueet, sillä maatalouden ja aurinkosähkötuotannon yhteiskäyttöasennuksia hyödyntämällä myös tämä pinta-ala on tulevaisuudessa osittain hyödynnettävissä ruoantuotantoa vaarantamatta. LUT:n selvityksessä alueita ei rajattu pois etäisyyden perusteella nykyiseen sähköinfrastruktuurin, sillä valittujen alueiden kokoluokat oletettiin olevan riittävät, niiden teknistaloudellisesti kannattavaan liittämiseen myös syrjäisemmillä alueilla. Natura 2000-alueet huomioitiin poissulkevana alueena, muutoin tarkastelussa ei asetettu tiukkoja rajoitteita suojaetäisyyksien suhteen ja esimerkiksi etäisyyttä asutukseen ei otettu huomioon aluevalinnoissa. Valinnoista johtuen LUT:n selvityksessä aurinkovoimalle potentiaaliset alueet ovat sekä määrällisesti että pinta-alaltaan merkittävästi suuremmat FCG:n selvitykseen verrattuna. LUT:n tarkastelun aurinkovoimapotentiaaleja tulkitessa tulee huomioida, että potentiaalit kuvaavat Etelä-Savon alueen teoreettista kokonaispotentiaalia. Yksittäisten alueiden hyödyntämisessä tulee kuitenkin tehdä tarkempi selvitys, jossa otetaan huomioon esimerkiksi mahdolliset maisemahaitat ja alueelle suunniteltu muu käyttö, kuten turvesoiden ennallistaminen.

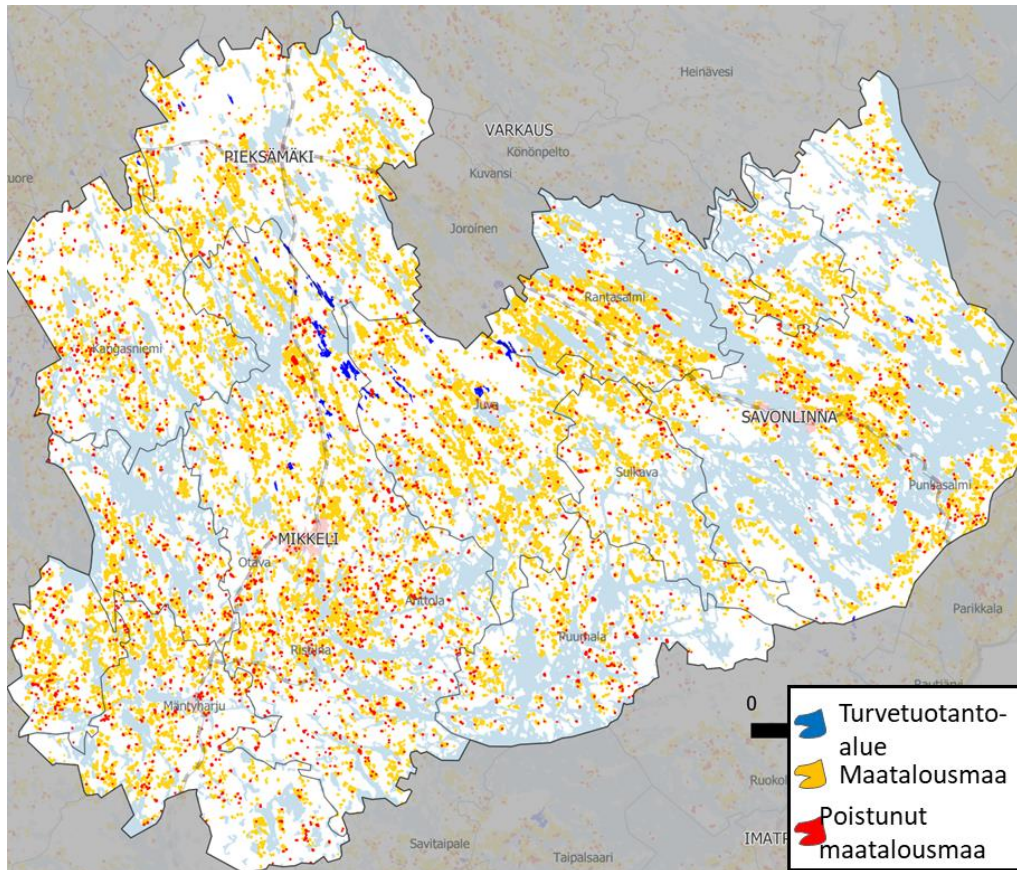
Tutkimuksessa on käytetty keskimääräistä 850 h/a huipunkäyttöaikaa tuotannolle kiinteään kulman maa-asennuksilla. Käytetty oletus perustuu PVGIS ja LUT-yliopiston

tuotantosimulaatioihin. Todellinen tuotannon huipunkäyttöaika Etelä-Savon alueella riippuu käytetystä paneelitekniikasta ja vaihtelee noin 650 tunnista kiinteään kulmaan asennutuilla yksikiteisillä paneeleilla noin 1100 tuntiin horisontaalisesti aurinkoa seuraavilla asennuksilla. Kattoasennuksille on käytetty oletuksena pienempää 650 h/a huipunkäyttöaika, joka ottaa huomioon kattoasennuksille tyypillisiä vuosituotantoa vähentäviä vaikutuksia kuten varjostukset ja ei-optimaaliset asennuskulmat. Huipunkäyttöaikoihin vaikuttaa myös muun muassa vuosien välinen vaihtelu lämpötilassa ja säteilyn ja lumen määrässä. Kuvassa 3.5 on esitetty LUT-yliopiston aurinkovoimamallin ERA5 -aineistoon (Hersbach H. 2020) perustuva simulaatio tuotannosta kymmenen vuoden ajalta Etelä-Savon alueella. Kuvasta havainnollistuu aurinkovoiman kausivaihtelevuus sekä vaihtelevuus vuosien välillä. LUT-yliopiston kehittämä aurinkovoimamalli ottaa huomioon lämpötilan, säteily- ja sijaintitietojen lisäksi lumen vaikutuksen aurinkovoimatuotantoon. Aurinkovoimatuotanto painottuu voimakkaasti kevät ja kesäaikaan, kun taas talvella tuotanto on vähäistä. Aurinkovoima tukee hyvin tuulivoimatuotantoa, sillä tuulivoiman- ja aurinkovoimatuotannon huipputuotanto ajoittuu tyypillisesti eri ajankohtiin, sekä kausittain myös vuorokausitasolla.



Kuva 3.5. Aurinkovoiman tuotantovaihtelu kymmenen vuoden ajalta Etelä-Savon alueella.

Kuvassa 3.6 on esitetty aurinkosähkölle soveltuvien maa-alueiden sijoittuminen Etelä-Savossa.



Kuva 3.6. Aurinkosähkölle soveltuvien maa-alueiden sijoittuminen Etelä-Savossa.

### 3.2.1 Turvetuotantoalueiden aurinkosähkötuotantopotentiaali

Turvetuotantoalueet soveltuvat lähtökohtaisesti hyvin teollisen mittakaavan aurinkopuistoille tyypillisesti laajan yhtenäisen alan, vähäisen varjostuksen ja valmiin tieinfrastruktuurin ansiosta. Turvetuotantoalueina tarkastelussa on otettu huomioon kaikki maanmittauslaitoksen maastotiekannassa olevat käytössä olevat ja poistuneet turvetuotantoalueet. Etelä-Savon alueella merkittävä osa turvetuotantoalueista sijaitsee lähellä olemassa olevaa 110 kV ja 400 kV verkkoa ja sähköasemia, jolloin verkkoa voidaan verkon vapaan kapasiteetin rajoissa hyödyntää tuotannon liittämiseen. Potentiaalın hyödyntäminen kokonaisuudessaan vaatii kuitenkin uusien liityntäjohtojen rakentamista, ellei kohteessa pystytä hyödyntämään olemassa olevaa tai suunniteltua tuulivoimapuiston verkkoliityntää (luku 3.6). Taulukossa 3.3 on esitetty kunnittain aurinkosähkön asennus- ja tuotantopotentiaalit turvetuotantoalueilla Etelä-Savossa.

Taulukko 3.3. Aurinkosähkön asennuspotentiaalit ja arvioidut vuosituotannot turvetuotantoalueilla Etelä-Savossa. Asennustiheytenä käytetty 1 MWp/ha (100 MWp/km<sup>2</sup>).

Kunta	Turvetuotantoalueiden pinta-ala		Asennuspotentiaali MWp	Tuotantopotentiaali GWh/a	Osuus (%)
	km <sup>2</sup>	ha			
Juva	9.4	943	943	801	26 %
Kangasniemi	0.8	83	83	70	2 %
Mikkeli	18.2	1 819	1 819	1 546	51 %
Pieksämäki	4.7	466	466	396	13 %
Rantasalmi	1.7	166	166	141	5 %
Savonlinna	1.0	95	95	81	3 %
<b>Etelä-Savo</b>	<b>35.7</b>	<b>3 571</b>	<b>3 571</b>	<b>3 036</b>	<b>100 %</b>

### 3.2.2 Käytöstä poistuneiden maatalousalueiden aurinkosähkötuotantopotentiaali

Käytöstä poistuneet maatalousalueet ovat turvesoiden ohella yksi potentiaalisimmista aurinkotuotannon sijoitusalueista. Käytöstä poistuneiden maatalousalueiden potentiaalin hyödyntäminen suuressa mittakaavassa on kuitenkin haastavaa sillä alueet muodostuvat suhteellisen pienistä yksittäisistä alueista, jotka sijoittuvat hajautuneesti Etelä-Savon alueelle. Lisäksi alueet sijoittuvat osittain lähelle asutusta, jolloin mahdollinen maisemahaitta tulee ottaa huomioon. Käytöstä poistuneiden maatalousalueiden tyypillinen kokoluokka on noin 1–10 ha (1–10 MWp), jolloin pienempien alueiden (noin <2MWp) liittämässä voitaisiin hyödyntää olemassa olevaa 20 kV jakeluverkkoa ja keskisuurten alueiden osalta (2–15 MWp) 110 kV siirtoverkkoa ja sähköasemia. Näiden ratkaisuiden soveltuvuutta on kuitenkin tarkasteltava tapauskohtaisesti. Lähtökohtaisesti olemassa olevan siirto- ja muuntokapasiteetin tehokkaan hyödyntämisen näkökulmasta parhaimpia ovat kohteet, joissa sähkönkäyttö ajoittuu päiväajoille samoihin hetkiin aurinkosähkötuotannon kanssa. Käytöstä poistuneina maatalousalueina tarkastelussa on käytetty kaikki maanmittauslaitoksen maastotiekannassa olevat poistuneet maatalousalueet (luokka niityt). Potentiaalit on koottu taulukkoon 3.4.

Taulukko 3.4. Aurinkosähkön asennuspotentiaalit ja arvioidut vuosituotannot käytöstä poistuneilla maatalousalueilla Etelä-Savossa. Asennustiheytenä käytetty 1 MWp/ha (100 MWp/km<sup>2</sup>).

Kunta	Pinta-ala		Asennuspotentiaali MWp	Tuotantopotentiaali GWh/a	Osuus (%)
	km <sup>2</sup>	ha			
Enonkoski	0.3	29	29	25	1 %
Hirvensalmi	1.6	164	164	139	5 %
Juva	2.3	229	229	195	8 %
Kangasniemi	3.0	299	299	254	10 %
Mikkeli	8.6	856	856	728	29 %
Mäntyharju	2.5	247	247	210	8 %
Pertunmaa	1.4	135	135	115	5 %
Pieksämäki	2.4	241	241	205	8 %
Puumala	1.8	176	176	150	6 %
Rantasalmi	1.2	125	125	106	4 %
Savonlinna	3.9	394	394	335	13 %
Sulkava	1.1	109	109	92	4 %
<b>Etelä-Savo</b>	<b>30.0</b>	<b>3 003</b>	<b>3 003</b>	<b>2 553</b>	<b>100 %</b>

### 3.2.3 Maatalouskäytössä olevien peltöjen aurinkosähkötuotantopotentiaali

Maatalousalueiden kokonaispinta-ala Etelä-Savon alueella (noin 585 km<sup>2</sup>) on erittäin suuri verrattuna muihin tarkastelussa huomioitaviin alueluokkiin. Alueiden hyödyntämisessä aurinkosähkötuotantoon tulee kuitenkin ottaa huomioon ruoka- ja rehututannon turvaaminen. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi hyödyntämällä vain huonosti tuottavat ja käytöstä muutoin poistuvat pellot ja maatalousalueiden ja aurinkosähkötuotannon yhteiskäyttöasennuksilla.

Maatalousalueiden ja aurinkosähkötuotannon yhteiskäyttöasennuksilla eli niin sanotulla aurinkosähköviljelyllä (ASV) aurinkosähkötuotantoon soveltuvaa alaa voitaisiin kasvattaa merkittävästi (yhteiskäyttöasennuksista käytetään myös termejä agriphotovoltaics (APV) ja aurinkomaatalous). ASV-asennuksissa aurinkopaneelit sijoitetaan olemassa olevan maatalousalueen (esimerkiksi laidunmaa tai viljelyskäytössä oleva pelto) kanssa samalla alalle, jolloin pellolla tai laitumella voidaan edelleen jatkaa maataloustoimintaa aurinkosähkötuotannon lisäksi (kuva 3.7). Nykyisen tutkimustiedon perusteella ASV-järjestelmiä voidaan asentaa kaikentyyppisille viljelyspelloille ja laidunmaille, mikäli erityyppisten alueiden vaatimukset, kuten

maatalouskoneiden vaatima liikkumistila ja viljelykasvista riippuva auringonvalontarve, otetaan asennuksessa huomioon (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2022).

ASV-asennustapoja on useita. Yksinkertaisimmillaan asennus voidaan toteuttaa laajentamalla kiinteään kulmaan asennettujen paneelien rivistöväliä riittävän suureksi. Tällainen asennustapa sopii varsinkin laidunmaille. Viljelyskäytössä olevilla pelloilla voidaan hyödyntää esimerkiksi pystysuoraan asennettavia aitamallisia aurinkopaneeleja riittävän suurella rivivälillä, jolloin maatalouskoneet mahtuvat kulkemaan rivistöjen välissä. Yhteiskäyttöasennuksien asennustiheydet vaihtelevat 0.25–0.4 MWp/ha välillä maa-asennuksissa ja 0.5–0.8 MWp/ha välillä *overhead* -tyyppisissä asennuksissa (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2022). Tavanomaisissa maa-asenteisissa aurinkopuistoissa tyypillinen asennustiheys on noin 1 MWp/ha.

Yhteiskäyttöasennuksia on pilotoitu laajasti Etelä- ja Keski-Euroopassa ja teknologia on osoittautunut lupaavaksi, tutkimusta tarvitaan kuitenkin lisää asennusten toimivuuden varmistamiseksi Pohjoismaisissa olosuhteissa. Energiquellen, Turun ammattikorkeakoulun ja Helsingin yliopiston tammikuussa 2024 alkaneessa hankkeessa on tekeillä selvitys ASV-asennuksien soveltuvuudesta Suomen olosuhteisiin (Energiequelle 2024). Suomessa yhteiskäyttöasennuksia on tarkoitus pilotoida lähivuosina useassa kohteessa ja esimerkiksi Etelä-Savon alueella yhteiskäyttöä on pilotoitu Hirvensalmen aurinkopuistossa, jonka alueella laiduntaa kesäisin noin 100 lammasta (Solarigo 2024).



a)

b)

Kuva 3.7. a) Vertikaalisilla kaksisuuntaisilla paneeleilla toteutettu ASV järjestelmä (CC BY-SA 4.0, Tobi Kellner) ja b) kiinteään kulmaan laidunmaalle asennettu järjestelmä (CC BY 2.0, Nicole Karr)

Tässä selvityksessä yhteiskäyttöasennuksen oletettiin olevan kiinteään kulmaan asennettuja järjestelmiä 0.25 MW/ha asennustiheydellä, joka on neljäsosa tyypillisen teollisen mittaluokan maa-asennuksen tiheydestä. Käytössä olevien maatalousalueiden teoreettinen kokonaispotentiaali aurinkosähkössä on Etelä-Savossa noin 58 GWp (50 TWh/a) ja yhteiskäyttötuotannossa noin 15 GWp (12 TWh/a). Mikäli kokonaispinta-alasta hyödynnettäisiin vain 1 % (esim. huonosti tuottavat ja käytöstä poistuvat pellot), tuotantopotentiaali olisi noin 0.6 GWp (0.5 TWh/a). Taulukossa 3.5 on esitetty kunnittain aurinkosähkön asennuspotentiaalit ja arvioidut vuosituotannot maatalouskäytössä olevilla maa-alueilla, tavallisella asennustiheydellä (1 MW/ha) ja yhteiskäyttöasennuksissa käytettävällä asennustiheydellä (0.25 MW/ha).

Taulukko 3.5. Aurinkosähkön asennuspotentiaalit ja arvioidut vuosituotannot maatalouskäytössä olevilla maa-alueilla Etelä-Savossa. Asennustiheytenä varioitu 1 ja 0.25 MWp/ha.

Kunta	Pinta-ala		Asennuspotentiaali		Tuotantopotentiaali		Osuus (%)
	km <sup>2</sup>	ha	MWp (1MW/ha)	MWp (0.25MW/ha)	GWh/a (1MW/ha)	GWh/a (0.25MW/ha)	
Enonkoski	11.6	1 159	1 159	290	985	246	2 %
Hirvensalmi	16.1	1 613	1 613	403	1 371	343	3 %
Juva	77.7	7 766	7 766	1 942	6 601	1 650	13 %
Kangasniemi	38.8	3 883	3 883	971	3 301	825	7 %
Mikkeli	116.1	11 607	11 607	2 902	9 866	2 467	20 %
Mäntyharju	33.4	3 342	3 342	836	2 841	710	6 %
Pertunmaa	19.2	1 922	1 922	481	1 634	408	3 %
Pieksämäki	69.4	6 935	6 935	1 734	5 895	1 474	12 %
Puumala	17.2	1 719	1 719	430	1 461	365	3 %
Rantasalmi	61.2	6 122	6 122	1 530	5 204	1 301	10 %
Savonlinna	94.9	9 490	9 490	2 373	8 067	2 017	16 %
Sulkava	29.2	2 924	2 924	731	2 486	621	5 %
<b>Etelä-Savo</b>	<b>585</b>	<b>58 483</b>	<b>58 483</b>	<b>14 621</b>	<b>49 711</b>	<b>12 428</b>	-

### 3.2.4 Rakennusten kattoasennusten aurinkosähkötuotantopotentiaali

Kiinteistöjen kattorakenteet mahdollistavat aurinkosähkön tehokkaan käyttöönoton. Erityisesti julkiset rakennukset ja palvelualan kiinteistöt sopivat käyttötarkoitukseen hyvin aurinkosähkön tuotannon ajoittumisen ja asennuskohteen sähkönkäytön ajoittumisen näkökulmasta. Tässä selvityksessä erilaiset esteet ja rajoitukset katolla kuten savupiiput, ilmastointilaitteet ja tikkaat

otettiin huomioon siten, että paneeliasennuksiin on käytettävissä vain tietty osan katon pinta-alasta. Läheisistä rakennuksista ja puustosta aiheutuvat varjostukset ja epäoptimaaliset asennuskulmat harjakatoilla on huomioitu tuotannon huipunkäyttöajassa. Rakennusten kattoasennusten osalta tutkimuksessa on oletettu keskimääräinen 12.5 % täyttöaste ja 5 m<sup>2</sup>/kWp tuotantotiheys. Huipunkäyttöaikana käytettiin 650 h/a. Tulokset on koottu taulukkoon 3.6.

Taulukko 3.6. Aurinkosähkön asennuspotentiaalit ja arvioidut vuosituotannot rakennusten katoille asennetuilla voimalaitoksilla Etelä-Savossa.

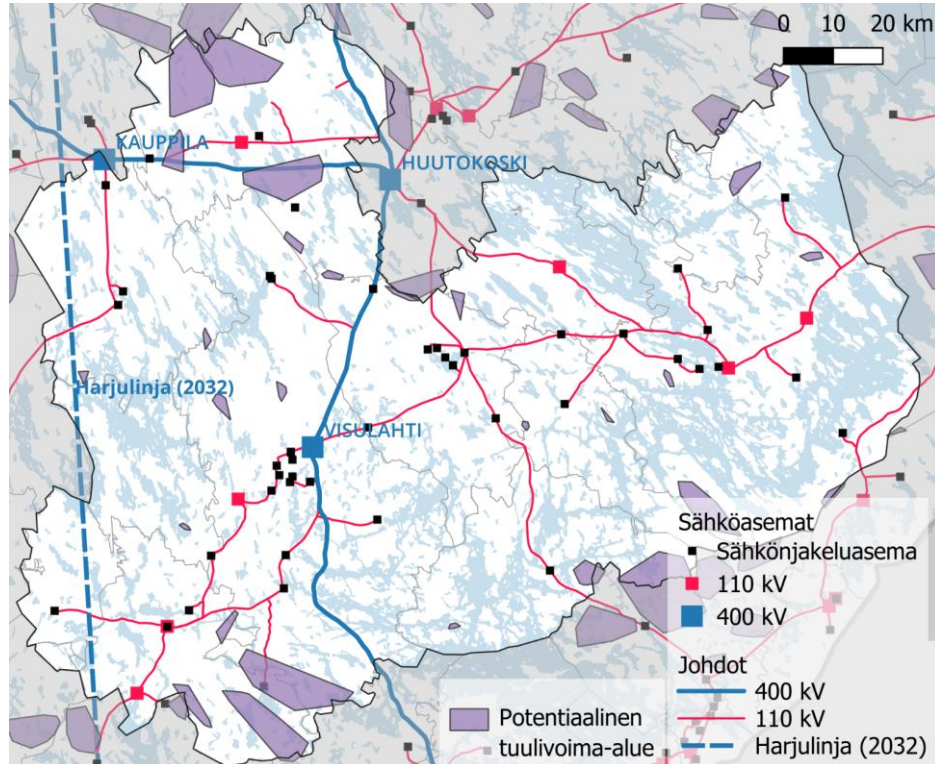
Rakennuksen tyyppi	Määrä (kpl)	Katto-pinta-ala, km <sup>2</sup>	Keskimääräinen pinta-ala, m <sup>2</sup> /katto	Asennuspotentiaali, S <sub>n</sub> , MVA	Keskimääräinen koko kWp/katto	Tuotantopotentiaali TWh/a	Osuus %
Asuintalo	4 463	8.2	165	408	8.2	0.27	29 %
Julkinen	4 463	2.2	484	108	24.2	0.07	8 %
Loma-asunto	45 731	3.1	68	155	3.4	0.10	11 %
Teollisuus	1218	1.2	974	59	48.7	0.04	4 %
Muut	218 665	14.0	64	698	3.2	0.45	49 %
<b>Yhteensä</b>	274 540	28.6	104.1	1 429	5.2	0.92	100 %

### 3.3 Energiansiirtoinfrastruktuuri

Energiantuotannon ja käytön ollessa maantieteellisesti erillään toisistaan, tarvitaan näitä yhdistävä energiansiirtoinfrastruktuuri. Keskeisimmässä roolissa tänä päivänä toimivat sähkö- ja kaukolämpöverkot sekä maakaasuverkot. Tulevaisuudessa myös vety- ja mahdollisesti CO<sub>2</sub>-verkot voivat olla osa energiajärjestelmän toimintaa tukevaa siirtoinfrastruktuuria. Tässä osiossa tarkastellaan haasteita, jotka liittyvät energian siirtämiseen tuotantopaikasta kysyntäpaikkaan, Power-to-X-kohteisiin. Kuten edellisessä osiossa todettiin, uusiutuvan energian tuotantopotentiaali on alueella valtava. Nykyinen siirtoverkko ei kuitenkaan ole riittävä kaikilla alueilla.

Olemassa olevan sähköjärjestelmän tarjotessa vahvan liityntäpisteen verkkoon, uudet tuotantoyksiköt kytketään siihen (400 kV ja 110 kV sähköasemat). Mikäli mittavaa tuulivoimapotentiaalia hyödynnetään laaja-alaisesti, on energiansiirtokapasiteettia lisättävä. Tässä selvityksessä tarkastelujen lähtökohtana käytetään aiemmin raportissa esiteltyä LUT #2 skenaariota (kappale 3.1). Skenaario voidaan katsoa optimistiseksi sekä energian tuotannon että Power-to-X sähkön kysynnän osalta.

Kuvassa 3.8 on esitetty tarkastelualueen olemassa oleva sähköverkkoinfrastruktuuri (400 kV ja 110 kV johdot ja sähköasemat), sekä potentiaaliset tuulivoima-alueet. Tuulivoima-alueet on määritetty raportissa aiemmin kuvattujen periaatteiden mukaisesti.

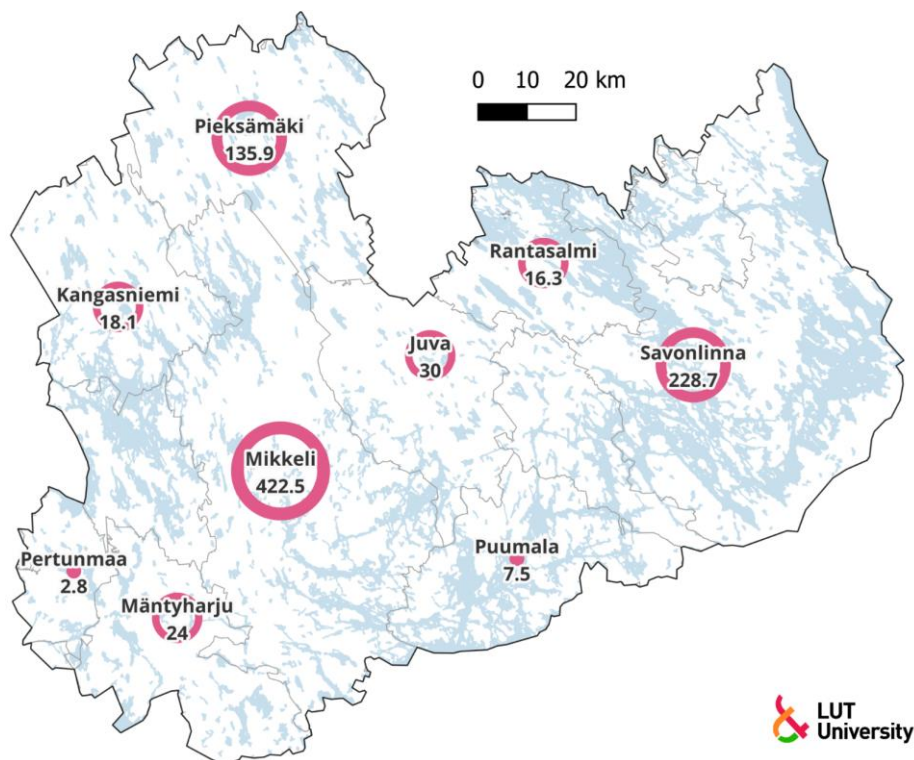


Kuva 3.8. Alueen sähköverkko ja potentiaaliset tuulivoima-alueet (LUT #2 skenaario).

### 3.4 Kaukolämpöverkot

Energiateollisuuden (2023) kaukolämpötilastojen mukaan Etelä-Savon 12 kunnasta yhdeksässä on kaukolämpöverkko. Kaukolämpöverkkojen yhteenlaskettu lämmöntuotanto alueella on n. 0.7–0.9 TWh vuodessa, riippuen vuosikohtaisesta lämpötilasta ja siten lämmitystarpeesta. Kuvassa 3.9 on esitetty kaukolämmön kulutus kunnittain. Etelä-Savon asukasluvusta vähintään 34 % asuu kaukolämmitetyissä asunnoissa. Energiateollisuuden tilastossa ei ole dataa kaukolämmitysasiakkaiden lukumääristä kaikkien kuntien osalta, joten mm. Savonlinnan, Mäntyharjun ja Kangasniemen kaukolämpöasiakkaat eivät ole mukana tässä luvussa. Mikäli arvioidaan, että kaukolämmitteisten talojen osuus vastaa muiden samankokoisten kuntien osuutta, voidaan arvioida, että noin puolet Etelä-Savon asukkaista asuu kaukolämmitteisissä taloissa. Kuluttaja-asiakkaiden lisäksi kaukolämpöä hyödyntävät monet teollisuustoimijat, kaupalliset toimijat ja kunnalliset organisaatiot pääasiassa kiinteistöjen lämmitykseen.

Taulukossa 3.7 on esitetty Etelä-Savon suurimmat kaukolämpöverkot ja verkkojen yhteenlaskettu lämmöntuotanto vuonna 2022. Nähdään, että kokonaislämmöntuotannon ja kaukolämmitystä käyttävien kuluttajien lukumäärän välinen suhdeluku vaihtelee kuntakohtaisesti. Tämä johtuu todennäköisesti teollisten ja kaupallisten toimijoiden kaukolämmönkulutuksen osuuden vaihtelusta. Lisäksi kaukolämmön kokonaistuotanto pitää sisällään mittauserot sekä verkoston lämpöhäviöt, joissa on kuntakohtaista vaihtelua, joka riippuu mm. kaukolämpöverkon laajuudesta.



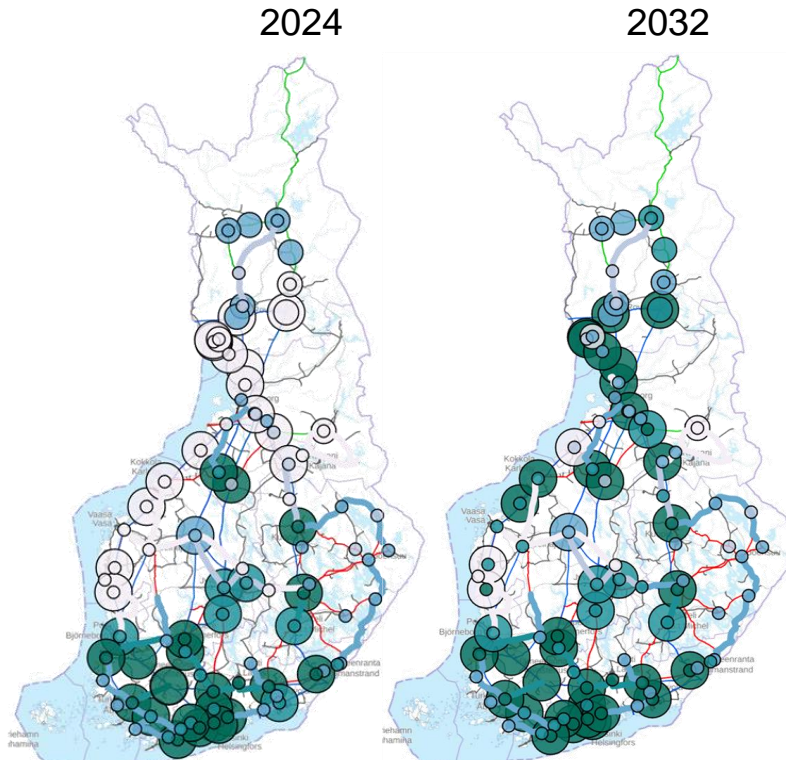
Kuva 3.9 Kaukolämmön vuosittainen kulutus (GWh) kohdistettuna kunnan suurimpaan asutuskeskukseen.

Taulukko 3.7. Etelä-Savon kaukolämmöntuotanto ja kaukolämmityskuluttajien lukumäärä 2022. (koostettu lähteestä Energiategollisuus 2023)

Kunta	Kaukolämmön tuotanto (GWh)	Kaukolämmitettyjen talojen asukasmäärät	Suhteellinen tuotanto (MWh/asukas)
Mikkeli	422.5	29 600	14.3
Savonlinna	220.8	-	-
Pieksämäki	135.9	11 100	12.2
Juva	30.0	2 770	10.8
Mäntyharju	24.0	-	-
Kangasniemi	18.1	-	-
Rantasalmi	16.3	890	18.2
Puumala	7.5	400	18.7
Pertunmaa	2.8	-	-
Sulkava	0	0	-
Hirvensalmi	0	0	-
Enonkoski	0	0	-

### 3.5 Sähköverkot

Sähkövoimajärjestelmä ja sähköverkot ovat keskeisessä roolissa energiamurroksessa. Tarve verkoille tulee sekä uusiutuvan sähköntuotantopotentiaalin (tuulivoima ja aurinkosähkö) että vedyntuotannon ja Power-to-X -teollisuuden liittämiseksi. Kuvassa 3.9 on esitetty kantaverkon uusiutuvan sähköntuotannon (tuulivoiman) nykyiset (2024) ja tulevaisuuden (2032) tiedossa oleviin investointisuunnitelmiin pohjautuvat liityntämahdollisuudet (kapasiteetit) 400 kV sähköasemilla Suomessa.

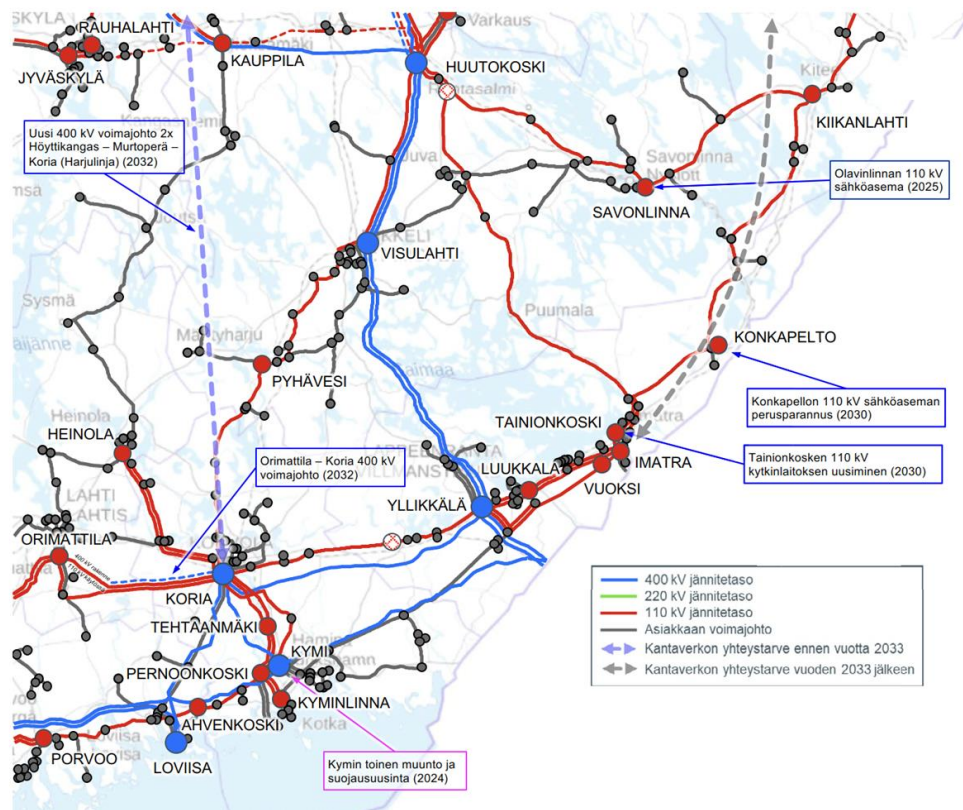


Kuva 3.9. Kantaverkon tuotannon nykyiset (2024) ja tulevaisuuden (2032) suunnitellut liittymäkapasiteetit 400 kV sähköasemilla (Fingrid 2024b). Aseman ympärillä oleva tumma rengas indikoi suurta tuotannon vapaata liittymäkapasiteettia (yleensä noin 500 MW asemaa kohti) ja vaalea rengas sitä, että asemaan ei voi kytkeä enempää tuulivoimaa.

Kuvasta nähdään, että länsirannikolle ja lappiin on muodostunut pullonkauloja uusiutuvien integroimisen näkökulmasta (tilanne 2024). Etelä- ja Itä-Suomessa on enemmän kuormitusta ja siten asemilla paremmin tilaa tuotannon lisäämiselle. Mittavan investointiohjelman myötä voimajärjestelmän siirtokapasiteetti ja asemien liityntäkapasiteetit kasvavat (tilanne 2032).

Kuvassa 3.10 on esitetty kantaverkon kehittämissuunnitelmassa olevat kantaverkon 400 kV voimajohdot ja mahdolliset laajennustarpeet itäisessä Suomessa. Itäistä Suomea koskevat vielä investointipäätöstä odottavat laajennustarpeet ja -vaihtoehdot sijaitsevat Etelä-Savon alueeseen nähden keskeisillä paikoilla kun tarkastellaan esimerkiksi tämän selvityksen eteläreunan tuulivoimapotentiaalia (kuva 3.8).





Kuva 3.11. Kantaverkon kehittämissuunnitelma Etelä-Savon ja Kaakkois-Suomen alueella (Fingrid 2024b).

Kuvassa 3.12 on esitetty Etelä-Savon ja Kaakkois-Suomen alueen ja lähialueiden 400 kV sähköasemia koskevat tuotannon liittämiskapasiteetit nykytilanteessa. Alueella ja alueen läheisyydessä on useita isoja 400 kV sähköasemia, joissa on nykyisellään liittymismahdollisuuksia tuotannolle.

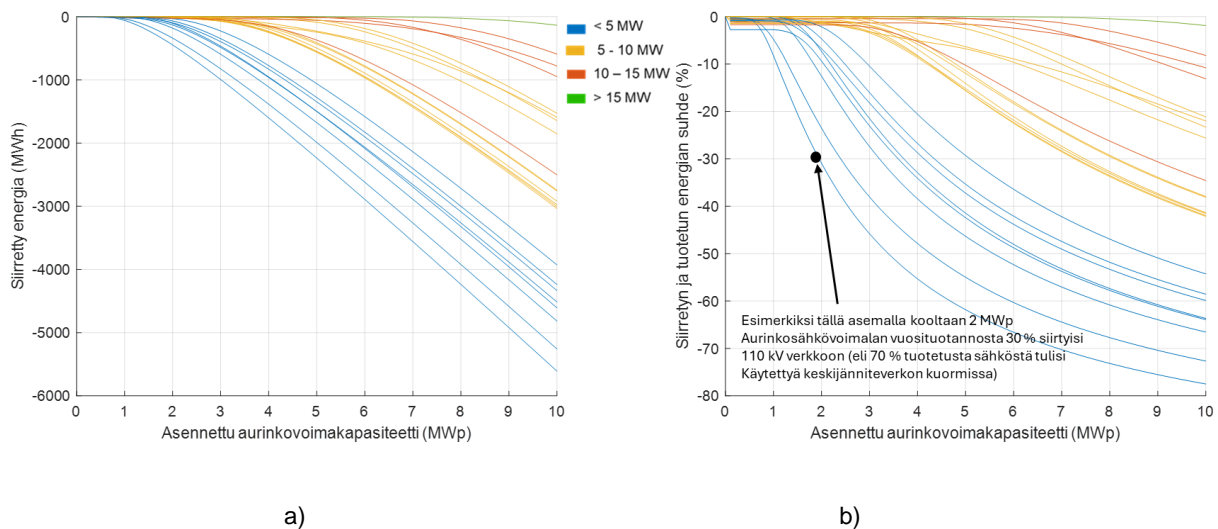


Kuva 3.12. Tuotannon nykyiset liittymäkapasiteetit (2024) Etelä-Savon alueen ja lähialueiden 400 kV sähköasemilla kantaverkossa (Fingrid 2024b). Karttapohjassa vihreällä Fingridin tiedossa olevat julkiset tuulivoimahankealueet.

Etelä-Savon alueella ei ole siinä määrin suuria julkisesti tiedossa olevia tuulivoimapuistoja ja kehityshankkeita kuin esimerkiksi Pohjois-Savon ja Kainuun alueella on.

### 3.5.1 Aurinkosähkötuotannon liitettävyyys nykyiseen sähkönsiirtoinfrastruktuuriin

Aurinkosähkötuotannon liitettävyyttä nykyiseen sähkönsiirtoinfrastruktuuriin tutkittiin tarkastelemalla sähköasemien läheisyydessä olevaa aurinkosähkötuotantopotentiaalia ja Fingridin tietoihin perustuvaa vapaata liityntäkapasiteettia. Lisäksi hankkeessa tarkasteltiin aurinkosähkötuotannon ja nykyisen kulutuksen yhteensopivuutta 110 kV:n sähköasematasolla hyödyntämällä verkkoyhtiöiden omistuksessa olevien sähköasemien mitattua kulutusdataa sekä avoimiin aineistoihin perustuvaa simuloitua aurinkosähkötuotantoa. Kuvissa 3.13a ja 3.13b on esitetty aurinkosähkön sopivuutta todellista sähköasemakuormaa vasten jaoteltuna kulutuksen huipputehon mukaan. Tarkastelussa olevien sähköasemien syöttöalueet ovat tyypiltään kesämökkialueita, haja-asutusalueita ja pieniä taajamia. Tarkastelussa on yli 20 sähköjakeluverkon 110/20 kV sähköasemaa Etelä-Savon alueelta.



Kuva 3.13. Sähköasemalta 110 kV verkkoon syötetyn aurinkosähkön määrä aurinkovoimalan koon mukaan 110/20 kV sähköjakeluverkon asemilla. Värit kuvaavat sähköaseman huippukulutusta ilman aurinkosähkötuotantoa.

Kuvasta 3.13a nähdään sähköasemakohtaisesti, missä määrin (MWh/a) eri sähköasemien kautta siirtyisi aurinkosähkötuotantoa ylöspäin sähkövoimajärjestelmässä 110 kV verkkoon, mikäli sähköaseman läheisyydessä (maksimissaan 2 km asemalta) olisi liitettynä aurinkosähkövoimalaitoksia 0–10 MWp kokoluokassa. Kuvassa 3.13b on esitettyä sama suhteutettuna aseman läpi kuormitukseen menevän sähkön määrään. Kuvasta 3.13b nähdään, että 110 kV verkkoon siirretyn tuotetun sähkön määrä lähtisi voimakkaaseen kasvuun, mikäli asemaan kytketyn aurinkosähkön määrä olisi yli 2 MWp (nykyinen kuormituksen huipputeho asemalla alle 5 MW) tai 4–5 MWp (nykyinen kuormituksen huipputeho asemalla 5–10 MW). Tarkastelu on toteutettu todellisia mitattuja tuntitason kuormitustehoja sekä alueellisia aurinkosäteilyarvoja hyödyntäen. Käytetyt rajaukset liityntäkapasiteetin ja etäisyyden osalta on esitetty taulukossa 3.8.

Taulukko 3.8. Reunaehdot aurinkosähkötarkasteluissa sähköasemien yhteydessä

	Maksimietäisyys asemasta (km)	Minimietäisyys asemasta (km)	Suurin liityntäkapasiteetti (MWp)
<b>Jakelu-yhtiöt</b>			
110 kV	2	1	2
<b>Fingrid</b>			
110 kV	5	1	100
400 kV	10	1	500

Aurinkosähkötuotannon maatalousalueiden kokonaispotentiaali on esitetty taulukossa 3.9 eri asennustiheyksillä. Taulukosta nähdään, että potentiaali on suuri asemasta riippumatta.

Taulukko 3.9. Sähköasemien läheisyydessä oleva aurinkotuotantopotentiaali maatalousmailla.

Asema ja omistaja	Jännite	Asennuspotentiaali, maatalousalueet (MWp)	
		Asennustiheys 100 MWp/km <sup>2</sup>	Asennustiheys 25 MWp/km <sup>2</sup>
Kauppila, Fingrid	400 kV	500	176
Visulahti, Fingrid	400 kV	500	389
Pieksämäki, Fingrid	110 kV	100	77
Pyhävesi, Fingrid	110 kV	100	46
Kerimäki, Fingrid	110 kV	100	86
Nurmaa, Fingrid	110 kV	100	51
Savonlinna, Fingrid	110 kV	100	83
Otava, Fingrid	110 kV	100	61
Rantasalmi, Fingrid	110 kV	100	100
Jakeluyhtiöiden asemat yhteensä	110 kV	61	-
<b>Yhteensä</b>		<b>1 761</b>	<b>1 069</b>

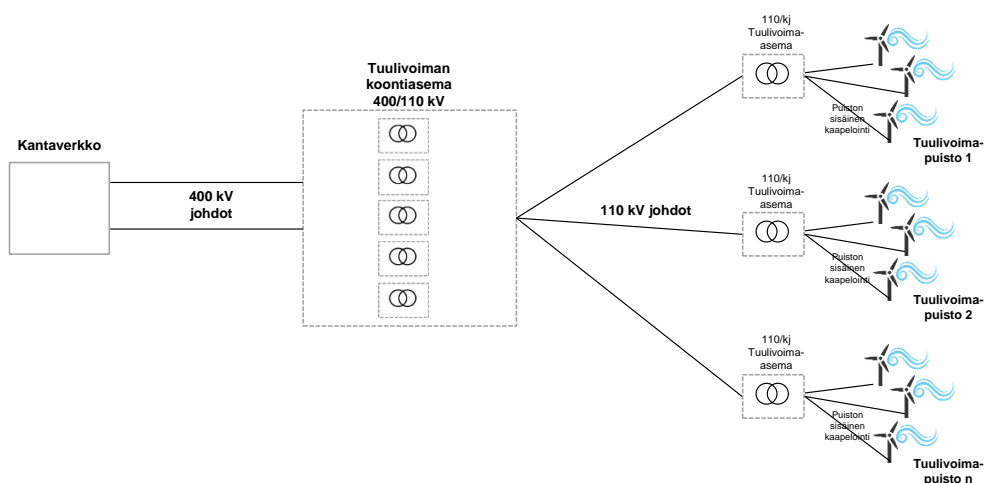
Tarkastelu osoittaa, että sähköasemien välittömässä läheisyydessä on merkittävä määrä aurinkosähköpotentiaalia maatalousalueiden osalta. Käytetyillä oletuksilla asemien laskennallisesta liityntäkapasiteetista olisi käytetty noin 95 % täydellä 100 MWp/km<sup>2</sup> asennustiheydellä ja edelleen noin 60 % pienemmällä 25 MWp/km<sup>2</sup> asennustiheydellä (maalouden ja aurinkovoiman yhteiskäyttöasennukset). Liitteessä 4 on esitetty tarkempi esimerkki aurinkotuotantopotentiaalista Fingridin 400 kV aseman läheisyydessä tarkastelussa käytetyillä rajauksilla.

Etelä-Savon alueella turvetuotantoalueet sijaitsevat pääsääntöisesti lähellä 110 kV asemia, jolloin osa potentiaalista voidaan liittää hyödyntämällä pääosin jo olemassa olevaa siirtoinfrastruktuuria. Potentiaalin liittämiseksi kokonaisuudessaan tarvittaisiin olemassa olevan 110 kV siirtoinfrastruktuurin kapasiteetin lisäystä tai uuden siirtoinfrastruktuurin rakentamista. Tällöin voidaan kuitenkin hyödyntää olemassa olevia johtokatuja. Turvetuotantoalueet ovat kuitenkin yleisesti pinta-alaltaan suuria, jolloin yksittäisten alueiden tuotantopotentiaalit ovat 100–200

MWp kokoluokkaa ja läheisiä alueita yhdistämällä noin 1 000 MWp kokoluokkaa. Tämän kokoluokan tuotantoyksiköillä siirtokustannukset ovat marginaalisessa osassa kokonaiskustannuksiin nähden, jolloin tuotannon liittäminen on teknistaloudellisesti kannattavaa suurillakin etäisyyksillä. Esimerkiksi 100 MWp kokoluokan aurinkosähkötuotannon suurimmaksi teknistaloudellisesti kannattavaksi liityntäetäisyydeksi 110 kV verkolla on arvioitu olevan noin 30 km (Pöyry 2016).

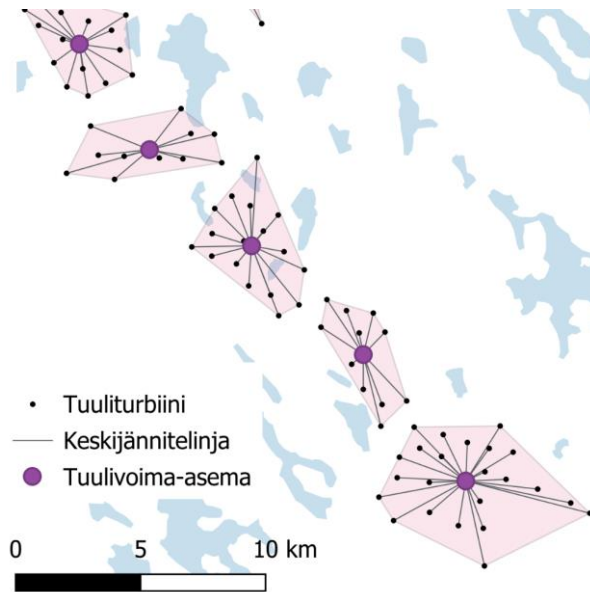
### 3.5.2 Tuotannon liityntätarkastelu ja -kustannukset

Tässä osiossa esitetään periaatteet ja arvio liityntäkustannuksista tuotannon verkkointegroinnille. Alueella on esimerkkiskenaarion mukaan teoreettista asennuskapasiteettia tuulivoimalle noin 400 turbiinille. Nämä sijoittuvat aiemmin esitetyn aineiston mukaisesti erityisesti alueen pohjois- ja eteläosiin. Verkkoliitynnän periaate on esitetty kuvassa 3.14. Yksittäiset turbiinit yhdistetään keskijänniteyhteyksin tuulivoima-asemiin, joissa jännitetaso nostetaan 110 kV tasolle. Tuulivoima-asemilta tuotanto siirretään tuulivoiman koontiasemille, joissa jännite nostetaan 400 kV tasolle.



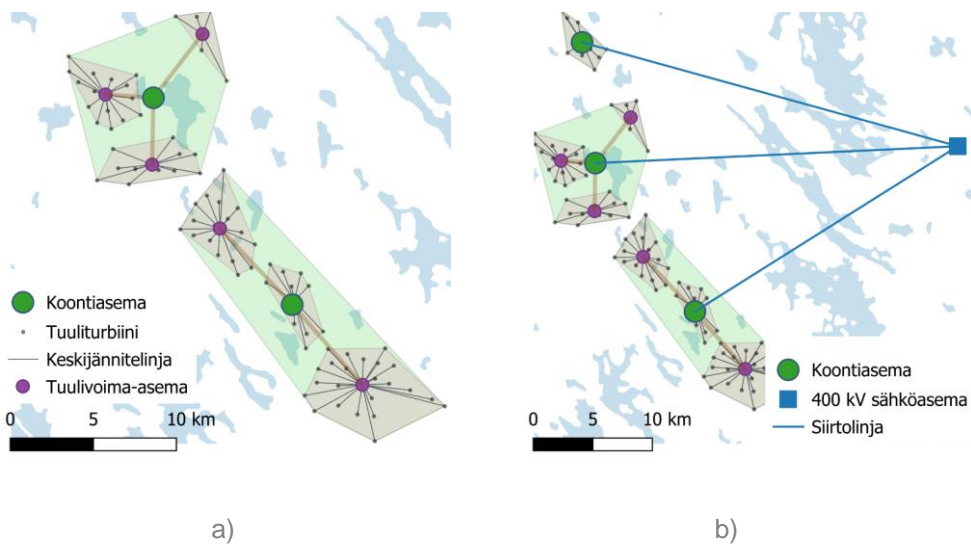
Kuva 3.14. Periaatekuva tuulivoimapuistojen verkkoliitynnästä kantaverkkoon.

Kuvassa 3.15 on esitetty turbiinien verkkoliityntä esimerkinomaisesti karttapohjalla.



Kuva 3.15. Periaatekuva tuulivoimapuistojen verkkoliitännästä kantaverkkoon.

Kuvassa 3.16a on esitetty tuulivoima-asemien yhdistäminen koontiasemaan ja kuvassa 3.16b koontiasemien yhdistäminen kantaverkon 400 kV sähköasemalle.

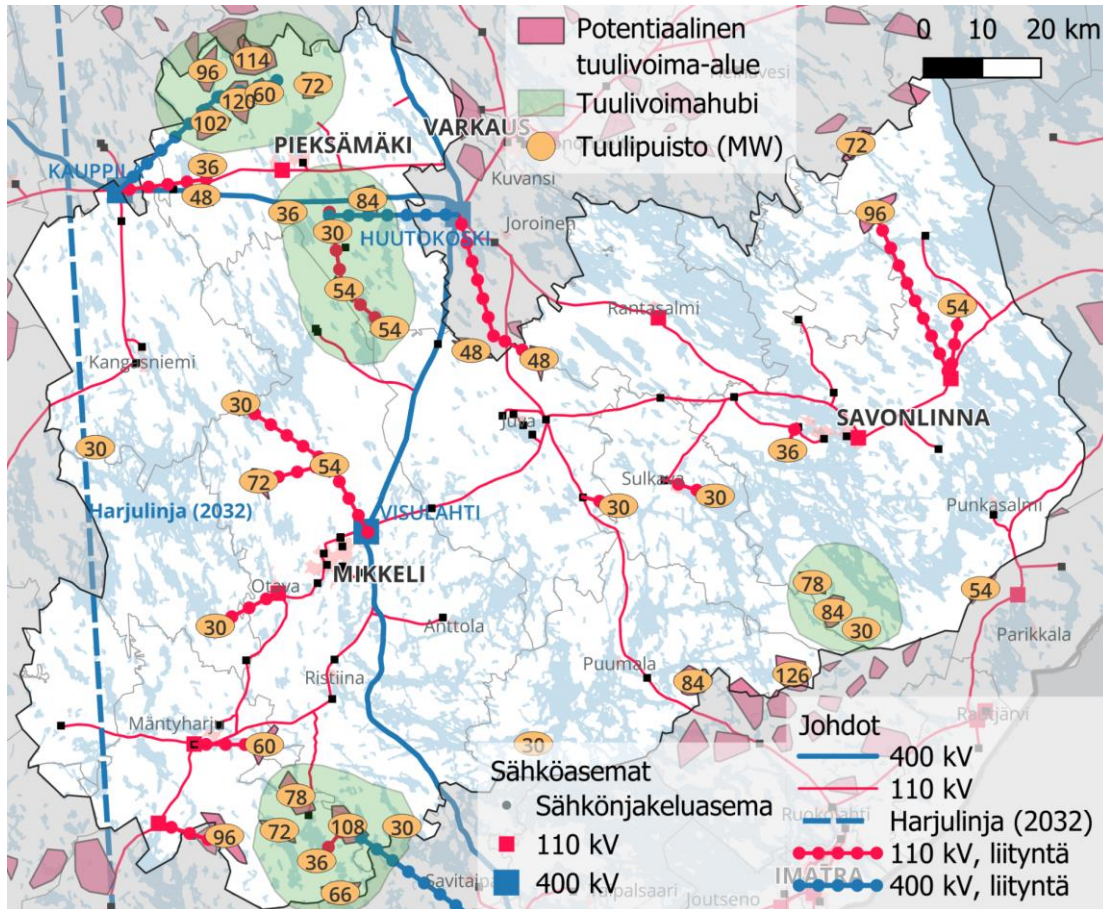


Kuva 3.16. Esimerkkikuva, jossa a) yksittäiset tuulivoima-asetat yhdistyvät tuulivoimakoontiasemaan ja b) koontiasemat yhdistyvät kantaverkon solmupisteeseen

Tuulivoiman verkkoliitännätarkastelussa on sovellettu seuraavia periaatteita.

1. **Tuulivoimapuistot:** Muodostetaan vähintään 5 turbiinin, maksimissaan 24 turbiinin (6 MVA/turbiini) kokonaisuuksia (= tuulivoimapuistoja). Mikäli ulkopuolelle jääneiden määrä on vähintään 5, muodostetaan näistä uusi tuulivoimapuisto.
2. **Tuulivoima-asema:** Tuulivoimapuiston sähköasema sijoitetaan turbiinijoukon keskipisteeseen. Sähköasemalle tarvittavien muuntajien määrä (1 tai 2 kpl asemaa kohtia) riippuu alueen turbiinien määrästä (kokonaistehosta)
3. **Tuulivoiman koontiasemat (110/400 kV):** Tuulivoimapuiston sähköasemat yhdistetään koontiasemille, tuulivoimahubeihin. Jokaista 63 MVA muuntajatehoa varten varataan suunnittelussa yksi 110 kV yhteys. Mikä tuulivoima-asemalla on päämuuntajakapasiteettia tätä enemmän, yhdistetään tuulivoima-asema tuulivoimahubiin kahden virtapiirin 110 kV johdolla. Jokainen virtapiiri kytketään omaan erilliseen kennoon tuulivoimahubissa. Yhteen tuulivoimahubiin voidaan yhdistää korkeintaan 250 MVA edestä päämuuntajakapasiteettia eli 4 x 63 MVA päämuuntajaa
4. **Kantaverkon 400 kV sähköasema:** Yhdistää tuulivoimahubit kantaverkon asemille 400 kV johdoilla. Kantaverkon 400 kV sähköasemalle voidaan liittää korkeintaan 1000 MVA edestä hubiasemia. Tuulivoimapuisto voi liittyä suoraan kantaverkon asemalle 110 kV jännitteellä, mikäli tuulivoimapuisto sijaitsee kantaverkon aseman läheisyydessä eikä alueella ole tuulivoimapuistoja niin paljoa, että tuulivoimahubille olisi tarvetta. Liittyminen edellyttää, että asemalla on käytettävissä 110 kV jännite.

Kuvassa 3.17 on esitetty periaate tuulivoiman koontiasemien yhdistämisestä lähimmille kantaverkon 400 kV sähköasemalle. Viivoilla on kuvattu kunkin koontiaseman lähin vastaava kantaverkon asema, eikä se edusta varsinaista sähkötekniistä sähkönsiirtoratkaisua. Yhdistämiskäytännöille voi myös olla vaihtoehtoisia toteuttamistapoja, esimerkiksi Mikkelin eteläpuolella oleva tuulipuistokeskittymä on lähes saman etäisyyden päässä Visulahden asemalta Mikkelin suunnalta että Ylikkälän asemalta Lappeenrannan suunnassa.



Kuva 3.17. Periaatekuva tuulivoimapuistojen (oranssit ympyrät) kytkeytymisestä suoraan tai tuulivoimakoontiasemien (tuulivoimahubien, vihreät alueet) kautta lähimmälle kantaverkon 110 kV tai 400 kV sähköasemalle. Viivoilla on kuvattu kunkin tuulivoimapuiston ja tuulivoimahubin lähin asema, eikä se edusta varsinaista johtoyhteyttä. Numerot kuvaavat puiston tehoa megawateissa.

Taulukossa 3.10 on esitetty tuulivoiman verkkoon liittämisen kustannukset LUT #2 skenaariorissa. Liittämisen kustannuksissa huomioitu infrastruktuurin rakentamisen hinta turbiineilta 400/110 kV koontiasemille saakka.

Taulukko 3.10. Tuulivoiman verkkoon liittämisen kustannukset LUT #2 skenaariossa (n. 400 turbiinia Etelä-Savossa). Laskelmissa korkokanta 5 % ja tarkastelu-aika 25 a.

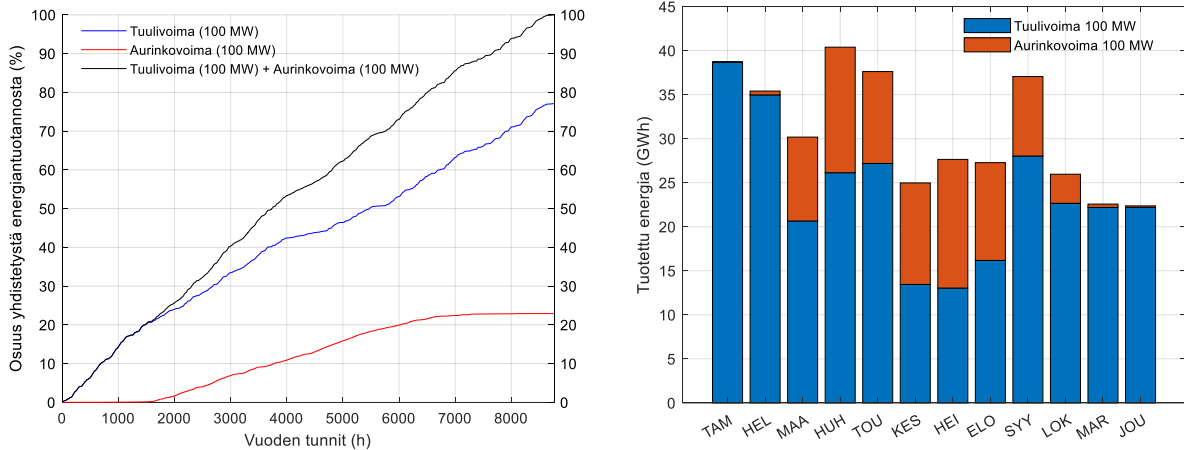
	Investoinnit		CAPEX+OPEX (3.5 %)	
	Määrä	M€	M€/a	€/MWh
Tuulivoimaturbiinit	n. 400			
Tuulivoiman verkkoliityntä tarkastelualueella				
Keskijänniteyhteydet	500-650 km	34-40	2.5-3	0.29-0.34
Tuulivoima-asetat (110 kV/kj)	41 kpl	60	4.4	0.5
110 kV johdot tuulivoima-asetilta koontiasemille	390 km	78	5.7	0.7
Tuulivoiman koontiasemat	4 kpl	80	5.9	0.7
<b>Yhteensä</b>		<b>255</b>	<b>19</b>	<b>2.2</b>

Verkkoon liittämisen suhteellisista kustannuksista suurimman kustannuserän muodostavat 400 kV koontiasemat ja verkot tuulivoimapuistojen ja koontiasemien välillä. Maantieteellinen hajanaisuus ja tuulivoimapuistokokonaisuuksien suuri koko edellyttävät lukumääräisesti suuren sähköasemamäärän. Tämä lähtökohta kannustaakin tarkastelemaan, miltä osin samoille alueille muodostuvat puistoalueet voisivat tehdä yhteistyötä siirtoinfrastruktuurin kehittämisessä. Tälle on tarvetta myös kohteissa, jotka sijoittuvat maakuntarajojen läheisyyteen. Myös joustavan teollisuuskuorman sijoittuminen tuulivoimapuistojen yhteyteen pienentäisi kanta-verkkotason kustannuspaineita. Verkkoon liitynnän kokonaisvaikutus LUT #2 -skenaariossa on keskimäärin 2.2 €/MWh tuotetulle sähkölle. Puistoja priorisoimalla on mahdollista löytää kohteet, joissa kustannukset ovat tätäkin matalammat. Lisäksi yhdistämällä saman liittymän taakse aurinkosähköä, voidaan infrastruktuurin käytön tehokkuutta (läpi siirrettyä energiaa) kasvattaa, mikä näkyy myönteisesti siirtokustannuksissa.

### 3.6 Hybridilaitokset: Tuuli- ja aurinkovoima

Tuuli- ja aurinkovoimaan perustuvat hybridivoimalaitokset hyödyntävät yhteistä infrastruktuuria energiansiirrossa. Suomessa on voimakasta kausivaihtelua uusiutuvien energialähteiden energiantuotannossa. Tuulivoimaa on eniten saatavilla talvikuukausina ja vähemmän kesäisin. Aurinkovoimaa ei talvisin ole käytettävissä lumen ja vähäisen aurinkosäteilyintensiteetin vuoksi. Keväällä ja kesällä aurinkovoimaa on tarjolla runsaasti. Kuvassa 3.18 on esitetty tuuli- ja aurinkovoiman kumulatiivinen tuotanto esimerkivuonna, josta on nähtävissä eri tuotantomuotojen energiatuottokyvyt ja tuotannon kausittainen ajoittuminen. Vaikka tuotantokapasiteettia on saman verran, aurinkovoimalla voidaan tuottaa sähköä vuoden aikana suhteessa huomattavasti vähemmän kuin tuulivoimalla. Tuuli- ja aurinkovoiman summa on tasainen

verrattuna pelkästään tuuli- tai aurinkotuotantoon, mikä voi olla keskeistä prosesseissa, jotka vaativat tasaisesti energiaa ympäri vuoden.



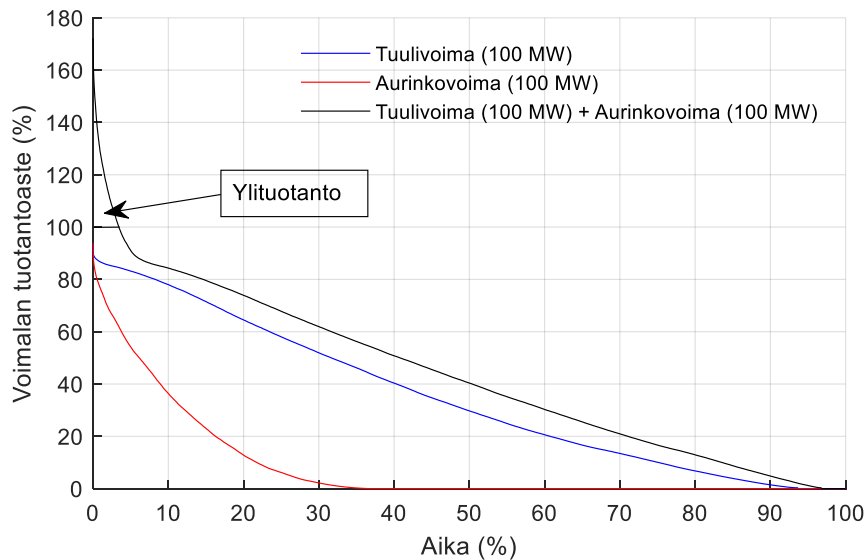
Kuva 3.18. Tuuli- ja aurinkovoiman kumulatiivinen tuotanto-osuus tuotetusta energiasta esimerkivuotena. Tulokset perustuvat LUT-Yliopiston kehittämiä tuuli- ja aurinkovoimamalleihin, joissa hyödynnetään ERA5 -säämittausdataa (Hersbach H. 2020).

Kausivaihtelun lisäksi on huomioitava myös lyhyempi ajallinen tuotannon vaihtelu erityisesti sähkövoimajärjestelmän mitoittamisen ja operoinnin näkökulmasta. Siirtoinfrastruktuuri on mitoitettava todellisten huipputehojen mukaan. Koska tuuli- ja aurinkovoima täydentävät ajallisesti hyvin toisiaan, voidaan sähköverkkoinfrastruktuurin yhteiskäytön kautta kasvattaa siirretyn energian määrää ja tällä tavoin pienentää siirron suhteellisia kustannuksia (€/MWh).

Tämän selvityksen tuuli- ja aurinkovoimamalleissa hyödynnetään tuntikohtaisia tuotantotietoja aikajaksolta 2017–2022. Tuuli- ja aurinkovoimaprofiileina on käytetty profiileja tuotannosta, jotka on koottu edustamaan alueelle tyypillistä tuotantoprofiilia. Tuuli- ja aurinkovoimaa on kumpaakin asennettu 100 MWp verran havainnollistamaan hybridivoimantuotannon profiilia.

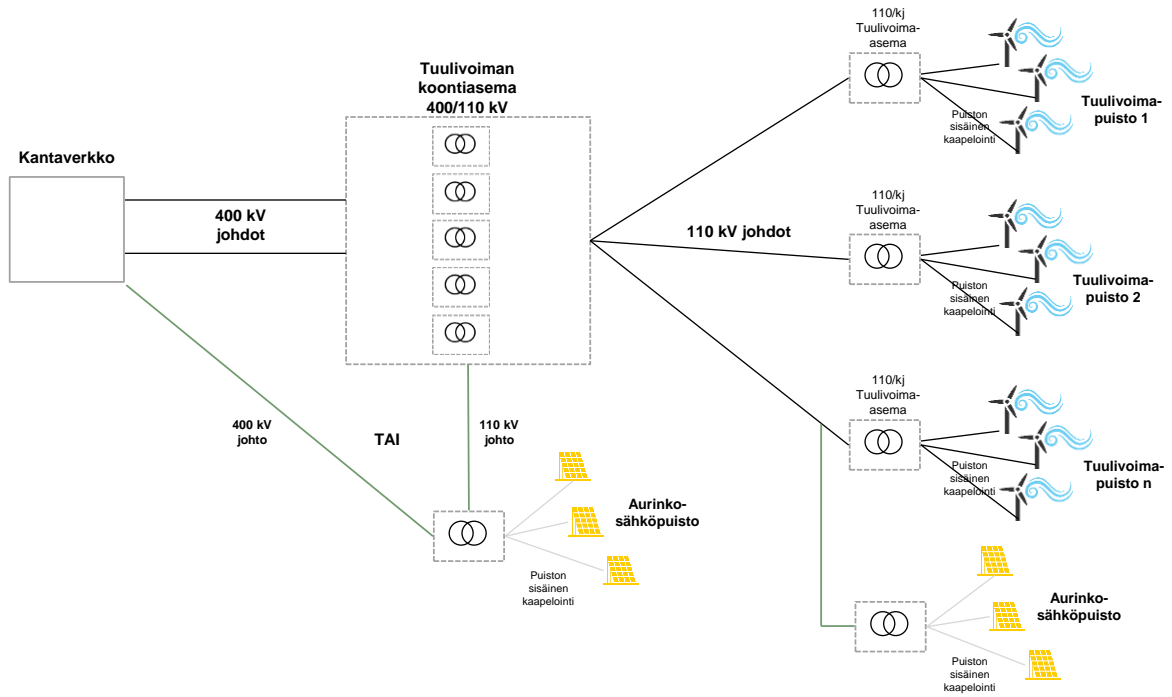
Kuvan 3.19 hybridilaitoksen tuotantotehojen pysyvyyssäyrästä havaitaan, että tuulivoiman yhteyteen rakennettava nimellisteholtaan yhtä suuri aurinkosähkövoimalaitos tukee tuulivoiman tuotantoa niin hyvin, että ainoastaan 1.63 % hybridivoimalassa tuotetusta energiasta jouduttaisiin rajoittamaan päällekkäin ajoittuvien huipputuotantotuntien takia. Yhteinen siirto- ja muuntoinfrastruktuuri voitaisiin siis mitoittaa dominoivan tuotantomuodon nimellistehon mukaan, ilman että päällekkäin ajoittuvan tuotannon takia jouduttaisiin siirtoa merkittävästi rajoittamaan. Pienen ylijäämäenergia lisäksi huipputuotantotuntien aikana sähkön hinta on

markkinoilla matala, jolloin menetetty euromääräinen tuotanto olisi suhteellisesti tätäkin vähäisempi. Onkin suositeltavaa tarkastella aurinkosähkövoimaloiden sijoittamista sekä olemassa olevien tuulivoimapuistojen että tulevaisuudessa rakennettavien puistojen yhteyteen, mikäli maankäytöllisesti tämä on toteutettavissa. Tässä selvityksessä käytettyjen aineistojen perusteella esimerkiksi turvetuotantoalueista (Etelä-Savossa yhteensä 35.7 km<sup>2</sup>) yli puolella alueista yhteiskäyttö tuulivoimalle ja aurinkosähkölle olisi mahdollista maankäytöllisistä näkökulmista. Tämä tarkoittaisi aurinkosähkön näkökulmasta lähes 1800 MWp kapasiteetin liittämismahdollisuutta sähköverkkoon eli noin 1.5 TWh/a tuotannon siirtämistä kulutuksen tarpeisiin ilman erillisen siirtoinfrastruktuurin rakentamista. Tämä ei kuitenkaan pidä sisällä aurinkosähkövoimalan sisäistä sähkönsiirtoa, joka on rakennettava ja mitoitettava kokonaan aurinkosähköjärjestelmän huipputehoja vasten. Hyöty siirtoinfrastruktuurin yhteiskäytöstä tulisi tuotantoa koavilla sähköasemilla sekä 110 ja 400 kV siirtojohdoissa.



Kuva 3.19 Hybridilaitoksen pysyvyyskäyrä 2017–2022. Arviot käyttävät LUT-Yliopiston kehittämiä tuuli- ja aurinkovoimamalleja, jotka perustuvat ERA5 säämittausdataan (Hersbach H. 2020).

Kuvassa 3.20 on havainnollistettu miltä hybridivoimalaitoksen kytkeminen siirtoverkkoon voisi näyttää. Mikäli aurinkotuotantoa ei saada kytkettyä suoraan tuulipuiston muuntajaan, täytyy aurinkopuistosta rakentaa omaa siirtoinfrastruktuuria, joka on skaalattu aurinkovoimatuotannon huipputehon perusteella, mikä lisää investointi- ja ylläpitokustannuksia.

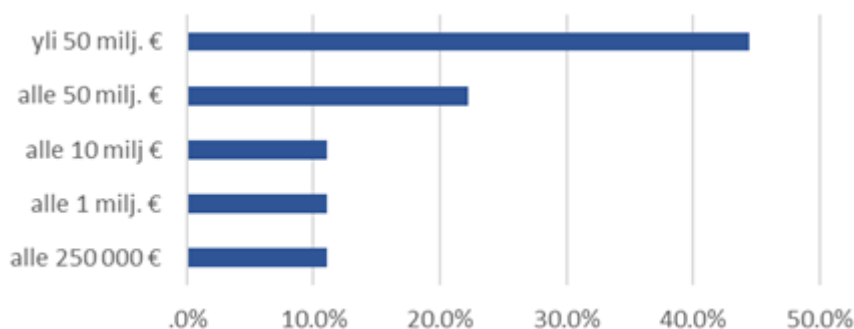


Kuva 3.20: Periaatekuva hybridivoimapuistojen vaihtoehtoisista verkkoliitännöistä tuulivoimapuiston sähköasemalle, koontiasemalle tai suoraan kantaverkkoon

## 4 Aluetoimijat ja kehitysmahdollisuudet

Hankkeessa selvitettiin Etelä-Savon alueen teollisia toimijoita ja infrastruktuureita vihreään sähköistymiseen ja vetytalouteen liittyen. Kyselytutkimuksella ja haastatteluilla selvitettiin alueen toimijoiden ajatuksia, suunnitelmia ja toimia liittyen vetytalouteen ja vihreään sähköistymiseen. Tutkimukseen osallistui yhteensä 9 alueella toimivaa yritystä, joista neljä vastasi kyselyyn ja osallistui tutkimukseen haastattelulla.

Tutkimukseen osallistuneista yrityksistä suurin osa oli alle 50 hengen yrityksiä ja muutama osallistuneista oli 50–250 hengen yrityksiä. Tutkimukseen osallistuneiden yritysten liikevaihto vaihtelee alle 250 000 €:sta yli 50 M€:oon kuvan 4.1 mukaisesti. Kyselytutkimukseen osallistuneiden toimijoiden joukossa oli mm. Suur-Savon Sähkö Oy, Lempeä Lämpö Oy, Järvi-Suomen Energia Oy, Pieksämäen Vesi Oy, ANDRITZ Savonlinna Works Oy, Suomen Säätoenergia Oy ja ESE-Energia Oy.



Kuva 4.1. Tutkimukseen osallistuneiden yritysten liikevaihto.

Tutkimuksessa selvitettiin ensin, miten vety, hiilidioksidi, happi, biotuotteet, biokaasu öljy ja tisleet tai muut kemikaalit ja aineet liittyvät yritysten nykyisiin aktiviteetteihin. Taulukossa 4.1 on esitetty yritysten vastauksia aiheesta. Kuten taulukosta näkyy, vety ei ole sellaisenaan vielä minkään tutkimukseen osallistuneen yrityksen toiminnassa mukana. Puuperäisiä polttoaineita käytetään energiantuotannossa ja polttoprosessissa syntyy hiilidioksidia. Biopolttoainetta käytetään ajoneuvoissa kuten trukeissa. Alueella sijaitsee biokaasulaitos ja biokaasulle on myös jakelua. Lämpökäsiteltyä puuta tuotetaan Thermowood-prosessilla. Maakaasua käytetään LPG-kattilan (Liquefied Petroleum Gas) polttoaineena. Yritykset mainitsivat myös joitain tiedossa olevia muutoksia taulukossa 4.1 mainittujen kohteiden suhteen, kuten polton vähentäminen ja siirtyminen sähköiseen tuotantoon. Hiilijalanjälkeä halutaan pienentää ja keinoja esittää sen toteuttamiseksi. Myös energiatehokkuutta halutaan parantaa. Puutisleiden osalta

tehdään tutkimusta, jossa selvitetään mahdollisuutta ottaa Thermowood-prosessista talteen puutisleitä, joita syntyy prosessin ylemmissä lämpötiloissa.

Taulukko 4.1 Yritysten nykyisiin aktiviteetteihin liittyviä aiheita.

Aine	Liittyy yrityksen toimintaan
Hiilidioksidi	Kattilalaitoksesta syntyy hiilidioksidia Hiilidioksidia syntyy polttoprosessissa
Biotuotteet	Puuperäiset polttoaineet Thermowood-prosessin tuotteita Trukeissa ym. ajoneuvoissa käytössä biopolttoaine
Biokaasu	Biokaasualaitos, jätevesilietteestä Mahdollisena tulevaisuuden energianlähteenä Biokaasun jakelu
Öljy ja tisleet	Thermowood-prosessin tulevaisuuden mahdollisuuksia
Maakaasu	LPG kattilan polttoaineena

#### 4.1 Hiilidioksidin lähteet ja kuluttajat

Alueen hiilidioksidilähteitä kartoitettiin perustuen EEA:n Industrial Reporting tietokantaan ja E-PRTR -rekisteriin (2023). Taulukkoon 4.2 on koottu edellä mainitun rekisterin pohjalta hiilidioksidilähteet, joiden vuosittaiset hiilidioksidipäästöt ovat yli 100 kilotonnia. Alueella toimi vielä vuoteen 2019 asti Louhen kalkkitehdas, joka ajoi toimintansa alas vähäisen kysynnän vuoksi. Kalkkitehdas oli aiemminkin suljettuna noin viisi vuotta, kunnes sen toiminta käynnistettiin uudelleen vuonna 2013.

Taulukko 4.2. Hiilidioksidin määrät suurista energia-alan laitoksista alueelta (2022).

Laitos	Yhteensä (Mt)	Biogeeninen (Mt)	Fossiilinen (Mt)
Järvi-Suomen Voima Oy, Savonlinnan voimalaitos	0.12	0.11	<0.01
Järvi-Suomen Voima Oy, Ristiinan voimalaitos (2019 tilasto)	0.15	0.14	<0.01
Etelä-Savon Energia Oy, Pursialan voimalaitos	0.30	0.24	0.06
Yhteensä	0.57	0.50	0.06

Hiilidioksidia voidaan ottaa talteen teollisuus- ja voimalaitoksista ja hyödyntää teollisuuden raaka-aineena. Synteesiprosessissa hiilidioksidi voidaan vedyn kanssa jalostaa esimerkiksi metaaniksi, metanoliksi tai vaikka lentokerosiiniksi. Vaadittu suhde hiilidioksidin ja vedyn välillä

vaihtelee lopputuotteesta riippuen. Esimerkiksi metanolia tuotettaessa stoikiometrian perusteella hiilidioksidin ja vedyn massasuhde on noin 7.28. Vedyntarpeen perusteella voidaan puolestaan arvioida sen valmistamiseen kuluva sähkö. Näin ollen esimerkiksi 100 000 hiilidioksiditonnin muuttamiseksi metanoliksi (n. 73 000 tonnia metanolia) vaaditaan noin 733 GWh sähköä vedyntuotantoon. Etelä-Savon alueella olevien voimalaitosten hiilidioksidin jalostamiseksi vaadittaisiin siis noin 3500 GWh sähköä, jos talteenottoasteeksi arvioidaan 85 %.

## 4.2 Hapen lähteet ja tarpeet

Hapen käyttöä Etelä-Savon alueella arvioitiin eri lähteiden perusteella. Suurimmat hapen käyttäjät Suomessa ovat kaivos- ja metallienjalostus, teräksen valmistus, sellu- ja paperiteollisuus sekä muu kemianteollisuus. Lisäksi happea käytetään lasiteollisuudessa, lääketieteellisessä käytössä sekä vedenkäsittelyssä (Hurskainen et al. 2017).

Selvitys teollisuuden hapen käytöstä Suomessa (Hurskainen M. et al. 2017) arvioi että Etelä-Savon alueella ei ole suuria pistemäisiä hapen käyttäjiä. Lisäksi tarkasteltiin erikseen pienempiä kuluttajia kuten vedenpuhdistusta ja lääketieteellistä hapen käyttöä. Happea käytetään pieniä määriä esimerkiksi metallintyöstössä (polttoleikkaus), mutta näitä käyttömääriä ei arvioitu tarkemmin. Lääketieteellinen hapen käyttö on asukaslukuun pohjautuva arvio ja jakautunee eri sairaaloiden ja siten eri kuntien alueelle. Suurin osa lääketieteellisen hapen käytöstä kateetaan tyyppillisesti ostokaasulla.

Etelä-Savon alueella Mäntyharjulla sijaitsee Woikoski Oy:n tuotantolaitos, jossa valmistetaan kaasuja teollisuuden, elintarviketeollisuuden sekä terveydenhuollon käyttöön. Ilmakaasutehtaan tuotantokapasiteetti on 20 000 tonnia vuodessa (Aluehallintovirasto, 2020). Tämä vastaa arviolta noin 4 600 tonnina vuotuista hapentuotantokapasiteettia.

Taulukko 4.3. Tunnistetut ja arvioidut hapen kuluttajat ja tuottajat Etelä-Savossa

Käyttäjä/tuottaja	Hapen-kulutus/tuotanto	Lähde
Lääketieteellisen hapen käyttö	143 t/a	Hurskainen, M. 2017, Kato et al. 2005 (1.1 kg/capita)
Woikoski Oy, hapen tuotanto, Mäntyharju	4600 t/a	Arvio, Aluehallintavirasto 2020

Yllä mainittujen teollisuudenalojen lisäksi vedyn elektrolyysissä sivutuotteena syntyvää happea voitaisiin käyttää esimerkiksi erilaisiin ilmastusprosesseihin tai happipolttoon voimalaitoksissa.

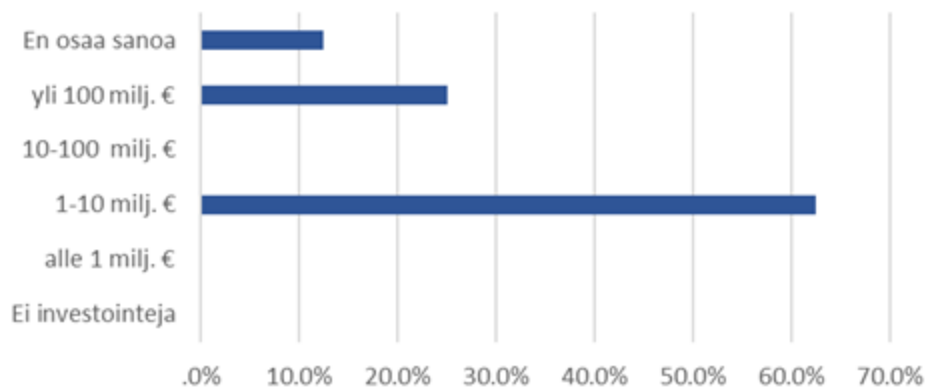
### **4.3 Vetytalouteen liittyvät suunnitelmat ja projektit**

Kyselytutkimuksella selvitettiin alueen toimijoiden suunnitelmia, aloitteita ja hankkeita liittyen vetyyn ja vihreään sähköistymiseen. Näitä on esitelty taulukossa 4.4. Suunnitelmia on olemassa liittyen biometanolin ja e-metaanin tuotantoon sekä hukkalämmön hyödyntämiseen kaukolämpönä. Lämmöntuotantoa on tarkoitus myös sähköistää mm. lämpöpumppujen ja sähkökattiloiden avulla. Sähköistymistä seurataan myös sähköverkon kehittämistarpeiden näkökulmasta. Hiilidioksidin talteenottoa on mietitty ja se olisi mahdollista, jos sille tulee kysyntää. Aurinkovoimaa halutaan rakentaa lisää ja uusiutuvaan bioenergiaan liittyen on kehitteillä hankkeita. Energian varastointi kiinnostaa yrityksiä niin sähkönä kuin lämpönäkin ja pieniä hankkeita on jo käynnissä. Vedyn varastointia ei nähty kovin vartenotettavana vaihtoehtona, vaan vety jalostetaan mieluummin suoraan lopputuotteeksi. Pieni välivarasto on kuitenkin mahdollinen.

Taulukko 4.4. Yritysten aloitteet, suunnitelmat ja hankkeet.

	<b>Aloitteita, suunnitelmia, hankkeita</b>
Vety	Mahdollisena tulevaisuuden energianlähteenä Vedystä ja hiilidioksidista halutaan tehdä e-metaania
Metanoli	Kehitetty konsepti biometanolitehtaalle
Metaani	P2G-hankkeita, joissa lopputuote e-metaani tai nesteytetty e-metaani
Hiilidioksidi	Hiilidioksidin talteenottoa, hyötykäyttöä ja varastointia on mietitty. Meidän tuottamaamme hiilidioksidia kohtaan on kiinnostusta. Hiilidioksidin talteenotto voimalaitokselta ja hyötykäyttö kaasumaisiksi tuotteiksi.
Sähkön ja lämmön tuotanto	Biokaasulaitos Lämmön talteenotto prosessista Elektrolyysiprosessin hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpönä
Aurinkovoima	Aurinkosähköjärjestelmiä lisätään jatkossa vuosittain Nykyisen aurinkoenergiavoimalan laajentaminen
Tuulivoima	Uusiutuvaa sähköä ostetaan sopimuksilla.
Bioenergia	Biokaasulaitos Kehitetään hankkeita liittyen uusiutuvaan bioenergiaan.
Kaasumaiset biopolttoaineet	Biokaasulaitos
Järjestelmien sähköistys	Osana kuumaöljyjärjestelmän lämmöntuotantoa Lämpöpumppuja tulossa viiden vuoden sisällä, jos on sopivia hukkalämmönlähteitä tarjolla Kaukolämpö sähköistyy, lämpöpumput, sähkökattilat Sähköistymistä seurataan aktiivisesti verkon kehittämisen näkökulmasta ja pullonkauloja pyritään ratkomaan.
Energian varastointi sähkönä	Akku Pieniä hankkeita on sekä sopimuksia pienten toimijoiden kanssa. Kiinnostaa kovasti ja seurataan mitä tapahtuu, kuntien kanssa tehdään yhteistyötä asiassa. Kehitetään hankkeita liittyen sähkön joustavaan varastointiin.
Energian varastointi lämpönä	Korkeamman lämpötilaluokan 150-250 C varastointiin sekä alemman luokan >100 C varastointiin. Lämpövarastoja selvitetty, kausivarastointi olisi kiinnostavaa
Vedyn varastointi	Pieni välivarasto mahdollinen mahdollisessa biometanolitehtaassa

Kuvassa 4.2. on esitetty tutkimukseen osallistuneiden yritysten arvio yrityksen vetyyn, uusiutuvaan energiaan ja energian varastointiin liittyvistä investoinneista vuoteen 2030 mennessä. 62.5 % arvion antaneista yrityksistä arvioi investointien olevan 1–10 M€. 25 % arvioi investointien olevan yli 100 M€.



Kuva 4.2. Yritysten arvio vetyyn, uusiutuvaan energiaan ja energian varastointiin liittyvistä investoinneista vuoteen 2030 mennessä.

Käyttöönoton haasteita Taulukossa 4.5 on esitelty tutkimuksessa esille tulleita haasteita, joita on liittynyt vastaajien hankkeisiin liittyen vihreään siirtymään ja vetyhankkeisiin. Kehittyvä ala asettaa vaatimuksia lainsäädännölliselle, taloudelliselle ja siirtoinfrastruktuurille. Uuden teknologian kehittämiseen ja käyttöönottoon liittyy aina asioita, jotka pitää ratkaista.

Taulukko 4.5. Hankkeisiin liittyviä haasteita

	<b>Hankkeisiin liittyviä haasteita</b>
Lainsäädäntö	<p>Kiinteistön rakenteet eivät kestä aurinkopaneelien painoa.</p> <p>Kun tehdään uutta lainsäädäntöä uuteen asiaan, pitää käydä avointa keskustelua, jotta eri puolet asiassa tulee huomioitua ja lainsäädäntö vastaa tarkoitustaan.</p> <p>Regulaatio voi myös tukea markkinaa, jolloin vähähiilisille ratkaisuille löytyy loppukäyttäjiä.</p> <p>Lainsäädännöltä odotetaan pysyvyyttä, jolloin hankkeita on helpompi suunnitella pitkällä tähtäimellä.</p> <p>Haasteena erilaiset tulkinnat laista.</p> <p>Lainsäädännön tulisi huomioida myös verkon kehitystarpeet erityisesti Itä-Suomen alueella.</p> <p>Huoltovarmuuden tulisi olla huomioituna kaikissa laeissa.</p>
Kansallinen turvallisuus	<p>Puolustusvoimat tulee pitää mukana keskusteluissa, kun uusia hankkeita suunnitellaan.</p> <p>Itä-Suomessa tuulivoima ei edisty. Alueellinen energiantuotanto Itä-Suomessa on erittäin tärkeää monelta kannalta, työpaikkojen, väestönkehityksen, talouspolitiikan, teollisuuspolitiikan ja maanpuolustuksen kannalta.</p>
Paikallisten asukkaiden vastustus	<p>Paikallisten asukkaiden kanssa kommunikointi ympäristölupavaiheessa on tärkeää.</p> <p>Jos odotettavissa on pitkä ja raskas luvitusprosessi valitusmenettelyineen, prosessiin ei ehkä edes lähdetä sillä alueella.</p> <p>Ei ole olemassa hyväksytyä tapaa tuottaa energia, mutta sitä tulee aina olla riittävästi ja edullisesti tarjolla.</p> <p>Paikallisten asukkaiden vastustus näkyy verkkoyhtiössä, kun tehdään uusia linjoja.</p>
Teknologian saatavuus ja suorituskyky	<p>Regulaatio huomioitava</p> <p>Valmiiden ratkaisujen puuttuminen</p> <p>Vaikka teknologiaa olisi ennestään olemassa, kokoluokka tuo omat haasteensa.</p> <p>Uusiutuvan sähkön saatavuudella voi olla rajoitteita.</p> <p>Tekniikan toimivuus on yksi suurimmista haasteista.</p> <p>Teknologiaa kehitetään ja sitä tulee tarjolle, kun sille on tarvetta.</p> <p>Biokaasulaitoksen rakentamisen aikataulun myöhästyminen.</p>
Taloudellinen kannattavuus	<p>Lämmöntuotto ilmalämpöpumpuilla (talvi merkittävä riski)</p> <p>Tulee aina huomioida yrityksen hankkeissa. Haasteita voi olla esimerkiksi alueen soveltuvuudessa hankkeelle.</p> <p>Uuden kehitys on aina alussa tinkimistä, ennen kuin taloudellinen kannattavuus saavutetaan.</p>
Henkilöstö	<p>Resurssipula</p> <p>Valmiiksi koulutettua henkilöstöä ei ole. Pitää varautua itse kouluttamaan.</p> <p>Henkilöstölle on tarvetta erityisesti toimitusketjun alkupäässä.</p> <p>Sähköverkon rakentaja on niukasti tarjolla.</p> <p>Riski on olemassa, että henkilöstön saatavuus huononee.</p> <p>Halu tehdä etätöitä voi hankaloittaa koulutetun työvoiman saantia reuna-alueelle.</p>
Rahoitus	<p>Yksi suurimmista haasteista.</p> <p>Alueverkkojen rahoitus ratkaistava jotenkin. Verkko on mitoitettu kulutuksen mukaan ja jos tuotantoa on moninkertainen määrä, verkko ei riitä. Sähköverkon kehityksen osalta haastava "muna-kana" -tilanne: valvontamalli ei mahdollista ennakkoinvestointeja, jolloin rahoitusta on vaikea saada. Ei ole reilua ottaa kuluttajilta, jos pullonkauloja ruvetaan hoitamaan pois ja verkkoa ruvetaan kehittämään sähköntuotannon näkökulmasta.</p>

Kuten taulukosta 4.5 voidaan havaita, lainsäädännöltä toivotaan ennen kaikkea pysyvyyttä, jotta uusia hankkeita on helpompi suunnitella pitkällä tähtäimellä. On myös tärkeää käydä avointa keskustelua, kun uutta lainsäädäntöä tehdään, jotta kaikki puolet tulee huomioitua ja lainsäädäntö vastaa sille asetettua tarkoitusta. Pitkä ja raskas lupaprosessi valitusmenettelyineen voi aiheuttaa hankkeille omat haasteensa ja paikalliset asukkaat on huomioitava hankkeiden eri vaiheissa. Puolustusvoimat tulee pitää myös mukana keskusteluissa erityisesti, kun puhutaan Itäisen Suomen hankkeista. Uuden teknologian toimivuus ja saatavuus voi olla haaste ja kokoluokka voi tuoda omat haasteensa, vaikka teknologia olisi olemassa ennestään. Teknologian osalta pitää huomioida myös regulaatio. Taloudellinen kannattavuus tulee huomioida aina yritysten hankkeissa. Uutta kehitettäessä erilaiset rahoitusmallit ovat tärkeässä asemassa ja usein hankkeen oma taloudellinen kannattavuus saavutetaan vasta myöhemmin. Uutta kehitettäessä tiedostetaan, että valmiiksi koulutettua henkilökuntaa ei ole saatavissa, vaan sellaista pitää varautua kouluttamaan. Koulutetun työvoiman saannissa haasteta voi tuoda lisää myös alueen sijainti ja nykyisin paljon toivottu mahdollisuus etätyöskentelystä. Sähköjakelun alueverkon kehittämisen osalta on nähtävissä suuri haaste rahoitukseen ja regulaatioon liittyen.

## 5 Sektori-integraatio ja sivuvirtojen hyödyntäminen

Monet PtX teknologioihin liittyvät prosessit tuottavat sivutuotteena lämpöä, ja vaativat siten jäähdytystä. PtX teknologiat pitävät sisällään monia erilaisia prosessipolkuja ja lopputuotevaihtoehtoja, mutta useimmissa vaihtoehtoisissa tarvitaan vetyä. Vedyn elektrolyysi ja kompressointi tuottavat sivutuotteena merkittäviä määriä lämpöä, joten tässä työssä keskitytään tarkastelemaan vedyntuotannon hukkalämpövirtoja.

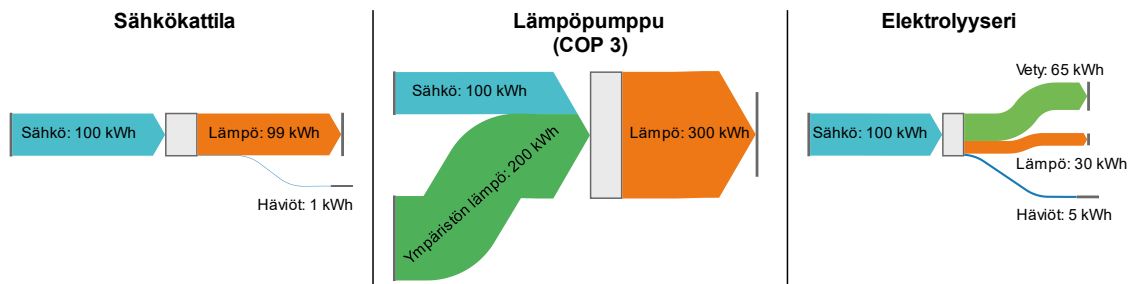
Hukkalämpövirtoja voidaan käyttää monissa erilaisissa lämpöä tarvitsevilla kohteilla ja sovelluksissa. Raportissa Kiviranta P. et al. (2023) tarkasteltiin vedyntuotannon lämpövirtojen hyötykäyttöä. Tunnistettuja mahdollisia hyödyntämiskohteita olivat mm. paperiteollisuus, kemianteollisuus, elintarviketeollisuus ja rakennusteollisuus. Lisäksi hiilidioksidin kaappaus ilmasta (DAC) tunnistettiin potentiaaliseksi suurina lämpömääriä vaativaksi kohteeksi tulevaisuudessa. Erityisen mielenkiintoisia hyödyntämiskohteita elektrolyysin jäähdytyksessä syntyvälle lämmölle ovat kohteet, joissa tarvittavan lämmön lämpötilataso on matala, ja siten kalliilta lämpöpumppuinvestoinnilta voidaan välttyä. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi kylpylät, uimahallit, kasvihuoneet, elintarvike- ja meijeriteollisuus sekä katujen ja ulkoalueiden sulana pito.

Tässä raportissa tarkastellaan lämpövirtojen hyödyntämistä kaukolämpöverkoissa, sillä kaukolämpöverkkojen lämmöntarve on merkittävä, lämpöverkkoja on monilla alueilla ja lämmöntarve on tiedossa. Lisäksi monet yllä luetellut potentiaaliset lämmönkäyttäjät ovat kaukolämmönkäyttäjät, jolloin näiden kuluttajien lämmönkäyttö mahdollisesti sisältyy alueellisen kaukolämpöverkon kulutukseen.

### 5.1 Kaukolämpö

Kaukolämmöntarve koostuu rakennuksien lämmityksen, käyttöveden lämmittämisen, verkoston lämpöhäviöiden sekä mahdollisten teollisten lämmönkäyttäjien lämmöntarpeesta. Lämmöntarve riippuu ulkolämpötilasta ja vaihtelee voimakkaasti vuoden aikana. Perinteisesti kaukolämpöä on tuotettu polttoprosessissa muuntamalla polttoaineen kemiallinen energia lämmöksi. Uusiutuvan sähköenergian tuotantoa voidaan käyttää kaukolämmön tuotantoon suoraan esimerkiksi sähkökattilan avulla, tai hyödyntämällä lämpöpumppuja, jotka hyödyntävät sähköä lisäksi saatavilla olevaa matalalämpötilaista lämmönlähdettä, kuten esimerkiksi vesistön, maaperän tai ilman lämpöä. Kolmas mahdollinen reitti on hyödyntää esimerkiksi

elektrolyyttisen vedynvalmistuksen hukkalämpöä. Kuvassa 5.1 on esitetty näiden kolmen uusiutuvaan sähköenergiaan pohjautuvan lämmöntuotantotavan energiavirtojen Sankey-diagrammit.



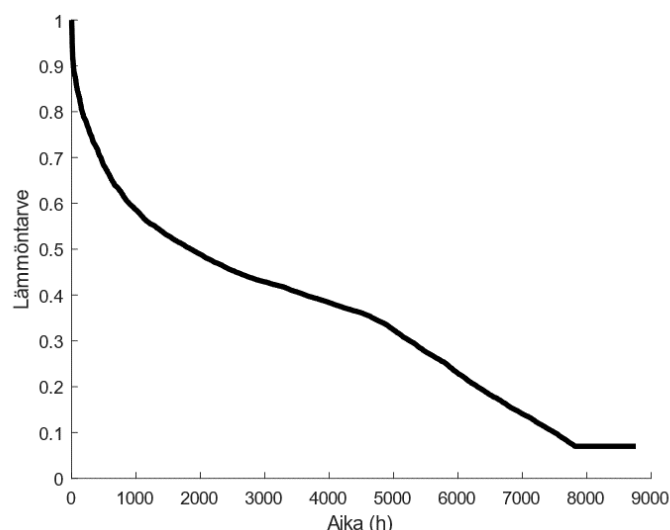
Kuva 5.1. Sankey diagrammi sähkökattilan, lämpöpumpun ja vedyn elektrolyyserin energiavirroista.

Lämpöpumpuilla voidaan tyypillisissä sovelluksissa saavuttaa tehokerroin 3–4, jolloin samasta määrästä sähköenergiaa saadaan huomattavasti enemmän lämpöenergiaa verrattuna suoraan sähkölämmitykseen (Andrei D. et al. 2017). Tarkka tehokerroin riippuu kuitenkin sekä lämmönlähteen että lämmönkäytön lämpötilatasosta, lisäksi on huomattava että huippupakkailla nykyisissä kaukolämpöverkoissa vaadittava, jopa 120°C lämpötilataso, asettaa haasteita lämpöpumpun suunnittelulle. Lämpöpumppujen täysimittainen käyttö kaukolämmön tuotantoon vaatii joko korkean lämpötilatason lämpöpumppuja tai muutoksia lämpöverkossa, esimerkiksi siirtymistä ns. matalalämpötilaisiin kaukolämpöverkkoihin. Mahdolliset tulevaisuuden matalalämpötilaiset kaukolämpöverkot voivat parantaa eri matalalämpötilaisten lämpövirtojen suoraan hyödynnettävyyttä merkittävästi (Böhm H. et al. 2021).

Myös elektrolyyserien sivutuotteena syntyvän lämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkoissa vaatii todennäköisesti lämpöpumpun käyttöä, lämpöverkon muutoksia tai muita järjestelyjä, sillä elektrolyyserien matala käyttölämpötila ei mahdollista koko lämpöenergian suoraa hyödyntämistä sellaisenaan nykyisien lämpöverkkojen lämpötilatasoilla. Elektrolyyserien hukkalämmön täysimittainen käyttö nykyisissä lämpöverkoissa vaatii vähintään talvikuukausina lämpötilatason noston riittävälle tasolle, jotta kaukolämpöverkko toimisi suunnitellusti. Vedyntuotannon yhteyteen järjestetty lämmön talteenotto parantaisi järjestelmän kokonaistehokkuutta sekä epäsuorasti alentaisi vedyn tuotantokustannusta, joten lämmön hyödyntämiselle on myös kannusteita. Meriläinen et al. (2024) arvioi elektrolyyserilämmön käyttöä

kaukolämpöverkoissa, ja totesi että lämmöntuotannon hinta on kohtuullinen nykyisillä kustannusoletuksilla, ja lämpöpumput muodostavat suuren osan kustannuksesta.

Kaukolämmöntarpeen aikasarjoja voidaan tuottaa perustuen avoimeen dataan, kuten ulkolämpötilaan ja tunnettuun kokonaislämmöntarpeeseen. Tässä työssä kaukolämmöntarpeen aikasarjat luotiin käyttäen paikkakuntakohtaista ERA5 ulkolämpötiladataa sekä Energiategollisuuden kaukolämpötilastojen arvoja kokonaislämmöntarpeesta vuoden aikana. Aikasarjat perustuvat oletuksiin, että minimilämmöntarve saavutetaan  $+15^{\circ}\text{C}$  ulkolämpötilassa, ja että minimilämmöntarve on 7 % maksimitehosta (Ruhnau, O. 2019; Triebs, M. 2022). Maksimiteho iteroitiin paikkakuntakohtaisesti niin että kokonaislämmöntarve vuositasolla vastaa kaukolämpötilastojen arvoja. Lämmöntarpeen oletettiin käyttäytyvän lineaarisesti maksimi- ja minimitehon välillä. Kuva 5.2 esittää lämmöntarpeen pysyvyyskäyrää yhden kunnan ulkolämpötilaprofiilille.



Kuva 5.2 Esimerkki kaukolämmöntarpeen aikasarjasta järjestettynä pysyvyyskäyräksi. Lämmöntarve skaalattu suhteessa maksimitehoon.

Paikkakuntakohtaiset erot erityisesti kaupallisten ja teollisten lämmönkäyttäjien määrässä saattavat johtaa siihen, että mallinnettu kaukolämpöteho ei vastaa todellista kaukolämpötehoa. Malli ei myöskään huomioi ihmisten käyttäytymisestä johtuvia lämmöntarpeen vaihteluita, kuten esimerkiksi lämpimän käyttöveden tarpeen vaihtelua, johon vaikuttaa vuorokaudenajan lisäksi esimerkiksi viikonpäivä. Taulukko 5.1 esittää kaukolämpöverkkomallien tulokset kunta-kohtaisesti. Samaan taulukkoon on lisäksi yhdistetty kaupunkien ja kuntien uusiutuvan energian tuotantopotentiaali kaukolämmön tarpeeseen suhteuttaen. Tässä yhteydessä uusiutuvan energian tuotantopotentiaalilla tarkoitetaan tuulivoiman osalta LUT #3-skenaariota, ja

aurinkovoiman osalta mukaan on laskettu käytöstä poistetut maatalousalueet sekä turvetuotantoalueet. Uusiutuvan energian tuotantopotentiaalia puolestaan suhteutettiin alueelliseen kaukolämmöntarpeeseen, arvioimalla kuinka suuri osa uusiutuvan energian tuotantopotentiaalista olisi kussakin kunnassa hyödynnettävä, jotta kaukolämmöntarve ja lämmöntuotanto täsmäisivät. Tulokset on esitetty kahdelle erilaiselle lämmöntuotantomenetelmälle – hyödyntäen joko vedyntuotannon sivutuotteena syntyvää lämpöenergiaa, tai lämpöpumpuilla tuotettavaa lämpöä.

Taulukko 5.1. Kuntakohtainen kaukolämpömallin huipputeho. Osuus uusiutuvan energian tuotantopotentiaalista, joka olisi käytettävä kaukolämmöntuotantoon eri lämmöntuotantomenetelmillä.

Kunta	Kaukolämmön tuotanto	Kaukolämmön huipputeho	Tuotantopotentiaalista käytettävä vedyntuotantoon, jotta hukkalämpö vastaa kaukolämpötuotantoa	Tuotantopotentiaalista käytettävä lämmöntuotantoon (COP 3), jotta vastaa kaukolämpötuotantoa
Mikkeli	423 GWh	122 MW	25 %	2.5 %
Savonlinna	229 GWh	67 MW	11 %	1.1 %
Pieksämäki	136 GWh	40 MW	5.3 %	0.5 %
Juva	30 GWh	9.1 MW	2.0 %	0.2 %
Mäntyharju	24 GWh	6.7 MW	3.1 %	0.3 %
Kangasniemi	18 GWh	5.0 MW	1.6 %	0.2 %
Rantasalmi	16 GWh	4,9 MW	5.9 %	0.6 %
Puumala	7.5 GWh	2.2 MW	1.1 %	0.1 %
Pertunmaa	2.8 GWh	0.8 MW	2.7 %	0.3 %
Sulkava	0 GWh	0 MW	-	-
Hirvensalmi	0 GWh	0 MW	-	-
Enonkoski	0 GWh	0 MW	-	-

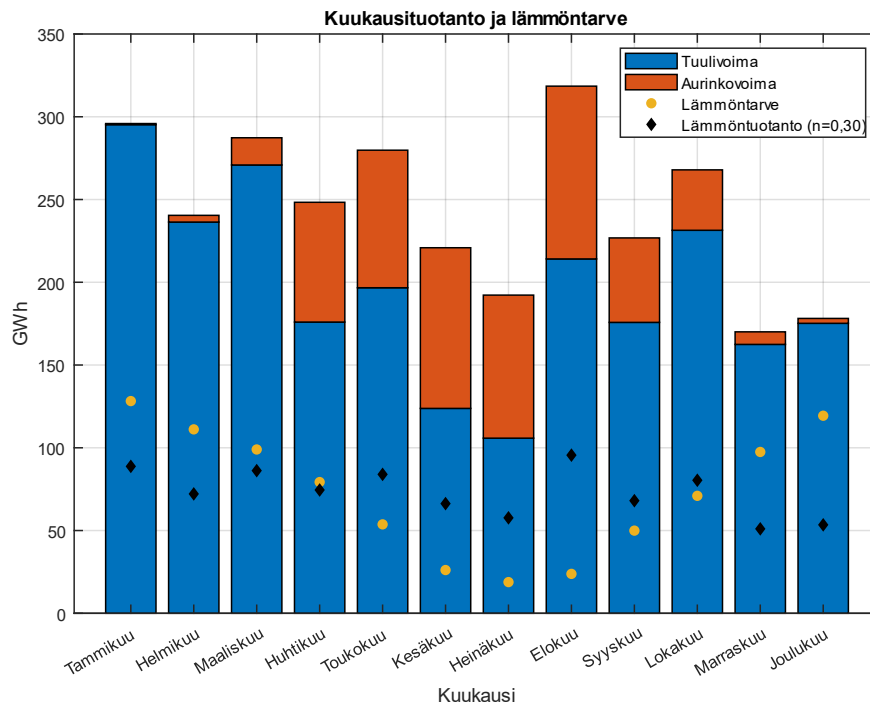
Mikäli suhteellisen pieni määrä alueellisesta uusiutuvan energian potentiaalista (n. 5 % tai vähemmän) käytetään vedyntuotantoon, sivutuotteena syntyvä hukkalämpö riittäisi vuositasolla kattamaan koko kaukolämmön tarpeen pienemmissä kaukolämpöverkoissa. Kuitenkin suuret asutuskeskittymät erottuvat korkealla lämmöntarpeellaan, ja suhteessa lämmöntarpeeseen pienemmällä uusiutuvan energian tuotantopotentiaalilla. Kolmen suurimman kaukolämpöverkon osalta arvioidusta uusiutuvan energian tuotantopotentiaalista pitäisi hyödyntää vedyntuotannossa 5–25 %, jotta elektrolyysissä syntyvä hukkalämpö riittäisi kattamaan vuositasolla kaukolämmön tarpeen. Käytännössä kaukolämpöjärjestelmää ei voida rakentaa pelkästään elektrolyysin hukkalämmön varaan, mutta tarkastelulla voidaan hahmotella laitoskokojen ylärajoja ja suunnitella muita energiajärjestelmän osakokonaisuuksia. Tarkastelu myös osoittaa

että pienemmissä kunnissa kaukolämpöverkkojen lämmöntarve täyttyy melko pienellä alueellisen uusiutuvan energian potentiaalin hyödyntämisellä.

### 5.1.1 Varastointitarve

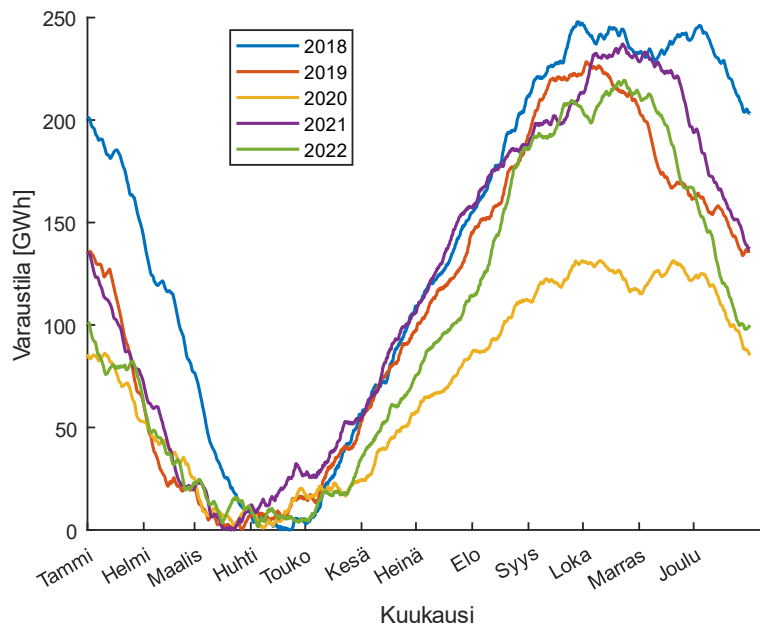
Pelkkä vuositaselämmön tuotannossa ja lämmönkulutuksessa ei anna täysin oikeaa kuvaa lämmön hyödynnettävyydestä, sillä sekä uusiutuvan energian tuotanto että lämmitysenergian tarve vaihtelee vuoden aikana voimakkaasti. Meriläinen ym. (2024) tutkivat vedyntuotannon sivutuotteena syntyvän lämmön hyödynnettävyyttä Pohjoismaisessa kaukolämpöverkossa ja lämpövaraston tarvittavaa kokoa. Työssä optimoitiin eri komponenttien mitoitus minimilämmöntuotantokustannuksien aikaansaamiseksi. Systemi koostui tuuli- ja aurinkovoimasta, alkalielektrolyyseristä, lämpöpumpusta, sähkökattilasta sekä suuren mittakaavan lämpövarastosta. Mikäli 100 % alueellisesta lämmöntarpeesta tuotettaisiin elektrolyyserin sivutuotteena syntyvästä lämmöstä sekä sähkökattilalla, arvioitiin lämmöntuotannon kustannukseksi noin 45 €/MWh. Optimitalauksessa tuuli- ja aurinkovoiman kapasiteetit olivat noin yhtä suuria, mutta erilaisien huipunkäyttöaikojen takia noin 3/4 tuotetusta sähköenergiasta tuotettiin tuulivoimalla.

Kuvassa 5.3 on esitetty esimerkki tapauksesta, jossa Etelä-Savon kaukolämmöntarve ja lämmöntuotanto elektrolyyserien sivutuotteena täsmäävät vuositasolla. Uusiutuvan energian tuotanto, elektrolyyserien lämmöntuotanto sekä kaukolämmöntarve on esitetty kuukausitasolla. Elektrolyyserin lämmöntuotannon hyötysuhteeksi on oletettu 30 %. Uusiutuvan energian kapasiteetti valittu niin, että elektrolyyserin sivutuotelämmön vuosituotanto vastaa kaukolämmön vuosikulutusta. Tuuli- ja aurinkovoimakapasiteettien suhdelukuna on käytetty lukua 1.0. Kesällä elektrolyyserin lämmöntuotanto ylittää kulutuksen, ja vastaavasti talvella kulutusta on enemmän kuin tuotantoa. Tuulivoimatuotanto on suurempaa talviaikaan, mutta kuukausittaista vaihtelua esiintyy paljon. Aurinkovoimatuotanto keskittyy voimakkaasti kesäkauteen.



Kuva 5.3 . Tuuli- ja aurinkovoimaan perustuvan lämmöntuotannon ja kaukolämmönkulutuksen ajallinen kohtaaminen. Koko Etelä-Savo, 2022. Tuuli- ja aurinkovoiman kapasiteetti 747 MWp.

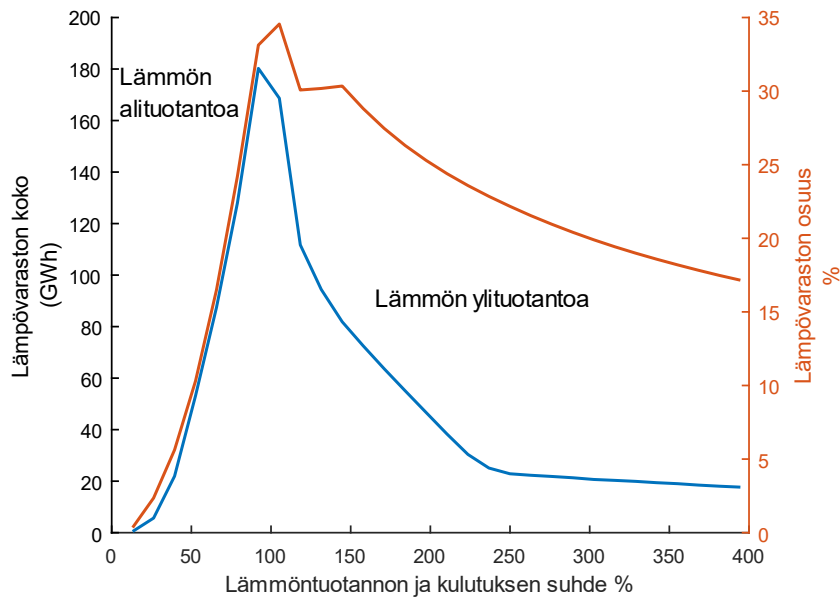
Lämmön varastointitarvetta voidaan käyttää havainnollistamaan uusiutuvan energian tuotannon ja lämmönkulutuksen ajallista kohtaamista. Lisäksi suuntaa antava varastojen kokoluokka voidaan arvioida. Kuva 5.4 esittää Etelä-Savon alueen lämpövarastojen käyttöä tuntitasolla vuosina 2018–2022. Kuten edellä, aurinko- ja tuulivoimaa on asennettu yhtäläiset kapasiteetit, ja uusiutuvaan energiaan pohjautuvan lämmöntuotannon määrä vastaa vuositason kaukolämpöverkkojen lämmönkulutusta. Vaikka vuosittaista vaihtelua esiintyy jonkin verran, lämpövaraston käyttö on hyvin samankaltaista eri vuosina. Lämpövaraston minimivaraus saavutetaan keväällä maaliskuussa, ja kesäaikaan lämpövarastoa ladataan, kunnes varaston korkein varaustila saavutetaan syyskuun lopussa.



Kuva 5.4. Lämmön varastointitarve ja lämpövarastojen profiili vuosina 2018-2022, kun koko Etelä-Savon alueen kaukolämmöntarve tuotettaisiin tuuli- ja aurinkovoimalla. Tuuli- ja aurinkovoiman suhdeluku 1.0. Varastointitarve tilanteessa, jossa lämmöntuotanto ja kulutus täsmäävät vuositasona.

Lisäksi kuvaajasta erottuu vuosi 2020. ERA5 -aineiston perusteella sekä tuulivoiman että aurinkovoiman huipunkäyttöajat olivat keskiarvoa korkeammat, ja lisäksi kaukolämmöntarve oli hieman keskiarvoa pienempi. Näiden yhteisvaikutuksesta laskennallisesti tarvittu varastokoko oli vuonna 2020 huomattavasti pienempi. Tarvittava varastokoko ja varaston alkuvaraustila on iteroitu niin, että varaston alkutila ja lopputila täsmäävät vuoden aikana. Lämpöhäviöitä lämpövarastosta ei ole huomioitu, eikä myöskään lämpötilatasojen vaikutusta lämmön käytettävyyteen.

Mikäli aurinko- ja tuulivoimatuotannon suhdelukua muutetaan, voi tulos muuttua esitetystä. Mikäli lämmöntuotannon määrä kasvaisi (suurempi aurinko- ja tuulivoimakapasiteetti), lähtisi vaadittu varastokoko laskuun, sillä lämpöä on tarjolla enemmän kuin vuotuinen lämmönkulutus, ja siten varastointitarve pienenee. Vastaavasti pienempi lämmöntuotanto vaatii vähemmän varastokapasiteettia, sillä lämpöä voidaan käyttää useammin suoraan kaukolämpöverkossa ilman varaston käyttöä. Kuva 5.5 havainnollistaa tarvittavaa lämpövarastokokoa uusiutuvaan energiaan pohjautuvan lämmöntuotannon mittakaavan muuttuessa suhteessa lämmöntarpeeseen. Myös lämpövarastosta käytetyn lämmön osuus koko lämmönkäytöstä on esitetty.



Kuva 5.5. Tarvittavan varastokapasiteetin käyttäytyminen riippuen uusiutuvaan energiaan pohjautuvan lämmöntuotannon ja lämmönkulutuksen suhteesta. Lämpövaraston koko, sekä lämpövarastosta otetun lämmön osuus koko lämmönkäytöstä. Vuoden 2022 data, koko Etelä-Savo.

Käytännössä, mikäli uusiutuvalla energialla ei tuoteta koko kaukolämpöverkon lämmöntuotantoa, on puuttuva lämpö tuotettava muilla keinoin, esimerkiksi polttamiseen perustuvilla lämpölaitoksilla. Lämpövaraston, lämpölaitosten, ja suoran uusiutuvasta energiasta saatavan lämmön keskinäinen ajojärjestys ja kapasiteetti on tällöin teknillistaloudellinen optimointiongelma. Vastaavasti todellisuudessa ylimääräistä kaukolämpöä ei kannata tuottaa – lämmön ylituotannon skenaario toteutuisi vain tapauksissa, joissa lämpöä syntyy prosessien sivutuotteena, kuten vedyn elektrolyysilaitoksissa.

Edellä tehdyt tarkastelut edustavat vain Etelä-Savon alueen kaukolämmöntarvetta määrättyllä tuuli- ja aurinkovoimatuotannon suhdeluvulla. Aurinko- ja tuulivoimatuotannon välisen suhdeluvun muuttaminen muuttaa varastokokoa – vaikkakin käyrän muodon voidaan olettaa kuitenkin pysyvän jotakuinkin samanlaisena. Esimerkiksi suurempi aurinkovoimakapasiteetti suhteessa tuulivoimakapasiteettiin keskittäisi lämmöntuotantoa kesäajalle, ja nostaisi kausivarsaintitarvetta. Vastaavasti suurempi tuulivoimakapasiteetti voisi lisätä talviaikaan tapahtuvaa lämmöntuotantoa. Kuitenkin elektrolyysilaitosten taloudellisen kannattavuuden näkökulmasta sähköä on oltava saatavilla mahdollisimman tasaisesti, jotta laitokselle saadaan tarpeeksi korkea huipunkäyttöaika. Lisäksi tarkemmassa teknisessä tarkastelussa on huomioitava lämpötilatasojen vaikutus lämmön käytettävyyteen.

## 6 Työllisyys- ja aluevaikutukset

Uusiutuvien energiamuotojen, kuten tuulivoiman ja aurinkovoiman, kehittämistä ja investointeja perustellaan usein viittaamalla sektorien työllistämisaikutuksiin (Phimister & Roberts 2012; Jones & Munday 2020). Uusiutuvasta energiasta onkin muodostunut laajamittainen teollisuudenala: vuonna 2021 uusiutuvan energian sektori työllisti suorasti tai epäsuorasti 12.7 miljoonaa ihmistä, valtaosa näistä Kiinassa, Brasiliassa, EU:ssa, Yhdysvalloissa ja Intiassa (Hanna et al. 2024). Työllistämisaikutukset kattavat esimerkiksi uusiutuvien energialaitosten rakentamiseen, käyttämiseen ja huoltoon liittyviä työpanoksia. Käytännössä vaikutusten suuruus vaihtelee merkittävästi erityisesti alueittain. Taloudelliset vaikutukset uusiutuvasta energiasta eivät aina jää tuotantolaitosten alueille vaan pitkäkestoinen vaikutus riippuu esimerkiksi yritysten omistusrakenteesta, palveluiden ulkoistuksesta, päätöksentekorakenteista sekä energiamuotojen tuotantoketjujen keskinäisestä läheisyydestä (Jones & Munday 2020). Silti uusimmat kansainväliset systemaattiset arviot viittaavat siihen, että uusiutuvan energian hankkeet johtavat usein positiivisiin työllistymisaikutuksiin, joskin jo mainituin alueellisin vaihteluin sekä keskittyen olemassa olevissa tutkimuksissa lähinnä uusien syntyvien työpaikkojen lukumäärään, harvemmin työn laadullisiin piirteisiin (Hanna et al. 2024).

Tässä raportin osassa tutkimme erityisesti vetyhankkeiden mahdollistajina toimivien tuuli- ja aurinkovoimahankkeiden positiivisia alueellisia vaikutuksia. Avaamme tuulivoiman ja aurinkovoiman työllistämisaikutuksia perustuen valitun kansainvälisen ja kotimaisen kirjallisuuden katsaukseen. Lisäksi käymme läpi ja kommentoimme Suomessa ja kansainvälisesti käytettyjä yleisiä arvioita tuulivoiman ja aurinkovoiman työllistymisaikutuksille. Tutkimuskirjallisuudessa erotellaan toisistaan *suora työllistämisaikutus* (uusiutuvan energian investointien seurauksena) sekä *epäsuora työllistämisaikutus* (esimerkiksi uusiutuvan energian ympärille syntyvät toimitusketjut, jotka eivät suoraan riipu alkuperäisistä investoinneista). Käytännössä uusiutuvan energian hankkeiden työllisyysvaikutuksia voidaan tutkia lukuisilla erilaisilla tavoilla ja menetelmillä (Hanna et al. 2024). Menetelminä tutkimusalueella hyödynnetään esimerkiksi systemaattisia arviointeja ja jo koettujen työllistämisaikutusten tilastollista analyysia. Usein kyse on kuitenkin edelleen tulevaisuuden työllistämisaikutuksista, joita ei voida tutkia historiallisella tiedolla. Erilaiset simulaatiomallinnukseen pohjautuvat lähestymistavat kuten elinkaari-analyysit ovatkin tutkimusalueella yleisiä. Taulukossa 6.1. on nähtävissä tuulivoimahankkeiden aluetaloudellisten avainlukujen esittelyä pohjautuen Savikon & Hokkasen 2023 Suomessa yleisesti viitattuun raporttiin Ilmatar Energy:lle.

Taulukko 6.1. Tuulivoimahankkeiden koko 46 vuoden elinkaaren aluetaloudellisten vaikutusten avainlukujen esittely (koostettu lähteestä Savikko & Hokkanen 2023). HTV = henkilötyövuosi.

Elinkaarivaihe	Kesto vuotta [%-osuus]	BKT M€ [%-osuus]	Verot M€ [%-osuus]	Työllisyysvaikutus HTV [%-osuus]
Esiselvitys	1 [2 %]	0,01 [0 %]	0.004 [0 %]	1 [0 %]
Kaavoitus ja luvitus	7 [15 %]	3 [0 %]	1.1 [0 %]	38 [2 %]
Rakentaminen	2 [4 %]	82 [13 %]	34 [13 %]	976 [52 %]
Tuotanto	35 [76 %]	567 [87 %]	228 [86 %]	828 [44 %]
Käytöstä poisto	1 [2 %]	2 [0 %]	1.2 [1 %]	37 [2 %]
<b>Kaikki</b>	<b>46 [100 %]</b>	<b>654 [100 %]</b>	<b>264 [100 %]</b>	<b>1 878 [100 %]</b>

Olemme käyttäneet Savikko & Hokkasen raporttia laskentapohjana ja skaalanneet luvut turbiinien määrän mukaisella kertoimella seuraavasti Taulukossa 6.2. Verraten Etelä-Savon maakuntaliiton tilaamassa Rambollin (2023) toteuttamassa raportissa arvioitiin, että 155 tuulivoimalan rakentaminen Etelä-Savoon johtaisi 5 625 henkilötyövuoden kokonaistyövoimatarpeelle Etelä-Savon kuntiin, 15 900 henkilötyövuotta koko Suomessa. Tämä arvioitu lukema sijoittuu LUTin skenaarion arvioiden tasolle.

Taulukko 6.2. – Tuulivoimaloiden koko 46 vuoden elinkaaren aikaiset talous- ja työllisyysvaikutukset skenaarioittain

Skenaario	Turbiinimäärä Lukumäärä [Kerroy Savikko & Hokkanen 2023 raporttiin nähden]	Bruttokansantuote Mrd€	Verot Mrd€	Työllisyysvaikutus Henkilötyövuotta HTV
Savikko & Hokkanen 2023*	20 [1x]	0.65	0.26	1 878
Ramboll 2023*	155	0.4**	2.41	15 900
LUT #1	~50 [2.5x]	1.63	0.65	4 700
LUT #2	~400 [20x]	13	5.2	37 500
LUT #3	~1 700 [85x]	55	22	160 000

\*: Vaikutukset Suomessa

\*\* : Kerrannaisvaikutukset Etelä-Savossa

## 6.1 Tuulivoiman työllisyysvaikutuksen jakautuminen

Savikon ja Hokkasen (2023) toteuttaman elinkaarimallin mukaan tuulivoiman työllisyysvaikutukset painottuvat vahvasti rakentamisen ja tuotannon vaiheisiin. Rakennusvaiheen on arvioitu edustavan 52 % yksittäisen hankkeen koko elinkaaren aikaisista työllisyysvaikutuksista.

Tuotantovaiheen vastaava osuus on 44 % arvioituista työllisyysvaikutuksista. Tuulivoimalahankkeet työllistävät mallin mukaan siis vain rajatusti esiselvitys, kaavoitus- ja luvitusvaiheissa, mutta hyvin voimakkaasti rakennusvaiheessa. Tuotantovaiheessa työllisyysvaikutukset kohdentuvat pienemmälle joukolle ihmisiä, mutta edustavat 35 vuoden ajalle pysyvää työllisyyden lähdettä, kunnes voimala puretaan elinkaarensa päätteeksi. Taulukko 6.3 havainnollistaa tuulivoiman työllisyysvaikutusten jakautumista toimialoittain, jossa erityisesti Teollisuus (28.4 %); Ammatillinen, tieteellinen ja tekninen toiminta (13.1 %); Kauppa (10.6 %); Rakentaminen (10.0 %); ja Hallinto- ja tukipalvelutoiminta (9.6 %) ovat keskeisiä työllistymisen aloja.

Taulukko 6.3. – Tuulivoiman työllisyysvaikutuksen jakautuminen toimialoittain (Savikko & Hokkanen 2023, suhteelliset prosentiosuudet lisätty)

Toimiala	Työllisyysvaikutus Henkilötyövuotta	Suhteellinen osuus %-osuus
Teollisuus	533	28.4 %
Ammatillinen, tieteellinen ja tekninen toiminta	247	13.1 %
Kauppa	199	10.6 %
Rakentaminen	188	10.0 %
Hallinto- ja tukipalvelutoiminta	181	9.6 %
Energia- ja jätehuolto	72	3.8 %
Terveys ja sosiaalipalvelut	69	3.7 %
Logistiikka	62	3.3 %
Majoitus ja ravintolapalvelut	60	3.2 %
Muut palvelut	60	3.2 %
Alkutuotanto	49	2.6 %
Rahoitus- ja vakuutustoiminta	48	2.6 %
Informaatio ja viestintä	45	2.4 %
Julkinen hallinto	30	1.6 %
Kiinteistöalan toiminta	19	1.0 %
Koulutus	10	0.5 %
Suora työllisyys	6	0.3 %
<b>Yhteensä</b>	<b>1 878</b>	<b>100 %</b>

## 6.2 Tuulivoiman kuntakohtaiset talousvaikutukset

Raportin mukaan tuulivoimalat tuottavat kunnille huomattavia yhteisö- ja kiinteistöverojen tulonlähteitä (Taulukko 6.4). Kiinteistöveroissa on huomioitu ikävähennykset. Savikko & Hokkanen 2023 raportin mallissa verotulojen kohdentumisia ei arvioida laajalti johtuen niiden aluekohtaisista eroista ja luvut ovat tässä yhteydessä suuntaa antavia mittaluokkien ja suhteellisten osuuksien kokojen suhteen.

Taulukko 6.4 Verotulojen jakautuminen tuulivoimaloiden 46 vuoden elinkaaren ajalta (Savikko & Hokkanen 2023)

Veroluokka	Verotulojen määrä	Suhteellinen osuus veroista
	M€	%-osuus
Arvonlisäverot	149	56
Yhteisöverot	55	21
Kiinteistöverot	19	7
Tuote- ja tuotantoverot	19	7
Tuloverot	15	6
Kunnallisverot	6	2
<b>Yhteensä</b>	<b>264</b>	<b>100</b>

Ikävähennyksistä huolimatta kiinteistöverojen mittaluokka on huomattava, edustaen esimerkiksi raportissa käsitellyn Kuortaneen esimerkkitapauksessa 59 % osuutta kaikista kunnan kiinteistöveroista (Taulukko 6.5).

Taulukko 6.5. Kuntakohtaisia esimerkkejä tuulivoimahankkeiden yhteisö- ja kiinteistöverojen osuuksista kunnallisessa taloudessa (Savikko & Hokkanen 2023)

Esimerkki-kunta	Suhteellinen osuus kunnan yhteisöveroista	Suhteellinen osuus kunnan kiinteistöveroista
	%-osuus	%-osuus
Seinäjoki	3	2
Alajärvi	23	24
Kuortane	71	59

### 6.3 Aurinkovoiman työllisyysvaikutukset

Aurinkovoiman työllisyysvaikutusten arvioinnissa nojaamme kansainvälisiin lähteisiin, etenkin kattaviin lukuihin hallitustenväliseltä energiajärjestöltä IRENAlta. Kotimaisten lähteiden saata- vuutta rajoitti muun muassa se, että aurinkovoimahankkeita harvoin käsitellään YVA-menette- lyssä. IRENA:n raporteissa hyödynnetään aurinkovoiman asennettuun tuotantokapasiteettiin sidottua arviointimallia (IRENA 2022), jonka avulla voidaan arvioida työllisyysvaikutuksia suun- taa antavasti. Tyypillisiä vaihtoehtoisia arviointimalleja ovat investointimääriin sidotut sekä säh- kön tuotantomääriin sidotut mallit (Hanna et al. 2024). IRENA:n mallissa 50 MWp asennuska- pacity vastaa 229 055 henkilötyöpäivää (IRENA 2022), jonka vaikutukset jakautuvat Tau- lukon 6.6. mukaisesti eri elinkaarivaiheisiin.

Taulukko 6.6. – Aurinkovoiman työllisyysvaikutuksen jakautuminen elinkaarivaiheittain (IRENA 2022)

Projektin suunnittelu	Hankinta ja valmistus	Kuljetus	Asennus ja verkkoon kytkeminen	Tuotanto ja huolto	Käytöstä poisto
1 %	22 %	2 %	17 %	56 %	2 %

IRENA:n malli työllisyysvaikutuksista tarkastelee koko kansainvälistä arvoketjua eikä vain esimerkiksi Suomen ympäristöä. Tuloksia voidaankin käyttää tässä vain tarjoamaan osittaisia tulokintoja, joihin tulee suhtautua viitteenomaisina. Olemassa olevien kansainvälisten tulosten perusteella kuten tuulivoimahankkeissa, aurinkovoimaloiden työllisyysvaikutukset ovat suurimmat rakentamisen, asentamisen, tuotannon ja tuotannon ylläpidon elinkaarivaiheissa. Samalla tavalla kuin tuulivoimassa työllisyysvaikutukset jakautuvat vuosikymmenien ajalle sellaisiin tehtäviin, jotka voivat työllistää erityisesti paikallista väestöä.

Aurinkovoimaan liittyvät työtehtävät vaativat vaihtelevia koulutus- ja ammattitaustoja. IRENA:n mallissa kaksi kolmasosaa (64 %) arvoketjun työllisyysvaikutuksista ei vaadi aiempaa korkeakoulutusta. Vaikka osa tehtävistä vaatii korkeaa teknistä osaamistasoa, valtaosa työllistämisaikutuksesta kohdentuu toimintoihin, joihin ei ole korkeaa koulutus- tai osaamisvaatimusta. Arvoketju työllistää toiseksi eniten teknillisiä asiantuntijoita (31 %) ja joitakin ei-teknillisiä asiantuntijoita sekä hallintoa (4 % ja 1 % vastaavasti). (IRENA 2022)

Huomionarvoista on myös kirjallisuudessa ilmennetty seikka, että nimenomaan aurinkovoiman parissa työllistyy huomattavasti enemmän naisia kuin muilla energiateollisuuden aloilla. Naiset edustavat kansainvälisesti 40 % aurinkovoimaan liittyvästä työvoimasta. Öljy- ja kaasuteollisuudessa vastaava luku on 22 % ja tuulivoimassa 21 % (IRENA & ILO 2023). Aurinkovoimalat työllistävät siis kansainvälisesti liki kaksinkertaisen osuuden naisia muihin energiateollisuuden aloihin nähden.

#### 6.4 Vaikutusarviointien haasteet

Keskeisin yleinen havainto prosessista on ollut vähäinen julkisen numeerisen tiedon saatavuus hankkeiden talous- ja työllisyysvaikutuksista. Silloin kun kyseisiä vaikutuksia on arvioitu, ovat näiden arvioiden tietolähteet olleet suhteellisen yksipuolisia. Suomessa tuulivoiman aluetaloudellisista vaikutuksista raportoitaessa ei oteta kantaa esimerkiksi IRENA 2022 aurinkovoimaraportin tavoin työllisyysvaikutusten jakautumiseen sukupuolittain, koulutusasteittain taikka

tehtävien vaatimustasoittain. Tieto esimerkiksi siitä, kuinka suuri osa työllistymisvaikutuksesta ei vaadi korkeakoulututkintoa on oleellinen tieto aiheen päätöksenteossa.

Tutkimuskirjallisuudessa on havaittu yleinen puute mittausaineistosta liittyen työllisyysvaikutusten töiden laatuun, taitoihin ja vaikutusten maantieteelliseen jakautumiseen (Hanna et al. 2024). Työllistymisvaikutusten luonnetta ei myöskään käsitellä kattavasti suhteessa töiden luonteeseen. Uusiutuvan energian teknologian on arvioitu olevan erityisen soveltuva laadukkaiden, pitkäaikaisten työsuhteiden aikaansaamiseksi (Hanna et al. 2024). Kuitenkin useissa Hanna et al. 2024 tutkimuksen tarkastelemissa hankkeissa suorat työllisyysvaikutukset valmistuksen, rakennuksen ja asentamisen aloilla ovat olleet pääosin määräaikaisia tai lyhytkestoisia luonteeltaan perustuen esim. rakennusvaiheen projektiluonteeseen. Erityistä huomiota tulee kiinnittää työn laatuun, kuten elinkelpoiseen palkkaan, työpaikkojen pysyvyyteen, työntekijöiden suojeluun, paikkakunnille siirtymisten tukemiseen, terveysriskien paikantamiseen sekä esimerkiksi erilaisten tasa-arvoa rajoittavien toimintatapojen purkamiseen kuten rajoittaviin sukupuolirooleihin ja puutteellisiin rekrytointikäytänteisiin (IRENA Coalition for Action 2023; IRENA 2022).

Taloudellisten vaikutusten arviointi on osin työllisyysvaikutuksia haastavampaa johtuen hankkeiden lähelle 50 vuoden elinkaarista. Arviointimallit eivät esimerkiksi ota kantaa energiamarkkinoiden mahdollisiin muutoksiin vaan sitovat hintakehityksen yleisiin indeksikehityksiin. Ennakointitoimintaa vaikeuttaa myös itse hankkeiden pyrkimys osallistua laajempaan energiamarkkinoiden siirtymään ja/tai murrokseen. Maailmanpoliittinen yleinen tilanne, teknologinen kehitys ja muut osatekijät oleellisella tavalla vaikuttavat siihen, mitä tietty energiantuotantomäärä kaupallisesti vastaa. Hankkeiden työllisyysvaikutukset eivät myöskään tapahdu automaattisesti. Mahdollisuudet työllistyä voivat olla ajallisesti, alueellisesti, toimialakohtaisesti tai koulutuksellisesti rajattuja (IRENA Coalition for Action 2023). Näitä onkin tärkeää huomioida ja tarjota esimerkiksi työhön valmistavaa koulutusta madaltaakseen esimerkiksi kynnystä vaihtaa toimialaa muulta teollisuuden alalta.

## 7 Johtopäätökset

Vety- ja PtX-talouteen liittyvien puhtaan siirtymän hankkeiden vauhdittamisen kannalta keskeistä on vakaa toimintaympäristö, selkeät poliittiset tavoitteet ja ennakoitavissa oleva lainsäädännön pitkän aikavälin kehityssuunta. Uusiutuvan energian hankkeita tukevan infrastruktuurien kehityksen on myös oltava koko Suomen kattavaa ja ennakoitavaa. Kannattava vedyn tuotanto edellyttää riittävää huipunkäyttöaikaa, jonka mahdollistaa tuuli- ja aurinkovoiman tuotanto yhdistettynä sopiviin energiavarastoihin ja säädettävään sähköntuotantoon. Etelä-Savon osalta yhteistyö naapurimaakuntiin, niin kaavoituksessa kuin energiainvestointien houkutte- lussa on keskeisessä roolissa, sillä monet potentiaalisista alueista sijaitsevat maakunnan reuna-alueilla.

Etelä-Savon alueella on mahdollisuus merkittävään uusiutuvan energian tuotantoon. Alueen tuulivoiman tuotantopotentiaaliksi on arvioitu LUT skenaarioissa 1-37 TWh, riippuen asete- tuista rajoituksista. Vastaavasti aurinkoenergian tuotantopotentiaali turvesoilla on yli 3 TWh ja käytöstä poistetuilla maatalousalueilla n. 2.5 TWh. Mikäli myös käytössä olevia maatalousalu- eita voi kestävästi valjastaa aurinkoenergian tuotantoon nousee aurinkoenergian tuotantopo- tentiaali merkittävästi, esimerkiksi maatalouden ja aurinkosähkötuotannon yhteiskäyttöasen- nuksilla voitaisiin saavuttaa jopa 12 TWh tuotantopotentiaali. Alueella ei ole valtakunnallisesti katsoen kovin merkittäviä teollisia hiilidioksidin pistelähteitä. Suurimmat pistelähteet ovat Mik- kelin ja Savonlinnan kaukolämpö-CHP-laitokset, sekä Ristiinan teollisuus-CHP-laitos. Näiden hiilidioksidivirtojen hyödyntäminen PtX tuotannossa vaatisi noin 3.5 TWh sähköä vedyn tuo- tantoon, joka olisi mahdollista tuottaa alueella uusiutuvista energialähteistä ainakin vuosita- salla. Alueella on vahva sähköverkko pohjoiseteläsuunnassa ja osin myös länteen, mutta koko alueen potentiaalin hyödyntämiseksi sähköverkkojen vahvistus itään Savonlinnan suuntaan ja sieltä edelleen Pohjois- ja Etelä-Karjalaan toisi kaakkoisen alueen tuuli- ja aurinkovoimapoten- tiaalin paremmin hyödynnettäviksi. Alueen kannalta suurten järvi-altaiden aiheuttama rikko- naisuus tuo omat haasteensa sekä sähköverkkojen kannalta että myös tie ja raideliikenteen osalta erityisesti itä-länsisuunnassa. Potentiaalisimmat alueet sijaitsevatkin suurelta osin 5- tien sekä Mikkeli-Pieksämäki radan tuntumassa, jossa myös verkkoyhteydet ovat hyvät ja sal- livat lisäkapasiteetin kytkemisen.

Etelä-Savon alue voidaan jakaa kolmeen keskeiseen talousalueeseen, joilla jokaisella on hie- man erilainen luonne ja vetytalouden tuotantopotentiaali:

1. Mikkelin alue: Maakuntakeskus ja alueen suurin kaukolämmön tarve. Alueella sijaitsevat Pursialan ja Ristiinan voimalaitokset, jotka tuottavat sähköä ja lämpöä sekä kaukolämpöverkkoon, että UPM:n Pelloksen vaneritehtaalle. Alueen etelä- ja pohjoisosissa on merkittävää tuulivoimapotentiaalia sekä alue on vahvan sähkö- ja tieverkon piirissä.
2. Pieksämäen seutu: Alueelle on jo tulossa merkittävästi tuulivoimatuotantoa ja lisärakentamisellekin on mahdollisia alueita. Alue on merkittävä sähkö- ja rataverkkojen solmupiste, jotka mahdollistaa tuotannon siirtämisen niin länteen, kuin pohjoiseen ja etelään. Suurimmat hiilidioksidilähteet sijaitsevat pääosin naapurimaakunnassa Varkauden alueella, jossa on meneillään myös aurinkovoimahankkeita. Alueen eteläosissa (Mikkelin pohjoisosissa) on myös suuria turvetuotantoalueita, joilla merkittävää potentiaalia aurinkovoimantuotantoon.
3. Savonlinnan alue: Etelä-Savon kaakkoisosissa Savonlinnan ja Puumalan välisellä alueella on potentiaalisia alueita tuulivoimarakentamiseen. Savonlinnassa on merkittävää kaukolämmön kulutusta ja myös pääosin biomassaan perustuvaa sähkön- ja lämmön tuotantoa. Alue on vesistöjen rikkomaa ja alueella sijaitsee paljon loma-autusta, mikä tuo omat haasteensa infran- ja uusiutuvan energian investointihankkeille. Luonnollinen asiointisuunta on Etelä- ja Pohjois-Karjalaan ja myös sähköverkkojen vahvistus naapurimaakuntiin toisi alueen paremmin vetytalouden piiriin.

Paikalliset kaasunsiirtoverkot ( $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ) sekä kaasumaisten tuotteiden jatkojalostus esim. metanoliksi tai ammoniakiksi vähentäisi isojen siirtoverkkojen laajennustarpeita. Jatkojalosteiden viemisessä markkinoille keskeisessä roolissa on toimivat yhteydet kuluttajille ja vientisatamiin (tie- ja raideyhteydet).

Keskeinen haaste sekä tuulivoimatuotannon lisäämiselle että verkon laajentamiselle on alueen itäosien tuulivoimahankkeiden luvitusongelmat puolustusvoimien kielteisen kannan vuoksi. Luvituksen esteiden purkaminen vaatii poikkimaakunnallista yhteistyötä koko itäisen Suomen osalta.

Talous- ja työllisyysvaikutusten osalta puhutaan merkittävästä lisäyksestä alueen elinvoimaan. Sekä tuuli-, että aurinkovoimalat edustavat jo pelkkinä energiantuotantolaitoksina useiden vuosikymmenien ajan varmaa työllisyyden, liikevaihdon ja verotulojen lähteitä, joiden positiiviset vaikutukset näkyvät kansallisellakin tasolla. Tässä hankkeessa ei otettu talous- ja työllisyysarviointien suhteen huomioon energiahankkeiden jatkokäytön kohteita esim. vetytalouden teollisuusperustan mahdollistajina taikka tämän todennäköisesti huomattavasti laajempia vastaavia

vaikutuksia. Kunnallisella tasolla uusiutuvan energian voimalat voivat edustaa jopa valtaosaa koko kunnan verotuloista kiinteistöverojen osalta, etenkin pienempien kuntien osalta. Samaan aikaan aiheen raportoinnissa kiinnitetään rajoitetusti huomiota esimerkiksi työllisyysvaikutusten sukupuolittuneeseen luonteeseen tai ylipäättään siihen, minkä laatuja työpaikkoja hankkeet tuottavat. Hankkeita toteutettaessa tulee kiinnittää huomiota erilaisten rakenteellisten esteiden purkamiseen, jotta työllisyysvaikutukset kohdentuisivat kestäväällä ja oikeudenmukaisella tavalla. Aluetalouden näkökulmasta keskeisiä toimijoita ovat alueelliset osaamiskeskittymät ja klusterit sekä niiden tuottamat palvelut ja tuotteet, jotka edesauttavat talousvaikutusten toteutumista.

Energiamurroksen koordinointi Etelä-Savossa edellyttää monialaista yhteistyötä ja huolellista suunnittelua. Suositustoimenpiteenä koordinointi tulisi aloittaa eri toimijoiden (tuottajat, kuluttajat ja muut sidosryhmät) intressien kartoituksella, jonka perusteella siirryttäisiin mittasuhteiden, aikataulujen, maantieteellisen sijoittumisen sekä eri toimijoiden täsmällisten toiveiden yhteensovittamiseen. Lopulta alueen ulkopuoliset sidosryhmät tulisi liittää osaksi Etelä-Savon toimijaklusteria.

## Lähteet

- Andrei D. et al. (2017) "Heat Roadmap Europe: Large-Scale Electric Heat Pumps in District Heating Systems." *Energies* (Basel) 10.4 (2017): 578-. Web. doi:10.3390/en10040578
- Aluehallintovirasto. Ympäristöluvut. Päätös 106/2020. 18.12.2020. <https://ylupa.avi.fi/api/v1/documents/attachment/8921141>
- Böhm, H. et al. (2021) "Power-to-Hydrogen & District Heating: Technology-Based and Infrastructure-Oriented Analysis of (Future) Sector Coupling Potentials." *International journal of hydrogen energy* 46.63 (2021): 31938–31951. Web.
- EEA (2021). Industrial Reporting under the Industrial Emissions Directive 2010/75/EU and European Pollutant Release and Transfer Register Regulation (EC) No 166/2006 Citation identifier DAT-238-en. European Environmental Agency. [verkkoaineisto] [viitattu 18.6.2024] Saatavissa: [https://www.eea.europa.eu/ds\\_resolveuid/4bb3c27bcc0b44459d7c53444205d87e](https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/4bb3c27bcc0b44459d7c53444205d87e)
- Energiateollisuus (2023). Kaukolämpötilasto 2022. [verkkoaineisto] [viitattu 28.6.2024] Saatavissa: <https://energia.fi/tilastot/kaukolampotilasto/>
- Energiequelle (2024) Suomen ensimmäinen aurinkovoiman ja maanviljelyn yhdistämisen pilotitutkimushanke käynnistyy. [verkkajulkaisu] [viitattu 28.6.2024]. Saatavissa: [https://www.energiequelle.de/wp-content/uploads/2024/01/PM\\_Agrivoltaics\\_FI.pdf](https://www.energiequelle.de/wp-content/uploads/2024/01/PM_Agrivoltaics_FI.pdf)
- ETIPWind (2021). Getting fit for 55 and set for 2050. Electrifying Europe with wind energy. [verkkajulkaisu] [viitattu 28.6.2024]. Saatavissa: <https://etipwind.eu/files/reports/Flagship/fit-for-55/ETIPWind-Flagship-report-Fit-for-55-set-for-2050.pdf>
- FCG (Finnish Consulting Group Oy) (2023). Etelä-Savon aurinkoenergiaselvitys. [verkkajulkaisu] [viitattu 28.6.2024]
- Fingrid (2024a). Sähkön tuotannon ja kulutuksen kehitysnäkymät. [verkkosivusto] [viitattu 9.10.2024]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitysnakymat/>

Fingrid (2024b). Verkkokiikari [verkkosivusto] [viitattu 1.9.2024]. Saatavissa: <https://karttapa-laute.fingrid.fi/?link=Wkgh>

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2022). Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition: a guideline for Germany. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. April, 1–76. [verkkojulkaisu] [viitattu 28.6.2024] Saatavissa: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/APV-Guideline.pdf>

Gasum (2024). Kuopion biokaasulaitos. [verkkojulkaisu] [viitattu 28.6.2024] Saatavilla: <https://www.gasum.com/fi/gasum/toimitusketju/biokaasulaitokset/kuopion-biokaasulaitos/>

Global Wind Atlas (2022). [verkkosivusto] [viitattu 28.3.2022]. Saatavissa: <https://globalwindatlas.info/>

Hersbach H. (2020) "The ERA5 global reanalysis". Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020;146(730):1999-2049. doi:10.1002/qj.3803 (WAS 20)

IRENA (2022). Solar PV – A Gender Perspective. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi ISBN: 978-92-9260-466-0. [verkkojulkaisu] [viitattu 28.6.2024] Saatavilla: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Sep/IRENA\\_Solar\\_PV\\_Gender\\_perspective\\_2022.pdf?rev=61477241eb9e4db2932757698c554dc2](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Sep/IRENA_Solar_PV_Gender_perspective_2022.pdf?rev=61477241eb9e4db2932757698c554dc2)

IRENA & ILO (2023). Renewable energy and jobs: Annual review 2023, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi and International Labour Organization, Geneva. [verkkojulkaisu] [viitattu 28.6.2024] Saatavilla: [https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Sep/IRENA\\_Renewable\\_energy\\_and\\_jobs\\_2023.pdf?rev=4f65518fb5f64c9fb78f6f60fe821bf2](https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Sep/IRENA_Renewable_energy_and_jobs_2023.pdf?rev=4f65518fb5f64c9fb78f6f60fe821bf2)

IRENA Coalition for Action (2023). Finding common ground for a just energy transition: Labour and employer perspectives, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. [verkkojulkaisu] [viitattu 28.6.2024] Saatavilla: <https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/>

[/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Aug/IRENA\\_Coalition\\_Just\\_transition\\_2023.pdf?rev=6f158d594088422e8e394d0bfc47f8d5](#)

Jones, C., & Munday, M. (2020). Capital ownership, innovation and regional development policy in the economic periphery: An energy industry case. *Local Economy*, 35(6), 545-565. <https://doi.org/10.1177/0269094220968048>

Karjunen, H., Sikiö, P., Lassila, J., Räisänen, O., Hyypiä, J., Salmelin, M., Tynjälä, T., Kivimaa, A., Silvast, A., Kojo, M., Inkeri, E., & Laaksonen, P. (2024). *Pohjois-Savon vetylaakso selvitys*. LUT-yliopisto.

Karjunen, H., Sikiö, P., Lassila, J., Vilppo, J., Räisänen, O., Inkeri, E., Tynjälä, T., & Laaksonen, P. (2022). *South-East Finland Hydrogen Valley – Research report*. LUT Yliopisto

Koponen, J. (2020). *Energy Efficient Hydrogen Production by Water Electrolysis*. Väitöskirja. LUT University. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-491-3>

Karjunen, H. et al. (2021) *Bothnian Bay Hydrogen Valley – Research Report*. LUT University, 2021. Print. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-763-1>

Hanna, R, Heptonstall, P. & Gross, R. (2024). Job creation in a low carbon transition to renewables and energy efficiency: a review of international evidence. *Sustain Sci* 19, 125–150 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11625-023-01440-y>

Hurskainen, M. (2017). *Industrial oxygen demand in Finland (No. VTT-R-06563-17)*, VTT Research Report. VTT Technical Research Centre of Finland.

Kiviranta P., Hyypiä J., Inkeri E., Keski-Luopa M., Rahiala S. & Tynjälä T. (2023). *Vetyä, virtaa Kaakkoon – hukkalämmön hyödyntämispotentiaali*. XAMK Tutkii 28. Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu.

Maanmittauslaitos (2022). *Maastotietokanta avoin data 03/2022*.

Meriläinen, Altti et al. “Techno-Economic Evaluation of Waste Heat Recovery from an off-Grid Alkaline Water Electrolyzer Plant and Its Application in a District Heating Network in Finland.” *Energy (Oxford)* 306 (2024): 132181-. Web.

- Phimister, E., & Roberts, D. (2012). The Role of Ownership in Determining the Rural Economic Benefits of On-shore Wind Farms. *Journal of Agricultural Economics*, 63(2), 331-360. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9552.2012.00336.x>
- Pyrhönen, O. et al. (2021) Carbon Negative Åland: Strategic Roadmap. LUT University, 2021. Print. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-752-5>
- Pöyry. (2016). Esiselvitys aurinkoenergian tuotantoalueista. [verkkojulkaisu] [viitattu 28.6.2024]. Saatavissa: [https://satakunta.fi/wp-content/uploads/2021/05/101001204\\_Satakuntaliitto\\_Esiselvitys\\_aurinkoenergian\\_tuotantoalueista\\_20160428\\_LOPPURAPORTTI.pdf](https://satakunta.fi/wp-content/uploads/2021/05/101001204_Satakuntaliitto_Esiselvitys_aurinkoenergian_tuotantoalueista_20160428_LOPPURAPORTTI.pdf)
- Ramboll (2023). Etelä-Savon potentiaalisten tuulivoima-alueiden aluetalousvaikutusten arviointi. Etelä-Savon liiton tilaama raportti, laatijat Samuel Rintamäki ja Heikki Savikko. Espoo: Ramboll Finland.
- Ruhnau, O., Hirth, L. & Praktiknjo, (2019). A. Time series of heat demand and heat pump efficiency for energy system modeling. *Sci Data* 6, 189 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0199-y>
- Solarigo, (2024) Hirvensalmen aurinkopuistohanke, <https://www.solarigo.fi/hirvensalmi-s>
- Sakas, Georgios et al., (2022). Dynamic energy and mass balance model for an industrial alkaline water electrolyzer plant process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 4328-4345. 10.1016/j.ijhydene.2021.11.126
- Savikko H., & Hokkanen, J., (2023). Tuulivoiman aluetaloudellisten vaikutusten arviointi. *Ilmatar Energy*. [verkkoaineisto] [viitattu 10.6.2024] Saatavilla: <https://ilmatar.com/fi/wp-content/uploads/2023/02/Tuulivoiman-alueetalousvaikutukset-2.2.2023.pdf>
- Schmidt, O., Gambhir, A., Staffell, I., Hawkes, A., Nelson, J., & Few, S. (2017). Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(52), 30470–30492. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045>

Suomen uusiutuvat (2024). Tuulivoimatilastot 6/2024. [verkkoaineisto] [viitattu 18.10.2024]  
Saatavilla: <https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoimatilastot-6-2024/>

Trieb, Merlin Sebastian, and George Tsatsaronis. (2022) From Heat Demand to Heat Supply: How to Obtain More Accurate Feed-in Time Series for District Heating Systems. Applied energy 311 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118571>

Vestas (2022). EnVentus Platform [verkkojulkaisu] [viitattu 6.1.2022]. Saatavissa: <https://no-zebra.ipapercms.dk/Vestas/Communication/Productbrochure/enventus/enventus/enventus-brochure-2021/?page=12>

## **Liitteet**

Liite 1: Tuulivoimapotentialin analysoinnissa käytetyt parametrit.

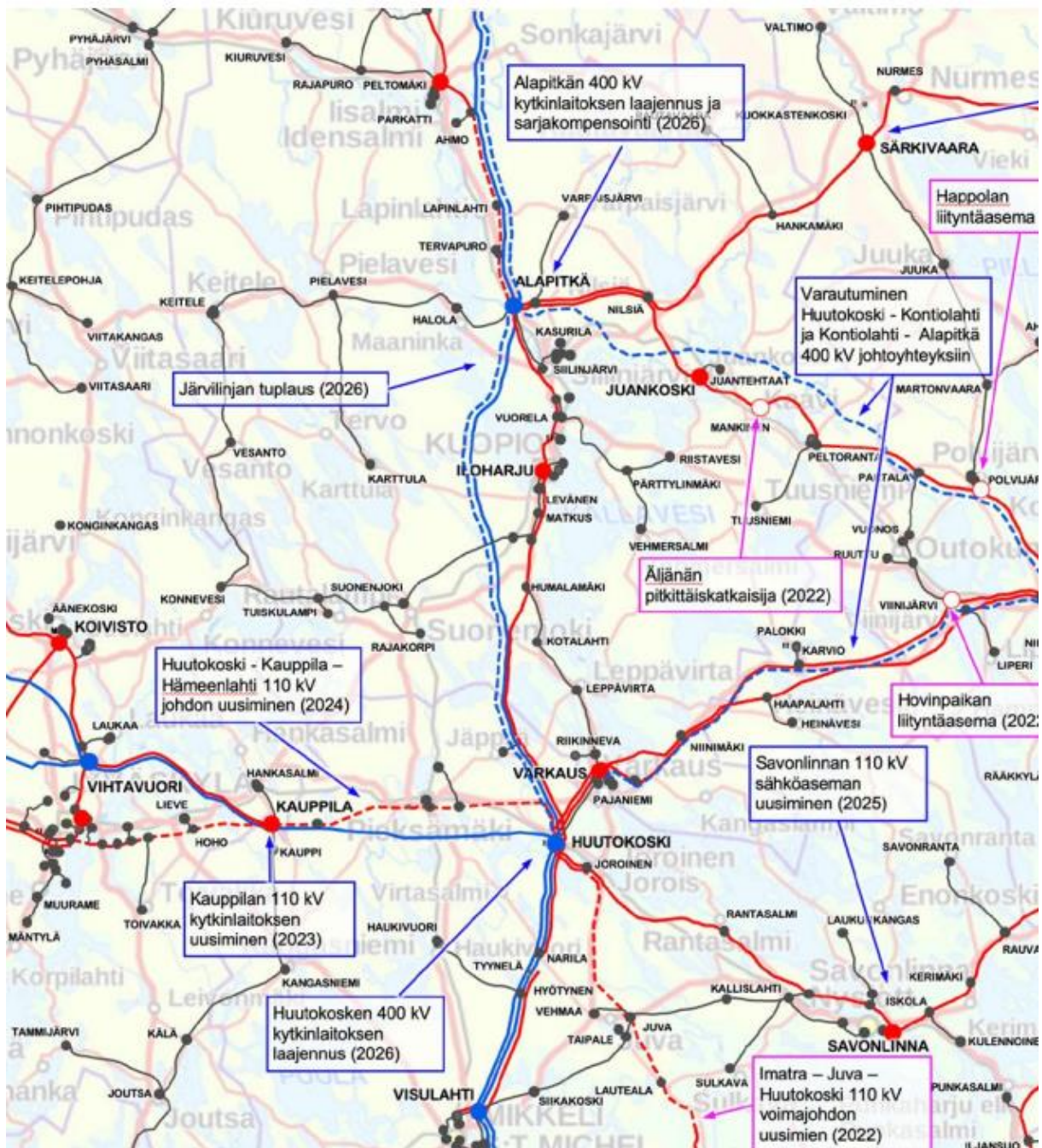
Liite 2. Kantaverkon kehittämissuunnitelma Savo-Karjalan alueella.

Liite 3. Esimerkki maatalousmaiden aurinkosähkötuotantopotentiaalista sähköaseman läheisyydessä

Liite 1: Tuulivoimapotentialin analysoinnissa käytetyt parametrit.

	LUT #1	LUT #2	LUT #3	
	Suojaetäisyys (km)			
Taajamat	3	2	1	• Syke ja Tilastokeskus määrittelemien rajojen mukaan
Luontokohteet				
• Kansallispuistot	3	1	0.5	
• Luonnonpuistot	3	1	0.5	
• Retkeilyalue	3	1	0.5	
• Luonnonsuojelualue	1	0.5	0	
Lentokentät				
• Suuret	18	10	10	• Esterajoituspinta <a href="https://www.fintraffic.fi/fi/ans/korkeusrajoitukset-paikkatietoaineistona">https://www.fintraffic.fi/fi/ans/korkeusrajoitukset-paikkatietoaineistona</a>
• Pienet	10	6	6	
• Helikopterin laskeutumisalustat	3	3	3	• Alle 5000 m <sup>2</sup> lentoalueet
Järvet	0.1	0.1	0.1	• Yli 5 ha pinta-alan järvet huomioitu
Saaret	0	0	0	• Alle 200 hehtaarin saaret
Ampuma-alueet	0.3	0.3	0.3	
Tiet ja junaradat	0.3	0.3	0.3	• Tienumero < 100 tai asfalttipäällysteinen tie jonka tienumero < 10000
Rakennukset	1.75 <sup>(1)</sup>	1.25 <sup>(2)</sup>	1 <sup>(3)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (1) Kernel density algoritmi. Vapaa-ajan asuntojen paino 0.75, asuinrakennukset 1.0. Raja-arvo alueen poissulkuun on 2.</li> <li>• (2) Vain asuinrakennukset mukana.</li> <li>• (3) Kernel density algoritmi. Vapaa-ajan asuntojen paino 0.5, asuinrakennukset 1.0. Raja-arvo alueen poissulkuun on 3.</li> </ul>
Suot	0	0	0	
Nykyiset tuulivoimalat	1	1	1	
Natura 2000 alueet	0	0	0	
Arvokkaat maisemakohteet	0	0	0	

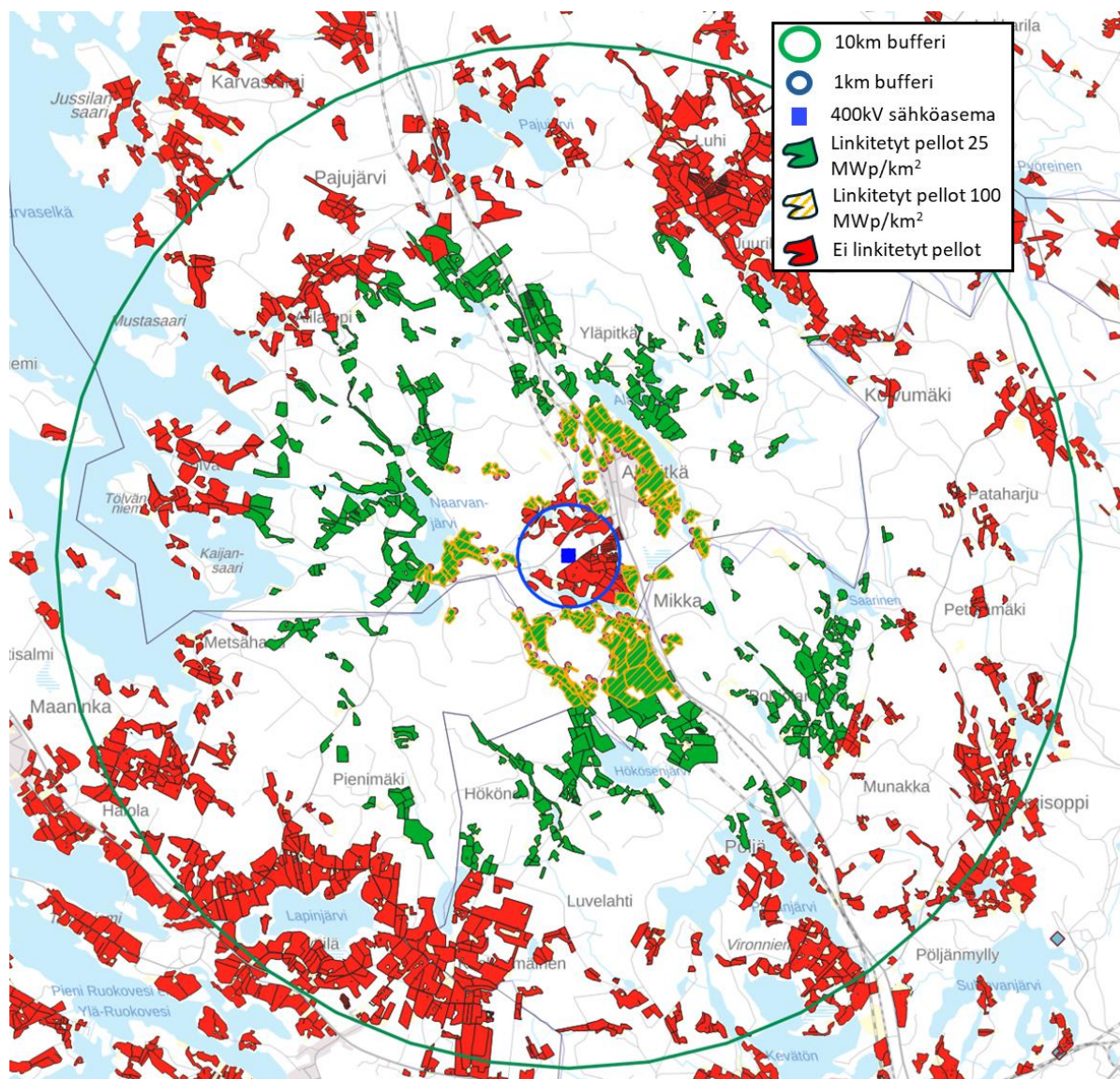
Liite 2. Kantaverkon kehittämissuunnitelma Savo-Karjalan alueella.



Liite 3. Aurinkovoimapotentiaali käytössä olevilla maatalousalueilla kasvityypeittäin

Kunta	Pinta-ala		Asennuspotentiaali		Tuotantopotentiaali		Osuus (%)
	km <sup>2</sup>	ha	MWp (1MW/ha)	MWp (0.25MW/ha)	GWh/a (1MW/ha)	GWh/a (0.25MW/ha)	
Moniv. kuivaheinä-, säilörehu- ja tuorerehunurmet	286	28 579	28 579	7 145	24 292	6 073	49 %
Rehuohra	70	6 957	6 957	1 739	5 913	1 478	12 %
Kaura	48	4 761	4 761	1 190	4 047	1 012	8 %
Monivuotiset laidunnurmet	25	2 492	2 492	623	2 118	530	4 %
Ei tiedossa	25	2 483	2 483	621	2 111	528	4 %
Kevätvehnä	15	1 506	1 506	377	1 280	320	3 %
Seoskasvusto (viljat)	13	1 294	1 294	323	1 100	275	2 %
Viherkesanto (nurmi ja niitty)	10	1 007	1 007	252	856	214	2 %
Kumina	7	730	730	183	621	155	1 %
Luonnonhoitopelto (nurmikasvit, väh. 2 v.)	7	690	690	172	586	147	1 %
Muut	80	7 984	7 984	1 996	6 786	1 697	14 %
<b>Etelä-Savo</b>	<b>585</b>	<b>58 483</b>	<b>58 483</b>	<b>14 621</b>	<b>49 711</b>	<b>12 428</b>	-

Liite 4. Esimerkki maatalousmaiden aurinkosähkötuotantopotentiaalista 400 kV sähköaseman läheisyydessä 25 MWp/km<sup>2</sup> (yhteiskäyttöasennus) ja 100 MWp/km<sup>2</sup> asennustiheyksillä. Suurimmaksi linkitettäväksi kumulatiiviseksi potentiaaliksi on asetettu 500 MWp, joka vastaa tavanomaisella asennustiheydellä 5 km<sup>2</sup> ja yhteiskäyttöasennuksilla 20 km<sup>2</sup> pinta-alaa.



ISBN: 978-952-412-171-2

Lappeenranta 2024

...the most crucial elements...

The results

...the most crucial elements...

**df** LUT  
University