

strateginen **TUTKIMUS**



**Turvallinen ja
tasaveroinen
energiajärjestelmä isolla
aurinkoenergian
osuudella
(RealSolar)**

Tilannekuvaraportti 2024



SUOMEN AKATEMIA

1. Tiivistelmä

RealSolar tutkii, miten voimme hallita aurinkosähkön lisäämistä energiajärjestelmäämme varmistaen samalla joustavan ja kohtuuhintaisen energiansaannin yhteiskunnalle ja sen, että kaikilla yhteiskunnan tasoilla on pääsy aurinkosähkön etuihin ja siten mahdollisuus edistää oikeudenmukaista vihreää siirtymää. Huomioimme kestäväällä tavalla aurinkosähkön lisäämisen tekniset, taloudelliset ja yhteiskunnalliset näkökohdat – aurinkosähkö- ja aurinkosähköjärjestelmät, energiajärjestelmien ja skenaarioiden mallintaminen, energia- ja ilmastopolitiikka, vastuulliset liiketoimintamallit sekä kestävä energia rakennuksissa ja yhteisöissä – mikä edellyttää yhteistyötä eri alojen välillä.

Aurinkosähkön tuotantoprofiilia voidaan muokata pohjoisilla leveysasteilla paljon enemmän kuin alemmilla leveysasteilla kesän pitkän päivänvalon vuoksi. Kesän valoisuuden takia pohjoismaissa on ainutlaatuisia ja hyödyntämättömiä mahdollisuuksia energiajärjestelmämme energiavarmuuden ja edullisuuden optimoimiseksi. Aurinkosähkön älykäs integrointi energiajärjestelmään parantaa sähköntuotannon ja kuormituksen vastaavuutta, mikä vähentää ylimääräisen säätövoiman tarvetta ja siten myös riippuvuutta maakaasusta ja tuontisähköstä. Koska aurinkosähkön tuotantoprofiili tyypillisesti vakiintuu aurinkosähköjärjestelmän asennuksen yhteydessä, tutkimukselle on tarve nyt, kun aurinkosähkötuotannon odotetaan kasvavan Suomessa nopeasti tulevana vuosina.

Perinteisesti kotitalouksien aurinkosähköjärjestelmiä on asentanut ja omistanut varakkaampi väestönosa korkeiden investointikustannusten ja tilantarpeen vuoksi, joten henkilöillä, jotka tarvitsevat kiireellisimmin kohtuuhintaista sähköä, on rajalliset mahdollisuudet saada aurinkosähköä. Tämän eriarvoisuuden kitkemiseksi RealSolar tutkii, miten aurinkosähkön hyödyt voidaan jakaa tasaisemmin ja millaisia uusia käytäntöjä ja liiketoimintamalleja tarvitaan oikeudenmukaisen ja turvallisen vihreän siirtymän mahdollistamiseksi ja hallitsemiseksi.

RealSolar mallintaa aurinkosähköä osana koko energiajärjestelmää huomioiden tuulivoiman lisäämisen sekä mahdollisuudet kysyntäjoustoon ja energian varastointiin. RealSolar tukee JUST ENERGY -ohjelman kokonaisuutta painottamalla nimenomaan aurinkoenergiaan. Hanke hyötyy muiden hankkeiden, kuten FLAIRE ja PHOENIX, tutkimuksesta. RealSolar-hankkeessa suuren mittakaavan kansallisen tason malleja yhdistetään pitkän aikavälin ympäristöskenaarioihin, jotta voidaan arvioida aurinkosähkötuotannon lisäämisen vaikutuksia ilmastotavoitteisiin ja materiaali vaatimuksiin. RealSolarin malleja, työkaluja ja dataa kehitetään yhdessä sidosryhmien kanssa tukemaan erityyppisiä ja -kokoisia toimijoita ja tarjoamaan tukea päätöksentekoon yksilötasolta kansalliselle tasolle.

2. Yhteiskunnallinen haaste

2.1. Hankkeen tutkimuksen lähtökohtana olevat yhteiskunnalliset haasteet

2.1.1. Vihreän sähkön tuotannon lisääminen ja samalla häiriönsietokyvyn ja energiaturvallisuuden tukeminen

Vihreä siirtymä perustuu puhtaaseen sähköntuotantoon. Suomessa tuulivoima on lisääntynyt merkittävästi ja aurinkoenergian odotetaan seuraavan perässä, sillä aurinkoenergiasta on tullut kilpailukykyistä ilman tukia jo ennen Ukrainan sota seurannutta energiakriisiä. Aurinkosähkön tuotantoprofiili voi täydentää tuulivoimaa erityisesti yhdistämällä erilaisia aurinkosähköteknologioita ja asennustapoja. RealSolar selvittää, miten kehittää kestävä, luotettava ja edullinen energiajärjestelmä, jossa tuuli- ja aurinkoenergian osuus kasvaa huomattavasti, ottaen huomioon myös Euroopan polttoaine- ja sähkömarkkinoiden nykyiset toimitushaasteet.

2.1.2. Toimenpiteiden ohjaaminen kansalaisten osallistumisesta kansallisen tason päätöksentekoon aurinkosähkön käyttöönotossa hiilineutraalin yhteiskunnan ja resurssiviisaan talouden luomiseksi

Tietoon perustuva siirtymä edellyttää uutta tietoa aurinkosähkörtkaisujen mahdollisuuksista eri mittakaavoissa: miten ne voidaan parhaiten asentaa, miten niitä voidaan käyttää laitos- tai kotitaloustasolla, miten useat toimipaikat ja kotitaloudet ovat vuorovaikutuksessa jakeluverkon tasolla ja miten aurinkosähkö voidaan parhaiten integroida kansalliseen energiajärjestelmään ja pohjoismaisiin sähkömarkkinoihin. RealSolar tarjoaa tätä tietoa, joka luodaan yhdessä useiden sidosryhmien kanssa.

2.1.3. Vihreän sähkön etujen yhtäläinen saatavuus

Vihreän sähköntuotannon käyttöönoton edistämiseksi tarvitaan ymmärrystä siihen liittyvistä tarpeista ja mahdollisuuksista kaikilla yhteiskunnan tasoilla. Tätä varten RealSolar tutkii sekä yksittäisten kansalaisten että kaupunkisuunnittelun ja erilaisten organisaatioiden näkemyksiä aurinkosähkötjärjestelmien käyttöönoton mahdollisuuksista ja esteistä. Energiayhteisöjen syntyminen ja toiminnan oikeudenmukaisuuteen vaikuttavat monet tekijät, joita ratkotaan jo kaupunkisuunnittelusta ja liiketoimintamallien suunnittelusta lähtien. Eri sidosryhmien aktiivista osallistumista arvonluontitoimiin edellytetään tyypillisesti pitkällä aikajänteellä jännitteisissä ympäristöissä. RealSolarissa tutkitaankin, miten oikeudenmukaisuus nähdään osana käyttöönottoa ja sen suunnittelun prosessia.

2.2. Miten RealSolar pyrkii edistämään haasteiden ratkaisua?

2.2.1. RealSolar lisää ymmärrystä oikeudenmukaisesta vihreästä siirtymästä ja huomioi globaalin ja eurooppalaisen toimintaympäristön muutokset

Energiajärjestelmän mallinnus tutkii pohjoismaisen ja suomalaisen energiajärjestelmän ja sähkömarkkinoiden lähitulevaisuuden kehitystä ja nostaa esiin luotettavan toiminnan ja kohtuuhintaisen energian hinnan riskit. Pohjoismaissa on poikkeuksellisen hyvät mahdollisuudet muokata aurinkosähkön tuotantoprofiilia. Tuotantoprofiili vakiintuu, kun aurinkosähkölaitos rakennetaan, joten RealSolar on erittäin ajankohtainen nyt, kun aurinkosähköinvestoinnit kasvavat nopeasti muuttuneen toimintaympäristön vuoksi. Aurinkosähkön kasvun hallinta Suomessa on välttämätöntä, jotta voidaan lisätä vaihtelevaa uusiutuvaa energiaa ja samalla rajoittaa riippuvuutta fossiilipohjaisesta tuotannosta ja sähkön tuonnista.

2.2.2. RealSolar edistää konkreettisesti oikeudenmukaista vihreää siirtymää, resurssi- ja energiaturvallisuutta sekä häiriönsietokykyä

Energiajärjestelmäskenaarioissa kvantifioidaan energiajärjestelmän luotettavuuteen ja kohtuuhintaisuuteen kohdistuvat odotetut riskit Euroopan nykytilanteessa. Tämän perusteella määritellään ja kehitetään tarvittavat toimet yhdessä hankkeeseen osallistuvien kansallisten viranomaisten kanssa. Suomi voi siis hyötyä voimakkaasti lisääntyvästä tuuli- ja aurinkoenergiasta ja vähentyneestä energian tuonnista luotettavuudesta tinkimättä, ja aurinkoenergian hyödyt voivat yleistyä yhteiskunnassa. VRE:n tuotantoprofiilin säätö vähentää fossiilisten polttoaineiden ja tuontisähkön tarvetta sekä lyhytaikaisia energiavarastoja, jotka lisäävät järjestelmätason kustannuksia ja materiaali vaatimuksia. Sähköntuotantotavoista aurinkosähkö mahdollistaa laajimman pääsyn kotitaloustasolle asti. RealSolar tutkii, miten uusiutuvan energian hyödyt voitaisiin jakaa laajemmalle ja tasaisemmin vihreän siirtymän hyväksyttävyyden parantamiseksi.

Resilienssi läpileikkaavana prioriteettina RealSolarissa

RealSolarin lähtökohtana on tutkia aurinkosähköä osana koko energiajärjestelmää. Energiajärjestelmien mallinnuksen avulla analysoidaan järjestelmätason riskejä eri skenaarioissa ja määritetään tarvittavat toimenpiteet järjestelmän luotettavuuden, edullisuuden ja ehdotettujen toimenpiteiden kestävyys suhteen. Keskeiset riskit tunnistetaan yhdessä kansallisten viranomaisten sidosryhmien (Fingrid, TEM, NESÄ) kanssa ja laaditaan suosituksia häiriönsietokyvyn parantamiseksi. Paikallistason resilienssin yhteisellä luomisella varmistetaan yhteiskunnallinen osallisuus ja tuetaan aurinkosähkön mahdollisuuksia energiaköyhyyden välttämiseksi. Tätä varten RealSolar ottaa mukaan paikalliset kaupunkisuunnittelijat, teknologian tarjoajat, kiinteistöhallintayritykset, energiantuottajat jne. vuorovaikutteiseen tutkimusprosessiin kyselyillä, haastatteluilla ja

työpajoilla, joissa etsitään ratkaisuja, esteitä, mahdollisuuksia ja haasteita, jotka luovat sosiaalisesti tasa-arvoa aurinkosähköjärjestelmien avulla.

RealSolarin tavoitteet

RealSolar parantaa julkista tietoa aurinkovoiman käytöstä ja kannustaa taloudellisesti hyödyllisiin ja ympäristön kannalta kestäviin aurinkovoimainvestointeihin, jotka tukevat Suomessa energiajärjestelmän resilienssiä ja tasa-arvoisuutta.

Tavoite 1: Tavoitteena on selvittää, minkälaiset aurinkosähköteknologiat soveltuvat parhaiten pohjoismaisiin olosuhteisiin ja minkälaiset aurinkoenergiajärjestelmät ovat pitkäikäisiä ja luotettavia. Tämä sisältää aurinkopaneelien ja niiden asennustavan valitsemisen, lumen vaikutuksen huomioimisen sekä tuotannon ajoittamisen järkevästi huomioiden kulutuksen ja sähkön hinnan vuorokausivaihtelun.

Tavoite 2: Toisena tavoitteena on kehittää sääennusteisiin perustuvaa työkalua, jolla sekä kaupalliset toimijat että yksittäiset kuluttajat voivat ennakoida tulevien päivien aurinkosähkötuotantoa, mikä mahdollistaa tehokkaan energiankäytön suunnittelun ja optimoinnin. Aiempaan tutkimukseen perustuvaa työkalua, joka ennustaa tuotannon etelää kohti suunnatulle, 30 asteen kulmaan kallistetulle paneelille, kehitetään RealSolarissa siten, että käyttäjä voi vapaasti valita käytetyn aurinkopaneelin teknologian ja suuntauksen.

Tavoite 3: Teollisen aurinkovoiman yleistyminen Suomessa aiheuttaa väistämättä risteäviä intressejä maankäytölle. Regulaatio on vasta kehittymässä, ja se saattaa johtaa tilanteisiin, joissa teolliselle aurinkovoimalle riittävän suurien maa-alueiden löytäminen on vaikeaa. Kolmantena tavoitteena RealSolar tuottaa tietoa eri aurinkosähkön tuotantomuotojen soveltuvuudesta Suomen olosuhteisiin.

Tavoite 4: Lisäksi tavoitteena on tutkia lisääntyvän aurinkosähkön vaikutuksia eri tasoilla: paikallisella tasolla mm. jakeluverkon kestävyys, kansallisella tasolla vaikutuksia koko maan päästöihin. Aurinkosähkön kannattavuuden laskeminen eri toimijoille, kuten kotitalouksille sekä yrityksille eri markkinamallien pohjalta käyttäen eri tasoisia markkinamalleja. Lisäksi koko maan sähköjärjestelmän ja markkinoiden resilienssi aurinkosähkön määrän kasvaessa merkittävästi.

Tavoite 5: Energiayhteisöjen syntyminen osana vihreää siirtymää luo intressiristiriitoja monien sidosryhmien välille. Uusiutuvan energian ja vihreän sähkön oikeudenmukaista saatavuutta ja kestäväää arvonluontia tutkitaan erityisesti oikeudenmukaisuuden näkökulmasta soveltaen kolmen pilarin näkökulmia. Tavoitteena on myös kartoittaa kansalaisten mahdollisuuksia ja intressejä osallistua vihreän siirtymän päätöksentekoon sekä julkisen että yksityisen päätöksenteon tilanteissa energiayhteisöjen muodostamisen ja muodostumisen prosesseissa.

3. Tutkimuksen nykytila (state of the art)

Aurinkoenergiakentän nykytrendissä pyritään lisäämään paneelien tehoa pinta-alayksikköä kohti, mikä edistää erityisesti kaksipuoleisten- ja tandem-aurinkopaneelien kehitystä. Kaksipuoleisilla paneeleilla voi vaikuttaa aurinkosähkön tuotannon ajoitukseen asentamalla paneelit pystyyn siten, että niiden sivut osoittavat itään ja länteen. Erityisesti Pohjoismaat voivat hyötyä pystyyn asennetuista aurinkosähköjärjestelmistä, jotka tuottavat haluttuja aamu- ja iltapiikkejä. Professori Miettusen ryhmä on analysoinut tätä aihetta [1] yhdessä muiden tutkimusryhmien kanssa [2–5]. Erityisiä haasteita tuovat pystyyn asennettujen kaksipuoleisten paneelien tuotannon mallinnukseen ja järjestelmien suorituskyvyn mittaamiseen liittyvät käytännöt: nämä järjestelmät tuottavat sähköä erityisesti silloin, kun aurinko on matalalla, ja tyypilliset mallinnusmenetelmät eivät tällöin toimi kunnolla. Toisaalta pystyyn asennetut paneelit eivät ole alttiita lumen aiheuttamalle kuormitukselle ja varjostukselle, mikä voi olla keskeinen ongelma etelää kohti suunnatuilla paneeleilla. Mallinnuksen ja lumen tuomat haasteet tunnistettiin keskeisiksi ongelmiksi äskettäisessä “High-latitude PV” -työpajassa, joka järjestettiin Piteåssa, Ruotsissa (14.–15.3.2024). Turun AMK on perustanut useita aurinkosähkötuotannon demonstraatiokohteita, joissa on erilaisia aurinkopaneeleja (mukaan lukien erityyppiset kaksipuoliset aurinkopaneelit). Heidän seuraamiensa aurinkosähköjärjestelmien portfolio on yksi Pohjoismaiden suurimmista [6–9]. Riittävän monitorointidatan saatavuus on globaalisti yksi keskeisimmistä haasteista, joten tämä kattava data antaa hyvät lähtökohdat aurinkosähköjärjestelmien analysoinnille.

Aurinkosähköjärjestelmän tehontuoton tarkka mallintaminen on ratkaisevan tärkeää, jotta voidaan ennustaa suunnitellun aurinkosähköjärjestelmän taloudellinen kannattavuus sisältäen sen integroinnin sähköverkkoon. Auringon globaalisäteilyn (engl. global horizontal irradiance, GHI) osalta dataa on laajalti saatavilla, mutta haasteena on auringon säteilyn mallintaminen aurinkopaneelin tasossa. Valtaosa säteilymallinnusmenetelmistä on suunniteltu matalille ja keskileveysasteille. Näin ollen tulokset korkeilla leveysasteilla, kuten Pohjoismaissa, ovat epätarkkoja esimerkiksi matalan auringon korkeuskulman vuoksi. GHI-dataan perustuvien, erityisesti pohjoismaisiin olosuhteisiin suunniteltujen aurinkosähkövoimamallien kehittäminen onkin välttämätöntä aurinkosähkön edistämiseksi Pohjoismaissa. Prof. Lindforsin tiimillä Ilmatieteen laitoksella on vahva asiantuntemus aurinkoenergiameteorologiasta, ja RealSolarissa tehtävä tutkimus jatkaa aiemmin tehtyä työtä aurinkosähkön tuotannon ennustamiseksi pohjoismaisessa kontekstissa [10]. Lisäksi Miettusen ryhmä Turun yliopistossa on aloittanut pohjoisiin olosuhteisiin soveltuvien säteilymallien kehittämisen yhteistyössä NTNU:n kanssa [11] ja pohjoismaisiin olosuhteisiin soveltuvien aurinkosähkömetriikoiden arvioinnin Turun AMK:n ryhmän kanssa [12].

Aurinkosähkön ja laajemmin vihreän siirtymän päätöksenteon tutkiminen on tärkeää. Tutkimus liittyy ratkaisujen käyttöönottoon monilla eri päätöksenteon tasoilla sekä julkisella (esim. paikallinen, alueellinen, kansallinen, ylikansallinen) että yksityisellä (esim. yksilö, kotitalous, yritykset, yritysklusterit, teolliset symbioosit) sektorilla. Kolmen pilarin ja oikeudenmukaisuuden näkökulmasta on tutkimusta tehty globaalisti erityisesti kotitalous- ja voimalatasolla, mutta Suomessa tutkimusta on vielä niukasti. Sähkön tuotantoympäristössä (esim. vaihtelevat sähkön hinnat kannustavat tuottajakuluttajia tuottamaan aurinkosähköä yli oman käyttönsä) ja kulutuksessa (esim. kysyntäpuolen hallinta ja sähköajoneuvojen lisääminen) tapahtuu muutoksia, joita on arvioitava tulevissa aurinkosähköskenaarioissa ja vaikutusmalleissa kaikilla näillä tasoilla. Jakeluverkkaja ei ole suunniteltu sähköntuotantoon, ja niiden jännitevaihteluiden hallinta on kriittistä. Viimeksi Miettusen ryhmä selvitti, kuinka paljon aurinkosähköä voidaan lisätä jakeluverkkoon tuotantoprofiilia muuttamalla [1].

Vaikka aurinko- ja tuulivoima ovat keskeisiä ratkaisuja ilmastonmuutoksen hillitsemisessä, integroidut arviointimallit (IAM), joita käytetään yleisesti maailmanlaajuisten ja kansallisten hillitsemisstrategioiden arvioinnissa, eivät ole riittävän yksityiskohtaisia kuvaamaan vaihtelevaa sähköntuotantoa [13]. Ekholmin ryhmän rakentamassa SuCCESs IAM:ssä [14] on kuitenkin tämä ominaisuus tuntitason sähkömoduulin avulla, joka kuvaa viikkoja, joilla on korkea tai matala vaihteleva uusiutuva energiatuotanto [15]. SuCCESs pystyy myös esittämään aurinkosähkön maa-aluevaatimuksia, jolloin voidaan mallintaa maahan asennetun aurinkosähkön maankäyttövaikutuksia ja sen kilpailua maankäyttöön perustuvan ilmastonmuutoksen hillitsemisen kanssa.

Lisäksi Syrin ryhmä on laatimassa skenaarioita Suomen energiajärjestelmästä perustuen kansalliseen ilmastostrategiaan, jotka toteutetaan Plexos-sähkömarkkinamallinnusohjelmalla. Plexos-ohjelmalla on mahdollista mallintaa koko Pohjoismainen sähköjärjestelmä tuntitasolla, mikä mahdollistaa tarkemman analyysin kuin vain Suomeen keskittyvä markkinamalli. Kansallisen tason malleja tukevat teknillistaloudellista kannattavuutta tarkastelevat rakennus- ja laitostason energiajärjestelmämallit. Nämä mallit ja niiden ominaisuudet antavat RealSolarille ainutlaatuisen mahdollisuuden arvioida aurinkosähkön osuutta ja vaikutuksia kansallisiin hillintästrategioihin, kuten Suomen ilmastoneutraaliustavoitteeseen.

Investointikustannukset muodostavat usein merkittävän esteen aurinkosähköjärjestelmien käyttöönotolle, mikä rajoittaa aurinkoenergian saatavuuden vain suurituloisille kotitalouksille ja vaikeuttaa mahdollisuuksia aurinkosähkön hyötyjen tasapuoliseen jakamiseen. Aurinkosähköjärjestelmien liiketoimintamallit ovat kuitenkin monipuolistuneet, ja kolmannen osapuolen omistus (TPO) on yleistynyt investointikustannusten alentamiseksi. Uudet liiketoiminta- ja toimintamallit sopeutuvat markkinaympäristön muutoksiin, ja

aikaisemmissa tutkimuksissa on havaittu, että kansalaiset ovat halukkaita maksamaan aurinkopaneeleista, koska ne liittyvät suurempaan huoleen päästöjen ja ilmastonmuutoksen ehkäisemisestä, sekä yleiseen myönteiseen asenteeseen aurinkosähköteknologioita kohtaan [16]. Lisäksi aurinkosähköjärjestelmien käyttöönottoon TPO:n kautta vaikuttavat kansalaisten subjektiivinen kokemus eli se, miten he kokevat edut muihin vastaaviin ratkaisuihin verrattuna, sekä aurinkoenergiaratkaisujen yhteensopivuus kuluttajan energiansäästökäyttäytymisen kanssa [17]. Paikallisten energijärjestelmien luomisprosessin rakennemekanismeja tutkiessa on havaittu, että institutionaalinen konteksti, sidosryhmien vuorovaikutus, teknologiset valinnat ja resurssien mobilisointi ovat kriittisiä mekanismeja.

4. Monitieteinen yhteistyö

4.1. RealSolar yhdistää tutkimusalat ja verkostot haluttujen ratkaisujen saavuttamiseksi

RealSolar yhdistää aurinkosähköjärjestelmien asiantuntemuksen ja aurinkometeorologian (WP1) energijärjestelmän mallintamiseen ja energiailmastoskenaarioiden rakentamiseen, minkä tavoitteena on löytää optimaalinen VRE-ratkaisu suuressa mittakaavassa (WP2). Tämä on tärkeää päätöksentekijöille (TEM, NESÄ) kestävyystavoitteiden saavuttamisessa sekä verkko-operaattoreille (Fingrid). Asuinrakennusten ja suuren mittakaavan aurinkosähköjärjestelmät tarvitsevat lisämallinnusta (WP3) ja kokemusta aurinkosähköstä rakennuksissa ja yhteisöissä, mikä on ratkaisevan tärkeää käytännöllisten ja asiaankuuluvien työkalujen kehittämiseksi yhdessä (WP1,5). Aurinkosähkön oikeudenmukaisen saatavuuden laajentamiseksi vastuullisten liiketoimintamallien ja arvonluonnin tuntemus on ratkaisevan tärkeää uusien politiikkatoimien, liiketoimintamallien ja innovatiivisten käytäntöjen kehittämiseksi (WP4, WP5). Tätä varten otamme mukaan useita vuokra-asuntojen tarjoajia (KEVA, Turun kaupunki), energiayhteisöjä (Lounapuisto) ja taloyhtiöitä isännöintiyhtiöiden (Isännät Oy) kautta.

Kaksipuoleisten paneelien sisällyttäminen aurinkoenergian tuotantoa ennustavaan työkaluun edellyttää yhteistyötä eri tahojen kesken (FMI, UTU, TUAS, TU Delft). Tämä vaatii sekä mallinnusta että mallien validointia olemassa olevilla demosysteemeillä, joista esimerkkeinä Naantalin asuntomessualueen 100 kWp:n ja Tyyssijan (Turun ylioppilaskylässä sijaitseva kerrostalo) 140 kWp:n kaksipuoleisia paneeleja hyödyntävät aurinkovoimalat. Myös kansainvälinen yhteistyö muiden vastaavalla alalla toimivien tutkimuslaitosten kanssa on keskeistä. Esimerkiksi NTNU (Norja, aktiivista yhteistyötä käynnissä) on keskeinen kumppani, kun taas RISE (Ruotsi) ja UAF (Alaska, USA) ovat potentiaalisia tulevia kumppaneita.

Aurinkoenergian järjevä integrointi Suomen energijärjestelmään edellyttää yhteistyötä koskien tuotannon mallinnusta (WP1), ennustamista (WP2) ja energijärjestelmän mallintamista (WP3). Myös taloudelliset näkökulmat, erityisesti sähkön hinta ja sen kehitys, ovat keskeisessä roolissa. Aallossa on

yhteistyötä huoltovarmuuskeskuksen sekä työ- ja elinkeinoministeriön kanssa energiajärjestelmien resilienssin ja energiaturvallisuuden analysoinnissa, mikä on tärkeä osa RealSolar-projektia (WP3).

4.2. Tutkimusyhteistyö muiden STN-ohjelman hankkeiden kanssa

RealSolar-hanke painottuu erityisesti aurinkoenergiaan liittyviin kysymyksiin, joten sillä on mahdollista tuottaa muille hankkeille tarkempaa tietoa nimenomaan tästä vihreän siirtymän osasta, ja yhteistyöhön on monia mahdollisuuksia. Esim. PHOENIX-hanke tutkii laajasti vihreää siirtymää ja energiajärjestelmän mallinnusta, jota voisi kehittää osin myös yhteistyössä. Lisäksi FLAIRE-hanke tutkii kulutusjoustoja, ja kotitaloudet, joilla on omaa aurinkoenergian tuotantoa, ovat yleensä hyvin motivoituneita kulutusjoustoihin parhaan taloudellisen hyödyn saavuttamiseksi. Näin ollen yhteistyö aurinkoenergian tuotannon ja oman kulutuksen maksimointiin on yksi mahdollinen yhteistyön aihe RealSolar- ja FLAIRE-hankkeiden välillä. Laajan mittakaavan aurinkoenergian tuotanto, jota myös tutkitaan RealSolar-hankkeessa, sekä vedyn tuottaminen, johon JUSTH2TRANSIT-hanke keskittyy, on toinen hyvin keskeinen yhteistyön aihe. JUST ENERGY -ohjelman ulkopuolelta on mielenkiintoisia yhteistyömahdollisuuksia. Aurinkoenergian laajamittainen lisääminen vaikuttaa maankäyttöön ja biodiversiteettiin, mihin liittyen BIODIFUL-hanke voisi tarjota asiantuntija-apua.

5. Vuorovaikutus ja vaikuttavuuden edistäminen

Aurinkosähkön käytön edistäminen edellyttää laajaa ymmärrystä ja yhteistyötä yhteiskunnan kaikilla tasoilla. RealSolarin sidosryhmäyhteistyö kattaa laaja-alaisesti eri toimijat niin teknologian, politiikan, päätöksentekijöiden kuin kansalaisten piiristä. Teollisen aurinkovoiman lisääntyminen aiheuttaa erilaisia tarpeita muun muassa maankäytölle sekä ristiriitaisia intressejä eri sidosryhmien välille. Tarvitaan ymmärrystä ja erilaisten organisaatioiden näkemyksiä aurinkosähköjärjestelmien mahdollisuuksista ja esteistä. Yhteisen keskustelun ja yhteistyön aikaansaaminen on välttämätön edellytys uusien teknologioiden ja järjestelmien hyväksyttävyydelle ja hyötyjen oikeudenmukaiselle jakamiselle.

Hankkeen vuorovaikutuksen päätavoitteet ovat: 1) tarjota tietoa ja avoimesti saatavilla olevia työkaluja aurinkosähkön tuotantoprofiilin optimoimiseksi paikan päällä, paikallisella ja kansallisella tasolla hyödyntämällä pohjoismaisia mahdollisuuksia resurssiviisaan, joustavan ja turvallisen yhteiskunnan saavuttamiseksi ja 2) laajentaa eri asumismuotojen ja tulotasojen osallistumista vihreään siirtymään ja mahdollisuutta tavoittaa aurinkosähkön hyötyjä.

RealSolarilla on viisi pääasiallista vuorovaikutusryhmää, jotka ovat: 1) kansalaiset, kuluttaja-tuottajat ("prosumers"), asunto-osuuskunnat ja

kiinteistöhoito, paikalliset yhdistykset, kansalaisjärjestöt 2) kaupunkisuunnittelijat, sosiaalisten/vuokra-asuntojen tarjoajat, paikalliset jakeluverkonhaltijat 3) investoijat, hankekehittäjät, off-takerit 4) kansalliset energiaviranomaiset ja 5) tutkimus ja akateeminen maailma.

Hankkeen vuorovaikutustoiminta vastaa vuorovaikutusryhmiä koskeviin tiedontarpeisiin konkreettisilla toimilla (taulukko 1). Näiden avulla RealSolar 1) tunnistaa erilaiset intressit ja vaikutukset, 2) edistää tiedonsiirtoa ja vuoropuhelua asiantuntijoiden ja yleisön välillä, 3) varmistaa tasapuolisuuden tietoisuuden lisäämisen ja taitojen kehittämisen avulla sekä 4) mahdollistaa uudet yhteydet, rikastuttaa vuoropuhelua ja edistää eri alojen yhteistyötä.

Taulukko 1. Vuorovaikutusryhmiin liittyvät tiedontarpeet ja niihin vastaavat toimet.

Vuorovaikutusryhmä	Tiedontarve	Toteutus
Kansalaiset, kuluttaja-tuottajat ("prosumers"), asunto-osuuskunnat ja kiinteistöhoito, paikalliset yhdistykset, kansalaisjärjestöt	Ohjataan yksittäisiä kuluttajia optimoimaan aurinkosähköjärjestelmänsä omaa ja naapuruston käyttöä varten. Tuetaan kestävää elämäntapaa kysynnän joustavuudella ja resurssiviisaalla sähkönkäytöllä. Lisätään kansalaisten ja yhteisöjen tietoisuutta energiamurroksesta ja aurinkosähkön hyötyjen mahdollisuuksista.	Yhteistyössä luotu sähköinen aurinkosähköjärjestelmän neuvontatyökalu kotitalouksille. Tarkemmat sääennusteet aurinkosähköä varten. Työpajat ja Mini Society - tapahtumat tukemaan kansalaisten ja sidosryhmien osallisuutta. Haastattelututkimukset toimivat myös tiedonjakamisen foorumeina.
Kaupunkisuunnittelijat, sosiaalisten/vuokra-asuntojen tarjoajat, paikalliset jakeluverkonhaltijat	Ymmärtää erilaisten keinojen (mm. osallisuuden prosessien) vaikutusta aurinkosähkön hyödyntämisen laajentamisessa energiayhteisöjen, kansalaisten ja kotitalouksien käyttöön. Aurinkosähkön lisäämisen sekä sähkönkulutuksen ja varastoinnin muutosten vaikutus paikalliseen verkkokapasiteettiin ja investointitarpeiden määrittäminen. Heikommassa asemassa olevan väestön osallistaminen lisäämällä tietoisuutta uusista energiaratkaisuista ja lisäämällä heidän kykyään hyödyntää aurinkosähkön hyötyjä kestävää kehitystä tukevien paikallisyhteisöjen luomiseksi.	Mahdollisuus-uhka-este-fasilitaattori -lähestymistavan ohjaaminen yhteissuunnittelevien työpajojen ja tapahtumien avulla. Tutkitaan sitoutumisen syitä sekä toimintamallien ja hallinnon syntymistä. Pienjänniteverkon mallit tulevaisuuden aurinkosähkön tuotantoon, sähkönkulutukseen ja varastoinnin skenaarioihin liittyen. Tutkitaan julkisten ja vuokra-asuntojen erityisvaatimuksia aurinkosähkötarkaisujen hyödyntämiseksi; hyödynnetään kansainvälisesti pilotoituja

		menetelmiä yhteisöjen osallisuuden tukemiseksi.
Investoijat, hankekehittäjät, off-takerit	<p>Aurinkosähköjärjestelmän tuotannon arviointi VRE-laitosta suunniteltaessa sekä tuotantosalkun yhdistelmän hallinta käytön aikana.</p> <p>PV:n itsekannabilisoitumiseen liittyvien riskien tunnistaminen ja lieventäminen suomalaisessa ja eurooppalaisessa toimintaympäristössä.</p> <p>Arvioidaan, miten investoinnit vaikuttavat luonnonvarojen käyttöön ja kestäväen kehityksen tavoitteisiin.</p>	<p>Yhteistyössä luotu välineistö VRE-sijoittajille tuotannon arvioimiseksi (mallinnustyökalu ja energiasääennusteet).</p> <p>Mallinnetut kansallisen tason PV-skenaariot, erilaiset liiketoimintamalliarvioinnit.</p> <p>PV:n kestävyysarviointi, jossa otetaan huomioon esim. kokonaishiilidioksidipäästöt, maankäyttö, biologinen monimuotoisuus, LCA.</p>
Kansalliset energiaviranomaiset	<p>Edistetään energiavarmuutta, vahvistetaan yhteiskunnan ja talouden kestävyyttä ja edistetään hiilineutraalia ja resurssiviisasta yhteiskuntaa lisäämällä aurinkosähköä kansallisessa energiajärjestelmässä.</p> <p>Kansallisen tason energian riittävyyden ja energian toimitusvarmuuden varmistaminen pitkällä aikavälillä (vuosittain) ja lyhyellä aikavälillä (2-3 päivää eteenpäin).</p>	<p>Energiajärjestelmäskenaariot ja tapausanalyysit kansallisen tason poliittisen päätöksenteon ja viranomaisten tietopohjan tukemiseksi.</p> <p>Kansallisten ja pohjoismaisten energiajärjestelmien avoimesti saatavilla olevat mallit pitkän aikavälin ja online-energasääennusteet lyhyen aikavälin tasapainottamista varten.</p>
Tutkimus ja akateeminen maailma	<p>Tulevaisuuden aurinkosähköskenaarioita koskevat näkemykset täydentävät muita energiajärjestelmään keskittyviä SRC:n hankkeita, tuulivoima ja/tai energian varastointi JUST ENERGY -ohjelman kokonaisvaikutuksen lisäämiseksi.</p> <p>PV:n rooli Pohjoismaissa ja sen vaikutukset energiajärjestelmään eurooppalaisessa ja maailmanlaajuisessa toimintaympäristössä. Parannettu</p>	<p>SRC:n järjestämät yhteiset tapahtumat tiedonsiirtoa varten. Hyödynnetään kehitettyjä malleja ja välineitä.</p> <p>Yhteistyö JUST ENERGY -ohjelman yhteisössä.</p> <p>Kansainvälinen yhteistyö, jota tuetaan tutkijoiden liikkuvuuden ja spin-off-hankkeiden avulla; vertaisarvioidut avoimet julkaisut, konferenssiesitykset,</p>

	aurinkosähkö- ja energiajärjestelmän mallintaminen pohjoismaisilla leveysasteilla, maailmanlaajuisen skenaarion parantamiseksi.	seminaarit; avoimesti saatavilla olevat tiedot ja mallit.
--	---	---

6. Lähteet

- [1] Jouttijärvi et al., Sol Energy 262, 111819, 2023
- [2] Khan et al., Appl Energy 206, 240–248, 2017
- [3] Guo et al., Energy 61, 447–454, 2013
- [4] Baumann et al., Sol Energy 190, 139–146, 2019
- [5] Sun et al., Appl Energy 212, 1601–1610, 2018
- [6] Ranta et al., Proc. 36th EUPVSEC, 1702-1705, 2019
- [7] Ranta et al., Proc. 37th EUPVSEC, 1460–1465, 2020
- [8] Huerta et al., Accepted to 40th EU-PVSEC, 2023
- [9] Ranta et al., Proc. 8th WCPEC, 1132-1136, 2022
- [10] Böök & A. Lindfors, Sol Energy 211, 779–788, 2020
- [11] Manni et al., Renewable Energy 220, 119722, 2024
- [12] Karttunen et al., Renewable Energy 219, 119473, 2023
- [13] Brinkerink et al., Environ Model Soft 150, 105336, 2022
- [14] Ekholm, SuCCESs IAM - Finnish Meteorological Institute.
<https://en.ilmatieteenlaitos.fi/success-iam>
- [15] Ekholm & V. Virasjoki, The Energy Journal 41, 215–231, 2020
- [16] Kuperstein-Blasco & S. Makinen, Proc. 2022 IEEE IEEM, 1406–1410, 2022
- [17] Kuperstein-Blasco & S. Mäkinen, Proc. 2022 EBES, 453–458, 2022
- [18] Valta & S. J. Makinen, Proc. IEEE TEMSCON EUROPE 2022, 7–14, 2022