



Karelia-ammattikorkeakoulu
Tradenomi (AMK), tietojenkäsittely

Energiayhteisöiden lohkoketjusovellukset

Lohkoketjuteknologian soveltaminen
energiayhteisöiden energiavertaiskauppaan.

Ville Kuittinen

Opinnäytetyö, marraskuu 2024

www.karelia.fi



OPINNÄYTETYÖ
Marraskuu 2024
Tietojenkäsittelyn koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600 (vaihde)

Tekijä
Ville Kuittinen

Nimeke

Energiayhteisöiden lohkoketjusovellukset: lohkoketjuteknologian soveltaminen energiayhteisöiden energiavertaiskauppaan.

Toimeksiantaja: Älykkäät energiayhteisöt-hanke (Karelia-ammattikorkeakoulu)

Tiivistelmä

Lohkoketjuteknologia tarjoaa mahdollisuuden luoda uusia markkinoita ja jakamiseen perustuvia palveluja, vertaisverkkoja sekä liiketoimintamalleja. Tämä työ pyrki kuvailevan kirjallisuuskatsauksen avulla vastaamaan siihen, miten lohkoketjua on käytetty energiayhteisöissä ja erilaisissa energiaverkoissa, millaisia teknologisia vaihtoehtoja on saatavilla ja kuinka ne voisivat soveltua Älykkäät energiayhteisöt -hankkeen pilotteihin.

Pilotointeja ja hankkeita tarkastelemalla havaittiin, että lohkoketjuja hyödyntävissä vertaisverkoissa tapahtuva yhteisön sisäinen automaattinen kaupankäynti on mahdollista toteuttaa älykkäillä sopimuksilla. Älysopimusten käyttäminen pystyy tuottamaan yhteisölle taloudellista hyötyä sekä tehostamaan yhteisön energian kulutusta. Pilotoinneissa on usein törmätty lohkoketjuverkon skaalautuvuusongelmaan ja siihen, kuinka paljon käytössä olevien solmujen määrä vaikutti verkossa tapahtuvan tietoliikenteen määrään. Useimpien energiayhteisöiden kohdalla skaalautuvuusongelma ei välttämättä muodostu rajoittavaksi tekijäksi, mikäli käytetään yksityisiä lohkoketjuja julkisten sijaan.

Tulokset osoittivat, että varsinaisia käyttökokemuksia on vielä varsin suppeasti saatavilla, sovelluksiin liittyy paljon epävarmuuksia ja monet asiat vaativat selvittämistä ennen laajempaa käyttöönottoa. Toistaiseksi valmista, edes useimmille energiayhteisöille sopivaa ratkaisua ei ole saatavilla. Kehitystyötä tulee jatkaa keskittyen erityisesti sovellusten energiatehokkuuteen ja tietosuojaan.

Kieli
suomi

Sivuja 80

Asiasanat: Energiayhteisö, lohkoketju, vertaisverkot



THESIS
November 2024
Degree Programme in Business Information
Technology

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author
Ville Kuittinen

Title
Blockchain Applications for Energy Communities - Applying Blockchain Technology to P2P Energy Trade in Energy Communities.

Commissioned by Smart Energy Communities project (Karelia University of Applied Sciences)

Abstract

Blockchain technology offers the opportunity to create new markets and sharing-based services, peer-to-peer networks and business models. This thesis is a descriptive literature review by nature and the aim was to answer how blockchain can be used in energy communities and different energy networks. Furthermore, available technological options were mapped and their applicability to the Älykkäät energiayhteisöt-project pilots were assessed.

A review of the pilots and projects showed the potential of smart contracts for automated intra-community trading in peer-to-peer networks. The most important finding was that the use of smart contracts can produce economic benefits to the energy community and improve their energy efficiency. However, pilots often face scalability issues with blockchain networks and node count impacts on traffic. For most energy communities using private blockchains instead of public ones, scalability is less problematic.

It was discovered that the actual user experience is still rather limited. Furthermore, there are many uncertainties in the blockchain applications, and many issues need to be clarified before wider deployment. So far, there is no ready-made solution available, even for most energy communities. Further development work is needed, with a particular focus on energy efficiency and data protection in the applications.

Language
Finnish

Pages 80

Keywords: energy community, blockchain, peer-to-peer networks

Sisältö

Lyhenteet	5
1 Johdanto	6
2 Lohkoketjut	7
2.1 Keskeiset lohkaketjut	9
2.2 Määritelmä	10
2.3 Toimintatapa.....	13
2.4 Soveltaminen.....	14
2.5 Älykkäät sopimukset	15
3 Hajautetut energiajärjestelmät	17
3.1 Energiayhteisöt	20
3.2 Mikroverkot.....	24
3.3 Virtuaalivoimalat	27
3.4 Uusiutuvan energian integrointi	28
4 Lohkoketjut energiakaupassa	29
4.1 Energiakaupan muutos.....	29
4.2 Vähemmän välikäsiä	30
4.3 Energian vertaiskauppa	31
4.4 Älysopimusten mahdollisuudet	34
5 Turvallisempia energiajärjestelmiä	35
5.1 Lisääntynyt avoimuus ja luottamus	35
5.2 Turvallisuuden ja tehokkuuden parantaminen	36
6 Energiayhteisöiden lohkaketjusovellukset	37
6.1 Johdanto	37
6.2 DER VPP-malli.....	37
6.3 CVPP malli.....	40
6.4 LEC.....	44
6.5 Helios.....	47
7 Käytännön pilotit ja testit.....	48
7.1 Brooklyn Microgrid.....	48
7.2 SonnenCommunity	52
7.3 Milford Haven Port.....	54
7.4 Kortright Centre Microgrid	56
8 Haasteet ja mahdollisuudet	58
8.1 Haasteet.....	58
8.2 Transaktioiden määrä	58
8.3 Konsensusmekanismien suuri energiantarve.....	59
8.4 Skaalautuvuus.....	61
8.5 Säätely	64
8.6 Yhteentoimivuus	65
8.7 Turvallisuus	69
9 Yhteenveto.....	71
Lähteet.....	73

Lyhenteet

P2P	Vertaisverkko (peer to peer)
IoT	Esineiden internet (Internet of Things)
J	Joule
W	Watti
kW	Kilowatti
kWh	Kilowattitunti
GWh	Gigawattitunti
TWh	Terawattitunti
V	Voltti
kV	Kilovoltti
GDPR	Yleinen tietosuoja-asetus (General Data Protection Regulation)

Konsensusmekanismien lyhenteet:

PoW	Proof-of-work
PoA	Proof-of-authority
PoS	Proof-of-stake
Pol	Proof-of-importance
PoL	Proof-of-luck
DPoS	Delegated Proof-of-stake
LPoS	Leased Proof-of-stake
pBFT	Practical Byzantine Fault Tolerance
dBFT	Delegated Byzantine Fault Tolerance

1 Johdanto

Energia-alan maailmanlaajuisia haasteita ovat tällä hetkellä energiankulutuksen kasvun hidastaminen, ympäristövaikutusten hillintä ja energiamarkkinoiden vapautumisen aiheuttamat vaikutukset (Holechek, Geli, Sawalhah & Valdez 2022, 1–4). Energijärjestelmämme hajautuminen, jossa entisen keskitetyn tuotannon tilalle tulee yhä enemmän pienemmän mittakaavan tuotantoa, tuo omat teknologiset haasteensa (*Suomen energiavisio 2030* 2002, 4,23). Hajautetun energiantuotannon lisääntyminen yhdessä liikenteen sähköistymisen kanssa edellyttää verkon älykkyyden, koordinoinnin ja häiriönsietokyvyn parantamista (Di Silvestre, Favuzza, Riva Sanseverino & Zizzo 2018, 1; O’Dwyer, Pan, Acha & Shah 2019, 1). Energiamurros on monisyinen ilmiö, jossa digitaalisten teknologioiden rooli kasvaa merkittävästi muutosprosessin edetessä. Lohkoketjuteknologian tuleva vaikutus tässä kehityksessä on kuitenkin edelleen epävarma. Tieteellisissä ja poliittisissa keskusteluissa korostuu kansalaisten osallistumisen merkitys energiamurrokseen ja samalla painotetaan energiademokratian sekä aktiivisen energiakansalaisuuden tarpeellisuutta. (Wahlund & Palm 2022, 1; Ahl, Goto, Yarime, Tanaka & Sagawa 2022, 9.)

Uusiutuvan energian tuotannon epätasaisen luonteen aiheuttamien ongelmien ratkaiseminen on haastava kysymys. Lohkoketjuteknologia edistää tuotannon hajauttamista sekä lisää luottamusta ja vähentää tiedon manipulointimahdollisuuksia. Lohkoketjuteknologian soveltaminen uusiutuvan energian alalla voi edelleen standardoida ja parantaa kaupankäyntitapoja, ohjata uusiutuvan energian hyväntahtoista kehitystä ja ratkaista energian tuotantoon usein liittyvän yhteiskunnan tuen ongelmakohtia. (Cui, Feng & Wang 2023, 17.) Vaikka lohkaketjuteknologia tarjoaa paljon hyviä mahdollisuuksia hajautetun energian kaupankäyntiin, liittyy siihen kuitenkin yksityisyyden suojaan liittyviä riskejä ja tehokkuusongelmia, jotka voivat haitata sen soveltamista energiakaupassa (Dong ym. 2022, 1).

Työn tilaaja on Karelia-ammattikorkeakoulun Älykkäät energiayhteisöt-hanke, jonka tavoitteena on luoda uusia energiatehokkaita, digitaalisia ja teknologisia, menetelmiä ja palveluita tulevaisuuden energiayhteisöille. Hankkeessa pyritään

luomaan digitaalisia kaksosia energiayhteisöistä ja niiden sisällä toimivista lohkoketjutekniikkaa hyödyntävistä vertaisverkoista (taloyhtiöt, pientalot ja yritykset kohteina). Mallien avulla on tarkoitus kehittää energiayhteisöiden sisäistä toimintaa ja energiakauppaa. Digitaalisten kaksosten toteuttamiseen tarvitaan toimiva ja mahdollisimman yksinkertaisesti sovellettava lohkoketjuteknologia, jonka valintaa tällä työllä pyritään helpottamaan.

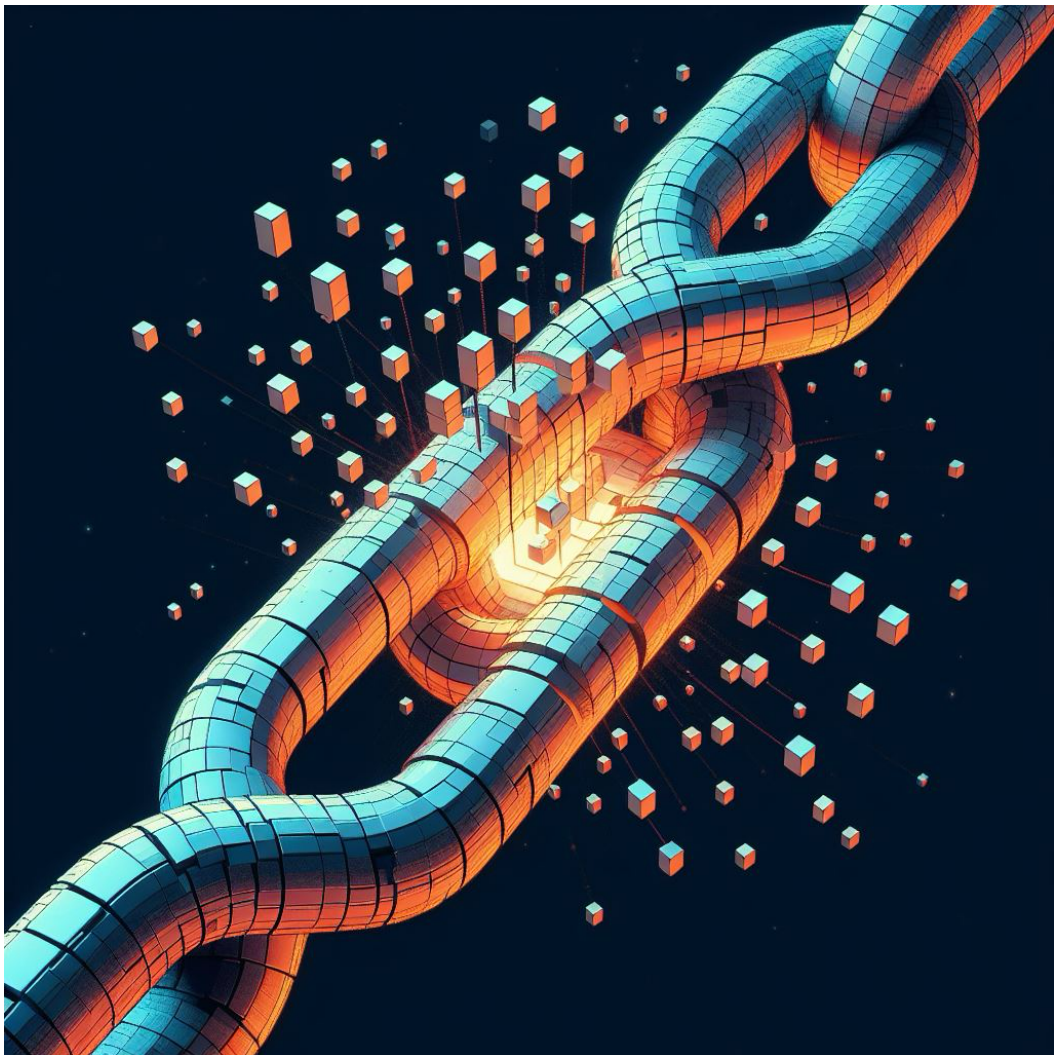
Tämä työ pyrkii kuvailevan kirjallisuuskatsauksen kautta antamaan vastauksia siihen, kuinka lohkoketjuja on hyödynnetty energiayhteisöissä ja erilaisissa energiaverkoissa, mitä teknologisia vaihtoehtoja on saatavilla ja miten ne voisivat soveltua hankkeen pilotointeihin. Kuvailevaa kirjallisuuskatsausta varten aineiston valinta tehdään eksplisiittisesti ja aineistonvalinnassa hyödynnetään manuaalisten hakujen, lähdeluetteloiden ja tietokantojen lisäksi tekoälypohjaista perplexity hakukonetta. Tekoälyä hyödynnetään myös työn kuvituksessa ja työ sisältää neljä DALL-E 3 tekoälyn tuottamaa kuviota. Työssä ei käsitellä syvällisesti lohkoketjujen varsinaista teknologiaa ja toimintatapaa. Työ keskittyy enemmän energiayhteisöiden energiavirtojen hallinnan lohkoketjusovelluksiin, sekä niiden mahdollisuuksiin, haasteisiin ja käyttökelpoisuuteen Älykkäät energiayhteisöt-hankkeen toimenpiteissä.

2 Lohkoketjut

Lohkoketju (Kuvio 1) esiteltiin ensimmäisen kerran vuonna 2008, jolloin Bitcoin julkaistiin (Nakamoto 2008, 1–9). Vuonna 2013 esiteltiin ensimmäisiä ajatuksia muistakin lohkoketjua hyödyntävistä sovelluksista, jotka eivät olleet vain krypto-rahaa. Vuonna 2015 julkaistiin tutkimuksen ja kokeiluiden jälkeen ensimmäinen älykkäisiin sopimuksiin kykenevä ohjelmoitava lohkoketju Ethereum. Samanlaisesti heräsi myös laajempi kiinnostus lohkoketjuja kohtaan ja useita uusia projekteja, kuten Everledger, Quorum ja Corda, julkaistiin. Uusien monoliittisten

ja moniketjuisten arkkitehtuurien, kuten Solana, Avalanche ja Polkadot, kehitys-työ kiihtyi vuonna 2018. Tällä hetkellä suurin kehitys tapahtuu sovellusten, kuten ”decentralized finance” (DeFi) ja ”non-fungible tokens” (NFT) parissa. (Bashir 2023, 2.)

Lohkoketjuteknologian tutkimusta, kehittämistä ja standardointia varten on perustettu myös erilaisia konsortioita, kuten Enterprise Ethereum Alliance (EEA) ja Hyperledger. Lisäksi Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ja International Standards Organization (ISO) ovat myös pyrkivät standardoimaan lohkoketjuteknologian eri osa-alueita. (Bashir 2023, 3.)



Kuvio 1. Tekoälyn näkemys lohkoketjusta (DALL-E 3 tekoälyllä luotu kuva).

2.1 Keskeiset lohkoketjut

Kolme yleisintä ja laajasti käytettyä lohkoketjua ovat Bitcoin, Ethereum ja Hyperledger. Bitcoin oli ensimmäinen laajalle levinnyt lohkoketju, jonka kehitti henkilö tai ryhmä nimeltä Satoshi Nakamoto vuonna 2009. Se käyttää transaktioiden varmistamiseen ja lohkoketjun ylläpitoon "Proof of Work" -menetelmää (PoW). Bitcoinissa on "UTXO"-järjestelmä, joka auttaa seuraamaan käyttämättömiä transaktiotuottoja, parantaen sen turvallisuutta ja läpinäkyvyyttä. (Nakamoto 2008.) Yleisimmät käytössä olevat lohkoketjut ja niiden ominaisuudet ovat listattu luvussa 2.5 (Taulukko 1).

Ethereum on erityisen tunnettu sen mahdollisuudesta toteuttaa älysopimuksia. Älysopimukset ovat itseään täytyviä sopimuksia, jotka aktivoituvat automaattisesti, kun niiden ehdot täyttyvät. Ethereum siirtyi PoW konsensusmenetelmästä energiatehokkaampaan "Proof of Stake" -menetelmään (PoS) vuonna 2022 (Pavloff ym. 2022, 1; Wood 2024, 7), mikä vähensi merkittävästi sen energiankulutusta ja paransi transaktioiden nopeutta. (Bashir 2023, 247; Buterin 2013, 41.)

Hyperledger lohkoketju eroaa edellisistä siinä, että se on suunnattu erityisesti yrityskäyttöön. Sitä hallinnoi Linux Foundation ja se on suosittu monilla sektoreilla, kuten rahoitus- ja toimitusketjuissa. Toisin kuin julkiset lohkoketjut, kuten Bitcoin ja Ethereum, Hyperledger keskittyy yksityisiin, luvanvaraisiin verkostoihin, mikä tarjoaa käyttäjille suuremman yksityisyyden ja tehokkuuden. (Bashir 2023, 443; Cachin 2016, 1.)

Muita huomionarvoisia lohkoketjuja ja kryptovaluuttoja ovat Litecoin, joka tarjoaa nopeampia transaktioaikoja, ja Namecoin, joka mahdollistaa verkkotunnusten rekisteröinnin. Layer 1 -lohkoketjut, kuten Ethereum, Solana ja Avalanche, ovat perusrakenteita, jotka tukevat monenlaisia sovelluksia ja toimivat pohjana Layer 2 -ratkaisuille. Nämä Layer 2 -ratkaisut, kuten Arbitrum ja Optimism,

rakennetaan Layer 1 -lohkoketjujen päälle ja ne parantavat alkuperäisten ketjujen skaalautuvuutta ja nopeutta käyttäen hyväksi teknologioita, kuten rolluppeja, jotka nopeuttavat ja tehostavat transaktioiden käsittelyä. (*List of 64 Blockchains (2024) - Alchemy 2024.*)

2.2 Määritelmä

Johansson, Eerola, Innanen ja Viitala (2019, 22) määrittelevät lohkoketjuteknoologiaa kansantajuisesti seuraavasti:

Lohkoketju on tapa tallentaa transaktioita eli tapahtumia niin, että kaikki lohkoketjun käyttäjät ovat aina samaa mieltä siitä, mitä tapahtumia on tapahtunut ja missä järjestyksessä. Kyseessä on eräänlainen tietokanta, johon voidaan tallentaa tietoja, joita ei enää tallentamisen jälkeen voida muuttaa vaan joiden perään voidaan ainoastaan kirjata uusia tietoja.

Lohkoketju on jatkuvasti kasvava, turvallinen ja jaettu tallennusjärjestelmä, jossa jokaisella tietojen käyttäjällä on kopio tallenteista. Niitä voidaan päivittää vain, jos enemmistö transaktioon eli tapahtumaan osallistuvista osapuolista hyväksyy päivityksen (Bashir 2023, 11; Galici ym. 2021, 2). Asia voidaan ilmaista myös niin, että lohkoketjun julkisen tietokanan luotettavuutta takaaman ei tarvita ihmisten ylläpitämää instituutiota tai järjestöä (Johansson ym. 2019, 25). Luottamuksesta ja tietojen muuttumattomuudesta tässä vertaisverkkopohjaisessa hajautetussa pääkirjassa, huolehtii kryptografinen suojaus. Suojauksessa käytetään epäsymmetristä salausta sekä hash-funktiota tietojen eheyden ylläpitämiseen. Tietojen eheyttä parantaa itse lohkoketjun periaate, jonka mukaan tapahtumatiedot tallennetaan lohkoihin, jotka ovat taas ketjutettu hash-osoittimien avulla. (Borkovcová, Černá & Sokolová 2022, 1; Boumaiza & Sanfilippo 2024, 9.)

Lohkoketju on pohjimmiltaan kokoelma eri teknologioita (Kuvio 2), jotka yhdessä muodostavat toiminnallisen kokonaisuuden (Johansson ym. 2019, 29). Tämä kokonaisuus toimii hajautettuna pääkirjana, joka voi olla joko keskitetty tai epäkeskitetty. Lohkoketju on luonteeltaan epäkeskitetty alusta, jossa yhdistyvät sekä hajautetun (distributed) että epäkeskitetyn (decentralized) toimintamallin piirteet. Se on suunniteltu niin, että loppukäyttäjät kokevat sen yhtenäisenä

loogisena alustana. Lohkoketju on viestejä välittävä hajautettu järjestelmä, joka koostuu solmuiksi kutsutuista prosesseista ja niiden välisistä viestintäkanavista, joiden kautta solmut kommunikoivat keskenään. (Bashir 2023, 4.)



Kuvio 2. Lohkoketju on lukuisista yhteensopivista palasista koostuva kokonaisuus. (DALL-E 3 tekoälyllä luotu kuva).

Hajautettu järjestelmä on laskentajärjestelmä, jossa kaksi tai useampi solmupiste työskentelee koordinoitusti toistensa kanssa yhteisen lopputuloksen saavuttamiseksi. Epäkeskitetty järjestelmä on verkkotyyppi, jossa solmut eivät ole riippuvaisia yhdestä pääsolmusta, vaan valvonta on jaettu useiden solmujen kesken. Tämä vastaa mallia, jossa organisaation jokainen osasto vastaa omasta tietokantapalvelimestaan. Tässä mallissa valta ei siirry keskitetylle palvelimelle vaan jaetaan alaosastoille, jotka hallinnoivat omia tietokantojaan. Merkittävä innovaatio epäkeskitetyssä toimintamallissa on hajautettu konsensus. Tällä Bitcoinin myötä tulleella ominaisuudella käyttäjä voi sopia jostakin asiasta konsensusalgoritmin avulla ilman, että tarvitaan keskitettyä, luotettavaa kolmatta osapuolta, välittäjää tai palveluntarjoajaa. (Bashir 2023, 31.)

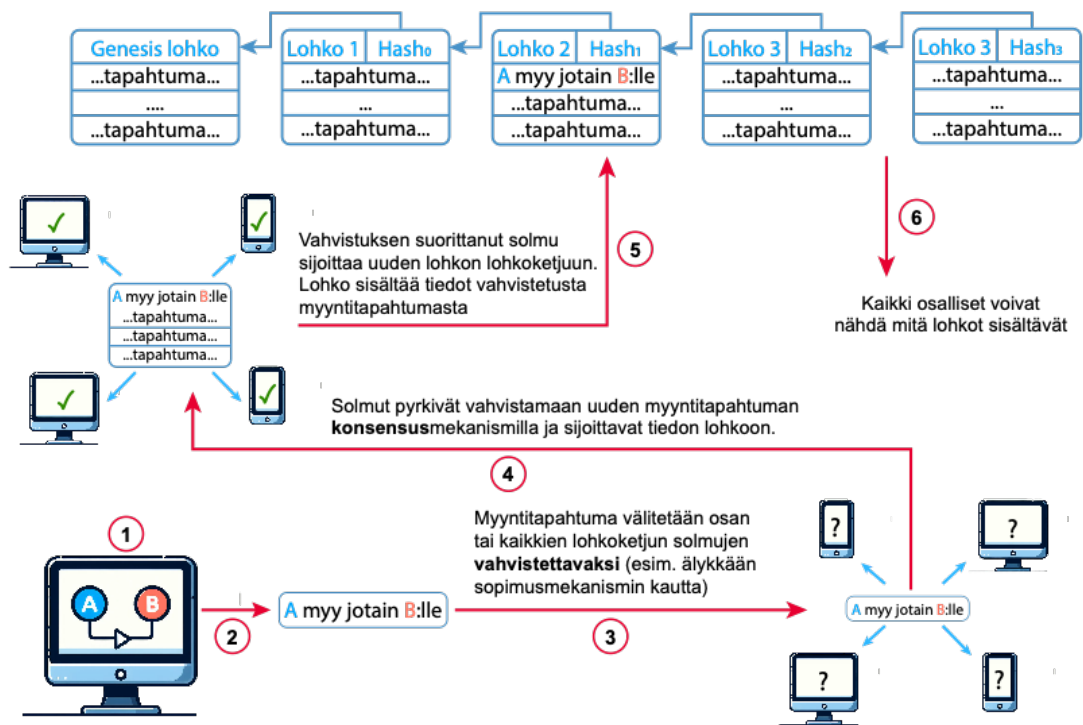
Lohkoketjua voidaan muokata vain erittäin harvoissa tapauksissa, kuten tilanteissa, joissa suurin osa verkon jäsenistä hyväksyy muutoksen. Lohkoketjussa olevien tietojen muuttamiseen voi olla myös joitakin perusteltuja syitä sen jälkeen, kun ne on lisätty lohkoketjuun. Näitä ovat muun muassa EU Tietosuojasetuksen artikloissa 12, 17 ja 19 määritellyt "oikeus tulla unohdetuksi" tai "oikeus tietojen poistamiseen" tilanteet ((EU) 2016/679 2016). Oikeus tulla unohdetuksi on oikeus, jonka mukaan henkilöä koskevat henkilötiedot on poistettava internetrekistereistä, organisaation rekistereistä ja muista niihin liittyvistä palveluista. Nämä ovat kuitenkin yksittäistapauksia, jotka on käsiteltävä erikseen ja jotka edellyttävät erillisiä teknisiä ratkaisuita. (Bashir 2023, 12.)

Lohkoketjua voidaan käyttää lukemattomilla tavoilla liike-elämässä ja muilla aloilla (H. Li, Xiao, Yin & Wu 2021, 1). Teknologian kehittyessä on yhä useampia aloja, jotka voivat hyötyä tästä teknologiasta lisäämään tehokkuutta ja läpinäkyvyyttä tai vähentämään toimintojen kustannuksia. Lohkoketjuteknologian käyttöönoton tehokkuuteen vaikuttavat yrittäjien yksilölliset kyvyt ja ympäristön vaikutukset. (Nuryyev ym. 2020, 12.) Älykkäät ja automatisoidut sopimusprotokollat voivat yksinkertaistaa sopimista ja kaupankäyntiä (Cong & He 2019, 37).

Lohkoketjujen käyttäminen perinteisten rahoitusverkkojen tapaan, jolloin niiden tulee pystyä käsittelemään suuria transaktiomääriä, on johtanut lohkoketjujen 2-kerrosarkkitehtuurien ja moniketjuarkkitehtuurien kehittämiseen (layer 2 and multi-chain architectures). Edistysaskeleet nollatietotodisteiden (zero-knowledge proofs) käyttämisen mahdolliseksi, auttoi huomattavasti 2-kerrosratkaisujen toteuttamisessa. 2-kerrosratkaisujen tutkimukseen ja kehitystyöhön panostetaan tällä hetkellä voimakkaasti ja monia mekanismeja, kuten Plasma, rollups, sidechains, Lightning Network, on otettu käyttöön. (Bashir 2023, 2.)

Lohkoketju tarjoaa innovatiivisen lähestymistavan tietojen tallentamiseen, transaktioiden toteuttamiseen, toimintojen suorittamiseen ja luottamuksen luomiseen avoimessa ympäristössä. Lohkoketjua pidetään teknologisenä läpimurtona kryptografiassa ja kyberturvallisuudessa ja sitä käytetään kryptovaluutoissa, älykkäissä sopimuksissa, esineiden internetissä ja älykkäissä verkoissa.

Vaikka lohkoketjut ovat kohdanneet viime vuosina lisääntyvää kiinnostusta sekä akateemisessa maailmassa että teollisuudessa, on niiden käyttöönotossa kuitenkin pidettävä mielessä turvallisuus- ja yksityisyysseikat. (Zhang, Xue & Liu 2019, 1.)



Kuvio 3. Tapahtuman validoimisen ja konsensuksen muodostuminen ennen lohkoketjulle lisäämistä. Mukailtu alkuperäisestä kuvioista (Di Silvestre ym. 2020, 4).

2.3 Toimintatapa

Kuvio 3 esittää prosessin, jossa uusi transaktio lisätään lohkoketjuun. Prosessi on jaettu kuuteen vaiheeseen: 1. Tapahtumapyyntö; 2. Tapahtuman uusi pyyntö lähetetään verkkoon; 3. Tapahtuma lähetetään tapahtumien validoinnista vastaaville solmuille; 4. Jos tapahtuma on kelvollinen, validoiva solmu lisää uuden tapahtuman uuteen lohkoon, joka sisältää muita kelvollisia tapahtumia ja kilpailee lohkon validoinnista (konsensusprosessi); 5. Uuden lohkon validoinnin jälkeen onnistunut validoija voi lisätä uuden lohkon ketjuun; 6. Kun uusi lohko on osa ketjua, kaikki osallistujat näkevät sen sisällön. (Di Silvestre ym. 2020, 4.)

2.4 Soveltaminen

Lohkoketjun merkittävyys eri sovelluksissa syntyy siitä, että sen avulla ihmiset ja organisaatiot voivat käydä kauppaa ilman, että heidän tarvitsee luottaa toisiinsa. Heillä on mahdollisuus käydä kauppaa esimerkiksi rahalla ilman pankkien tai minkään muun välittäjäorganisaation osallisuutta. Energiasektorilla kauppaa voidaan käydä rahan sijaan energialla. (Foti & Vavalis 2021, 1–2.)



Kuvio 4. Lohkoketjuteknologioiden mahdollisuudet kestävyystavoitteiden saavuttamisessa. Mukailtu alkuperäisestä kuviosta (Fulli, Kotsakis & Nai 2021, 4).

Lohkoketjujen käyttömahdollisuudet ja jo olemassa olevien sovellustapojen määrä on valtava (Feger 2024). Lohkoketjuteknologia ja sen käyttöönotto vaikuttaa organisaation eri osiin ja tulee muuttamaan organisaatioiden vakiin-

tunutta toimintaa ja prosesseja. Lohkoketjujen soveltamisessa energia-alalle ei ole kyse vain teknologian soveltamisesta, vaan uudenlaisen konseptin omaksumisesta (Borkovcová ym. 2022), joka johtaa merkittäviin muutoksiin koko energia-teollisuudessa, tuoden esille moninaisia haasteita (Cai, Dong, Chen & Gong 2022, 1–2). Lohkoketju voi olla osa ratkaisua energiamurroksen haasteisiin ja auttaa sekä yrityksiä tavoittelemaan kannattavuuttaan energiamarkkinoilla että riippumattomia käyttäjäyhteisöjä työskentelemään yhteisen energiahyödyn eteen. (Foti & Vavalis 2021, 1.) Mikäli lohkoketjuteknologioiden energian kulutus voidaan pitää kurissa, voivat ne osaltaan auttaa saavuttamaan EU:n vuodeksi 2050 asettamia ilmastoneutraaliutta, energiakestävyyttä ja kiertotaloutta koskevat tavoitteita (Kuvio 4) (Fulli ym. 2021, 21–22).

2.5 Älykkäät sopimukset

Vaikka älykkäitä sopimuksia tai älysopimuksia on hyödynnetty viime aikoina, ajatus esitettiin jo kauan sitten. Lähes kolmekymmentä vuotta sitten ajatuksen älykkästä sopimuksesta ilmaisi kryptografitutkija Nick Szabo (Szabo 1997). Tarvittavaa teknologiaa ja protokollaa ei kuitenkaan ollut tuolloin saatavilla ja ajatus jäi vain teoreettiseksi käsitteeksi. Nykyään lohkoketjuteknologian kehittymisen myötä älykkäistä sopimuksista on tullut realismia (Rouhani & Deters 2019, 50759).

Älysopimus on ohjelmoitava transaktio, joka suorittaa monimutkaisen tehtävän automaattisesti ja tallentaa sen lohkoketjuun. Älysopimus on tehnyt lohkoketjusta kryptovaluuttoja laajemman teknologian, jota voidaan soveltaa useisiin sovelluksiin, kuten terveydenhuoltoon, esineiden internetiin, toimitusketjuun, digitaaliseen identiteettiin, liiketoimintaprosessien hallintaan ja muihin. (Rouhani & Deters 2019, 50759.)

Lohkoketju	Konsensus	Julkinen vai luvanvarainen	Älysopimus tuki	Älysopimus kieli	Sisäänrakennettu kryptoraha
Bitcoin	PoW	Julkinen	Kyllä (myös sivuketjut)	Ivy, RSK, BitML	Kyllä (Bitcoin)
Ethereum	PoW ja PoS	Molemmat	Kyllä	Solidity, Flint, SCILLA	Kyllä (Ether)
Hyperledger Fabric	pBFT	Luvanvarainen	Kyllä	Go, Node.js, Java	Ei
Neo	dBFT	Molemmat	Kyllä	C#, VB.Net, F#, Java, Kotlin, Python	Kyllä (NEO)
Nem	Pol	Molemmat	Kyllä	Provide template	Kyllä (XEM)
Quorum	Raft-pohjainen ja Istanbul BFT	Luvanvarainen	Kyllä	Solidity	Ei
Cardano	PoS	Julkinen	Kyllä	Plutus	Kyllä (ADA)
EOS	DPoS	Julkinen	Kyllä	C++	Kyllä (EOS)
R3 Corda	Plugin:eilla	Luvanvarainen	Kyllä	Kotlin	Ei
Tendermint	BFT	Luvanvarainen	Kyllä	Mikä tahansa	Ei
Waves	LPoS	Julkinen	Kyllä	RIDE	Kyllä (Waves)

Taulukko 1. Lohkoketjut ja niiden älysopimusten ohjelmointikielät (Rouhani & Deters 2019, 50761).

Älysopimus on osa huipputeknologiaa, jota voidaan käyttää lohkoketjujen ekosysteemissä oikeudellisesti sitovan sopimuksen ehtojen mekaaniseen neuvottelemiseen, toteuttamiseen ja täytäntöönpanoon (Rouhani & Deters 2019, 1). Älysopimukset toteutetaan erikoistuneilla ohjelmointikielillä (Taulukko 1). Suosituin näistä ohjelmointikielistä on Solidity, jota voidaan käyttää Ethereum:in ja Quorum:in älysopimusten ohjelmointiin (Rahut, Tanvir, Rahman ja Akhter 2019, 215; Rouhani & Deters 2019, 50763). Älysopimusten mahdollisuuksia käsitellään kappaleessa 4.4.

3 Hajautetut energiajärjestelmät

Perinteisesti voimalaitokset ovat olleet suuria, keskitettyjä yksiköitä (Kuvio 5). Nykyisen suuntauksen myötä ollaan menossa kohti hajautetumpaa energiantuotantoa, jossa energian muuntoyksiköt sijaitsevat lähellä energiankuluttajia ja suuret yksiköt korvataan pienemmillä. Hajautettu energiajärjestelmä voi olla tehokas, luotettava ja ympäristöystävällinen vaihtoehto perinteiselle energiajärjestelmälle. (Alanne & Saari 2006, 1.) Energiajärjestelmien hajauttaminen tarjoaa mahdollisuuden parantaa häiriönsietokykyä, käyttäjien yksityisyyttä ja demokratisoida energiajärjestelmiä. Lohkoketjuteknologian käyttöönotto on merkittävä teknologinen ratkaisu näiden tavoitteiden saavuttamiseksi. (Choobineh, Arab, Khodaei & Paaso 2022, 1.)



Kuvio 5. Tekoällyn näkemys keskitetystä energiajärjestelmästä (DALL-E 3 tekoälyllä luotu kuva).

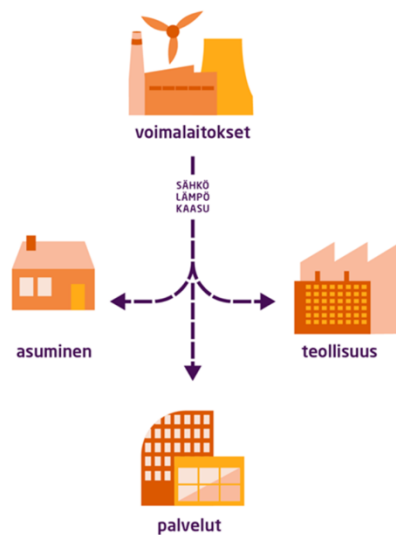
Perinteisille energiamarkkinoille on aina ollut ominaista selkeä ero energian tuottajien ja kuluttajien välillä. Tuottajat, kuten voimalaitokset, tuottavat sähköä ja myyvät sitä kuluttajille välittäjinä toimivien energialaitosten kautta. Hajautettu energiantuotanto, erityisesti kotitalouksien ja kaupallisten aurinkosähkösovellusten kautta, on kuitenkin murentamassa tätä perinteistä mallia. Hajautetulla energiantuotannolla (Kuvio 6) tarkoitetaan sähkön tuotantoa pienimuotoisilla järjestelmillä, kuten kattojen aurinkopaneeleilla, jotka on asennettu kuluttajien tiloihin tai niiden läheisyyteen. Tämä on synnyttänyt aktiivisen kuluttajan (prosumer) käsitteen - tuottajan ja kuluttajan risteymän - joka on sekä energian tuottaja että kuluttaja. (Alanne & Saari 2006, 1; Boumaiza & Sanfilippo 2024, 9.)



Kuvio 6. Tekoälyn näkemys hajautetusta energiajärjestelmästä (DALL-E 3 tekoälyllä luotu kuva).

Aktiiviset kuluttajat voivat tuottaa itse sähköä ja myydä ylimääräisen energian takaisin verkkoon. Tämä tuottajien ja kuluttajien välisten rajojen hämärtyminen on muuttanut energiamarkkinoita ja antanut kuluttajille uuden roolin älykkäillä ja joustavilla energiamarkkinoilla (Kuvio 7). Tämän vuoksi tarvitaan uusia teknologioita, kuten lohkoketjuteknologiaa, jotka voivat helpottaa näiden aktiivisten kuluttajien osallistumista energiamarkkinoille turvallisella ja kustannustehokkaalla tavalla. (Boumaiza & Sanfilippo 2024, 1–2.)

Perinteinen energiajärjestelmä



Älykäs ja joustava energiajärjestelmä



Kuvio 7. Perinteisen ja hajautetun älykkään energiaverkon erot (Energiateollisuus 2024).

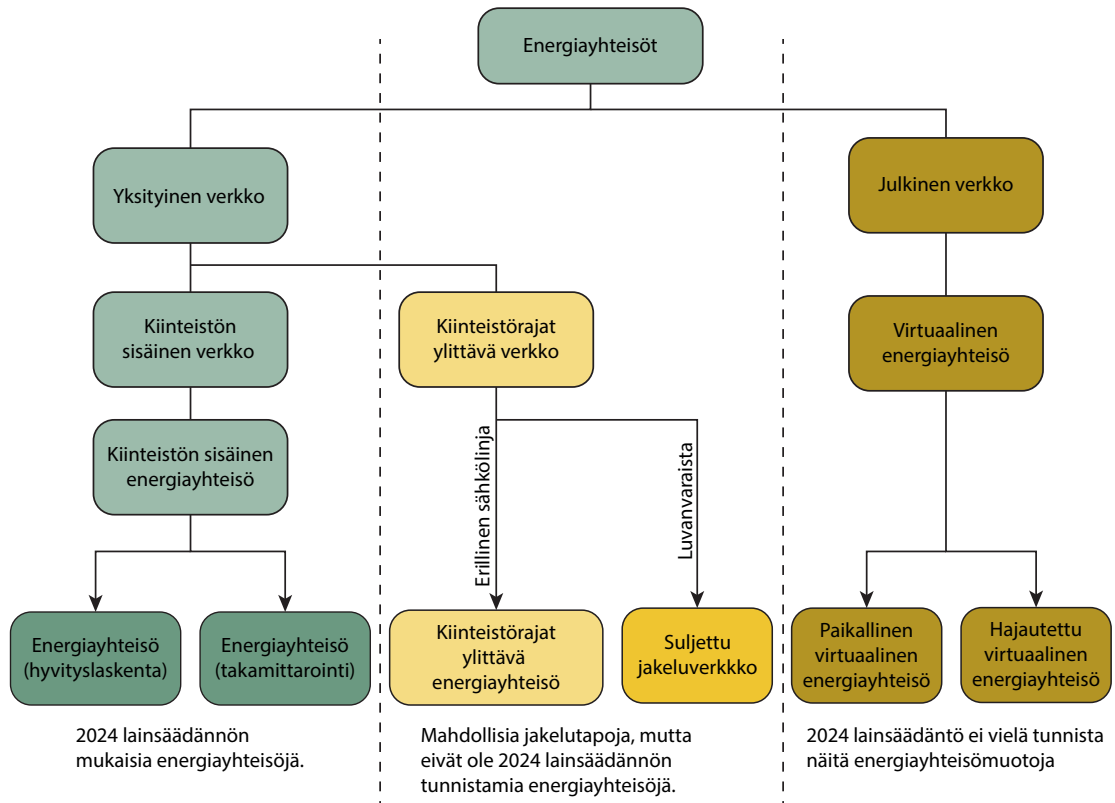
Todella mielenkiintoiset muutokset, jotka ohjaavat kehitystä sähköalalla, tapahtuvat verkon reunoilla, missä kuluttaja kohtaa verkon, kilpailee sen kanssa, häiritsee sitä ja toimii yleisesti ottaen tavoilla, jotka koettelevat hänen perinteistä toimintatapaansa. Tuotanto on keskeytyneempää uusiutuvien energialähteiden osuuden kasvun vuoksi, mutta energian siirrosta ja jakelusta tulee helpommin hallittavia ja vikasietoisempia verkon digitalisoitumisen vuoksi. Kuluttajien kaksoisroolin vuoksi kuormista tulee vuorovaikutteisempia ja dynaamisempia. (Foti & Vavalis 2021, 2.)

3.1 Energiayhteisöt

Energiayhteisöt ovat keino, jolla pyritään lisäämään hajautettua uusiutuvan energian tuotantoa. Energiayhteisöt tuovat energiajärjestelmäämme jakamistalouden käsitteen, mahdollistaen energian pientuottajien ja kuluttajien aktiivisemmän osallistumisen kestäväan sähkötuotantoon. Lisäämällä kiinteistöjen omaa energian tuotantoa, energiayhteisöt voivat parantaa kiinteistöjen energiaomavaraisuutta ja lisätä energiaturvallisuutta. (Blomqvist, Kuittinen & Räsänen 2023, 61–65.)

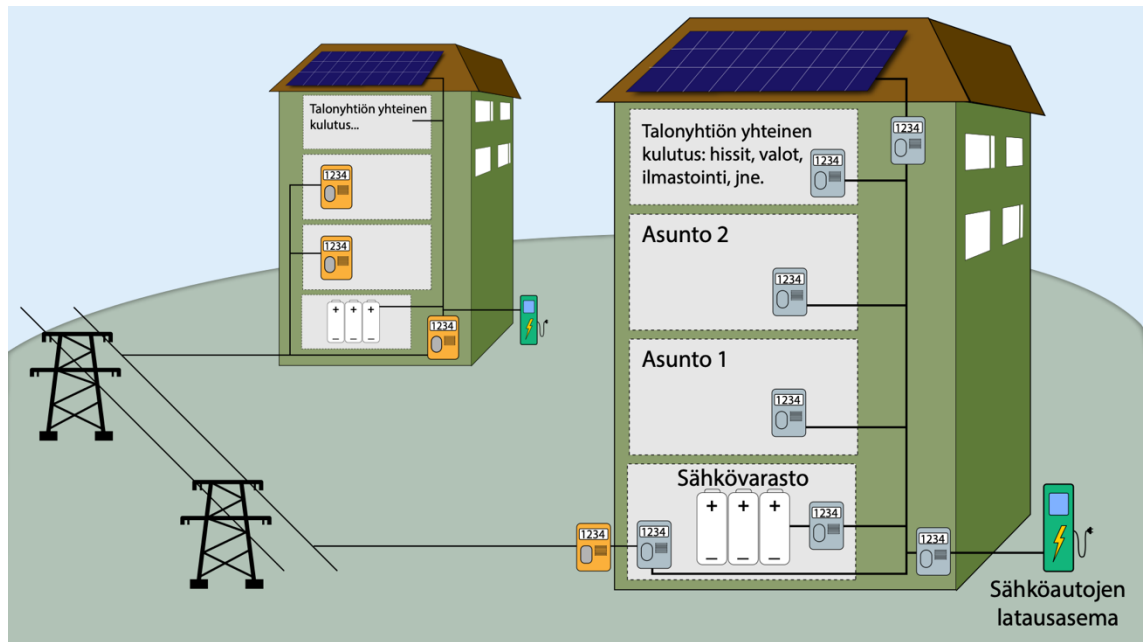
Energiayhteisöt ovat yhteenliittymiä, joiden jäsenet hyödyntävät yhteisiä energiasursseja, kuten esimerkiksi aurinkopaneeleiden tuottamaa sähköä. Ennen kuin energiayhteisön muodostaminen oli mahdollista, mitoitettiin esimerkiksi kerros- ja rivitalojen aurinkovoimalat niin pieniksi, että suurin osa tuotannosta pystyttiin kuluttamaan rakennuksen yhteisissä tarpeissa. Koska energiayhteisö pystyy jakamaan tuotetun energian myös jäsenten omaan kulutukseen, eli esim. yksittäisten asuntojen valaistukseen ja ruuan laittoon, tulee suurempien paneelienttien asentaminen taloudellisesti kannattavammaksi.

Energiayhteisö-käsite esiteltiin ensi kerran EU-tasolla vuonna 2016, osana puhtaan energian pakettia. Energiayhteisöt määritellään EU-direktiivissä (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2019/944 2019). Energiayhteisö on laaja käsite, josta Työ- ja elinkeinoministeriön työryhmä on tunnistanut lukuisia erilaisia (Kuvio 8) energiayhteisöiden toimintamalleja (Energiayhteisötyöryhmä 2023, 14–25). Tällä hetkellä Suomessa on kuitenkin vain mahdollista toteuttaa paikallinen, kiinteistön sisäinen energiayhteisö (Kuvio 9) (Valtioneuvoston asetus sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta (767/2021) 2021). Kiinteistöjen sähköntuotantoa on mahdollista toteuttaa myös välittömästi kiinteistön ulkopuolella (Kuvio 10) sijaitsevalla pienmuotoisella sähköntuotannolla (Sähkömarkkinalaki 588/2013 2013), mutta nykyinen lainsäädäntö ei tunnista tällaista menettelyä energiayhteisöksi (Pylväläinen 2022, 51–52).

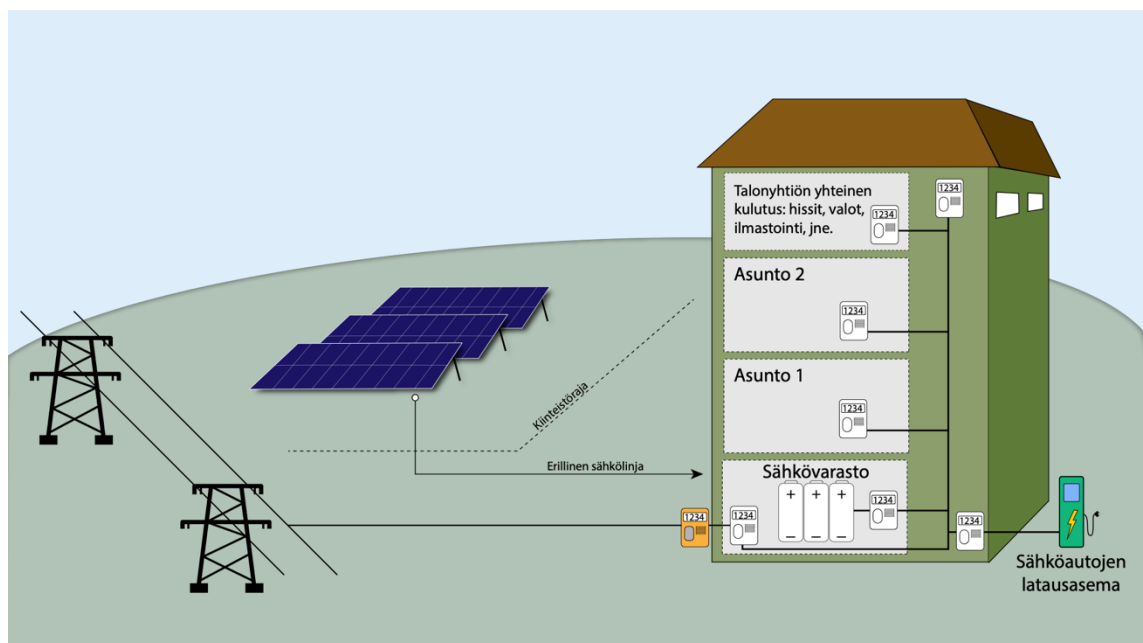


Kuvio 8. Tunnistetut energiayhteisömuodot ja niiden toteuttamismahdollisuudet vuoden 2024 lainsäädännön mukaan (Energiayhteisötyöryhmä, 2023, 12; Sähkömarkkinalaki 588/2013, 2013; Valtioneuvoston asetus sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta (767/2021), 2021).

Sähkömarkkinadirektiivissä (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2019/944 2019) on määritelty kansalaisten energiayhteisö oikeushenkilönä, joka voi vapaaehtoisesti mm. tuottaa, jaella, varastoida ja energiaa ja siihen liittyviä palveluita. Uusiutuvan energian yhteisön määritelmä löytyy EU direktiivistä 2018/2001 ja näille molemmille on yhteistä, että osallistumisen on oltava vapaaehtoista, pääasiallinen tarkoitus ei ole rahallisen voiton tuottaminen, eikä suuret yritykset voi osallistua niihin (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/2001 2018).



Kuvio 9. Kiinteistön sisäinen energiayhteisö takamittaroinnilla. Oikealla olevassa kiinteistössä paneelien tuottama sähkö jaetaan kaikkien yhteisön jäsenten kesken ja kulutusta seurataan kiinteistön omistamalla asuntokohtaisilla sähkömittareilla. Vasemmalla oleva kiinteistö ei ole vielä perustanut energiayhteisöä ja sähköä käytetään vain kiinteistön yhteisissä kulutuskohteissa.



Kuvio 10. Kiinteistörajat ylittävä energiayhteisö. Sähkön tuotanto on sijoitettu viereiselle kiinteistölle ja tuotettu sähkö johdetaan erillisellä linjalla kiinteistöön jaettavaksi yhteisön jäsenten kesken.

Sähkön pienimuotoinen tuotanto kiinteistöjen yhteydessä on tuonut sähkömarkkinaan runsaasti kuluttajia, jotka myyvät osan tuotannostaan yleiseen valtakunnan sähköverkkoon. Energiayhteisöt kuuluvat myös tähän aktiivisten asiakkaiden ryhmään. Sähkömarkkinadirektiivi (EU) 2019/994 määrittelee aktiivisen asiakkaan, eli ”prosumer:in” kuten heitä usein nimitetään, seuraavasti:

Loppuasiakas tai yhdessä toimivien loppuasiakkaiden ryhmä, joka kuluttaa tai varastoi omissa tiloissaan rajatulla alueella tai jäsenvaltion niissä salliessa muissa tiloissa tuotettua sähköä tai joka myy itse tuottamaansa sähköä tai osallistuu joustoa tai energiatehokkuutta koskeviin järjestelyihin, jos tällainen toiminta ei ole sen ensisijaista kaupallista tai ammatillista toimintaa.

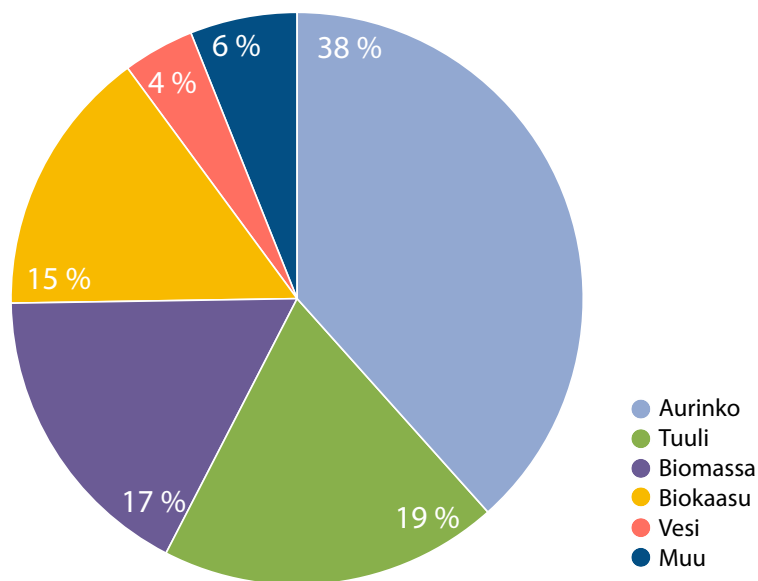
Lisäksi aktiiviset asiakkaat on mainittu ja osittain tarkemmin määritelty EU direktiivin mukaisesti kansallisessa lainsäädännössä valtioneuvoston asetuksessa sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta (Valtioneuvoston asetus sähköntoimituksista 1133/2020 2020), sekä komission ehdotuksessa koskien unionin sähkömarkkinoiden rakenteen parantamista (COM(2023) 148 Final 2023). Aktiivisen kuluttajan malli antaa yksittäisille ihmisille enemmän valtaa energian tuotantoon ja kulutukseen, mikä voi johtaa kustannussäästöihin ja energiaomavaraisuuden lisääntymiseen (Kounelis ym. 2017, 36).

Energiayhteisöjen tavoitteena on auttaa kansalaisia ja julkisia toimijoita investoimaan uusiutuviin energialähteisiin ja energiatehokkuuteen. Kansalaisten osallistuminen uusiutuvia energialähteitä koskeviin hankkeisiin lisää paikallistason sosiaalisen hyväksyttävyyttä. Yhteisöjen omistamien hankkeiden avulla kansalaiset voivat rahoittaa paikallisesti hyödyllisiä investointeja. Hyödyt voivat olla esimerkiksi alueen uusiutuvien luonnonvarojen hyödyntämistä, työllisyyden lisäämistä ja polttoaineköyhyyden vähentämistä alueella. (Caramizaru & Uihlein 2020, 25.)

Uusiutuvat energialähteet soveltuvat hyvin hajautettuun ja paikalliseen tuotantoon. Yhteisöt voivat osallistua uusiutuvien energialähteiden tuotantoon syöttämällä sähköä verkkoon ja hyödyntämällä siten myyntituloja tai syöttötariffia tai jopa toimimalla yleisen sähköverkon ulkopuolisina verkkoina. EU:n Yhteisen tutkimuskeskuksen (JRC) analysoimat 24 tapaustutkimusta osoittavat, että aurinko- ja tuulivoima ovat energiayhteisöiden yleisimmät käytetyt energiantuotan-

toteknologiat (Kuvio 11). Esimerkkejä aurinkoenergia-aloitteista on saatu maista, joissa sääolosuhteet ovat suotuisat, kuten Espanjasta tai Etelä-Ranskasta. Aurinko-osuuskunnat ovat kuitenkin yleisiä myös Saksassa,

Alankomaissa ja Belgiassa, joissa poliittiset toimenpiteet, kuten syöttötariffit tai nettomittaus, ovat auttaneet laajentamaan uusiutuvien energialähteiden paikallista tuotantoa. (Caramizaru & Uihlein 2020, 25.)



Kuvio 11. Energiayhteisöiden yleisimmät käytetyt energialähteet. Mukailtu alkuperäisestä kuvioista (Caramizaru & Uihlein 2020, 25).

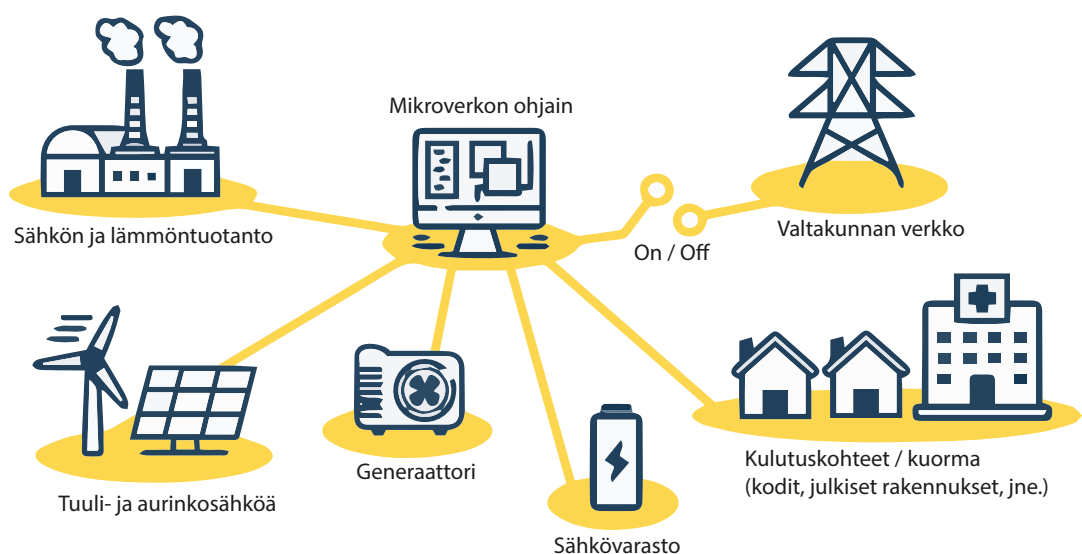
3.2 Mikroverkot

Energialalla on meneillään nopea muutos, joka koskettaa kuluttajia, tuottajia ja jakelijoita. Muutoksen ovat aiheuttaneet uudet teknologiat, uusiutuvien energialähteiden kysynnän kasvu ja erilaiset mukautuvat ekosysteemit. Aktiivisten kuluttajien energian tuotannon, siirron ja kulutuksen hallinta paranee, kun mikroverkkojen ja virtuaalivoimalaitosten kaltaiset teknologiat kehittyvät edelleen. Hajautetut energiareсурssit korvaavat keskitettyjä energiareсурsseja uusiutuvan energian, varastointijärjestelmien ja sähköajoneuvojen suosion kasvaessa. Hajautetut energiajärjestelmät, kuten mikroverkot, voivat hyötyä merkittävästi

turvallisen ja läpinäkyvän alustan energiatransaktioiden hallinnointiin tarjoavasta lohkoketjuteknologiasta. (Di Silvestre ym. 2020, 9). Älykkäät sähköverkot, mikroverkot ja virtuaalivoimalaitokset tarjoavat hajautettua ja hyvin usein uusiutuvaa energiaa. Hajautettujen energiaresurssien kasvava suosio ja helppous vievät tätä muutosta eteenpäin. (Kaif, Alam & Das 2024, 1.)

Mikroverkko on yhteen liitettyjen kuormien ja hajautettujen energiaresurssien ryhmä, joka on selkeästi määriteltyjen sähköisten rajojen sisällä ja joka toimii yhtenä hallittavana kokonaisuutena suhteessa verkkoon (Kuvio 12). Mikroverkko on perinteisesti kytkeytyneenä perinteiseen keskitettyyn sähköverkkoon (makroverkko) ja toimia synkronoituneena sen kanssa. Mikroverkot voivat myös irrottautua yleisestä sähköverkosta, jolloin ne toimivat ns. saarekkeena, ilman valtakunnan verkon synkronointia. (NASEO 2024; Ton & Smith 2012, 1.)

Hatziargyriou (2023, 1–4) on julkaisussaan vertaillut mikroverkkojen ja energiayhteisöiden eroja, yhtenäisyyksiä ja synergiamahdollisuuksia. He toteavat, että varsinkin yhteisöllisesti omistetut mikroverkot jakavat huomattavan paljon yhteneväisyyksiä energiayhteisöiden kanssa ja voivat tarjota paljon hyviä mahdollisuuksia paikallisille energiayhteisöille.



Kuvio 12. Mikroverkon ja sen mahdollisten osien kaaviokuva. Mukailtu alkuperäisestä kuvioista (NASEO 2024).

Mikroverkoille ominainen kyky toimia itsenäisesti riippumatta keskitetystä verkosta, parantaa luotettavuutta ja joustavuutta sähkökatkosten tai katastrofien aikana. Mikroverkkojen sähkö tuotetaan yleensä hajautetuilla energialähteillä, kuten aurinkopaneeleilla, tuuliturbiineilla ja sähkön ja lämmön yhteistuotantojärjestelmillä, sekä hyödyntävät yleensä energian varastointiratkaisuja kysynnän ja tarjonnan tasapainottamiseksi. (Hatzargyriou 2023, 2; Shahzad ym. 2023, 1; Ton & Smith 2012, 1.) Mikroverkkojen sisäisten energiamarkkinoiden avulla sen osalliset eli kuluttajat ja aktiiviset kuluttajat (Toffler 1981, 3) voivat käydä aktiivista energiakauppaa yhteisössään (lähes) reaaliajassa tasapainottaen kestävästi paikallista tuotantoa ja kulutusta. Mikroverkot voivat siis tuoda toteuttamiskelpoisen vaihtoehdon hajautettujen uusiutuvien energialähteiden taloudelliseen integroimiseen energiajärjestelmäämme. (Kou, Liang & Gao 2017, 1; Mengelkamp ym. 2018, 1.)

Mikroverkot ja energiayhteisöt ovat toisiaan täydentäviä lähestymistapoja kestävämmän, luotettavamman ja joustavamman energiajärjestelmän luomiseksi. Vaikka mikroverkot ovat ensisijaisesti teknisiä rakenteita, joissa keskitytään paikalliseen energianhallintaan ja luotettavuuteen ja energiayhteisöt ovat sosioekonomisia malleja, joissa korostetaan energian kollektiivista omistajuutta ja hyötyjä, voivat ne tukea toisiaan. Mikroverkot tarjoavat teknisen selkärangan paikalliselle energianhallinnalle ja häiriönsietokyvyille, kun taas energiayhteisöt tarjoavat puitteet kollektiiviselle toiminnalle ja hyötyjä energian tuotannossa ja kulutuksessa. Mikroverkkojen ja energiayhteisöiden integroinnilla voidaan hyödyntää molempien vahvuuksia ja tehostaa siirtymistä kohti hajautettuja ja yhteisölähtöisiä energiajärjestelmiä. (Hatzargyriou 2023, 2–3.)

Lohkoketjuteknologian avulla energiasovelluksissa on mahdollista toteuttaa sekä turvallisia että automatisoituja vertaisverkon välisiä energiakauppoja. Tehokkaita lohkoketjujen mikroverkkopilotteja on Yhdysvalloissa ja Australiassa, ja hankkeita valmistellaan Thaimaassa, Malesiassa, Japanissa, Turkissa, Italiassa, Sloveniassa ja Saksassa. Brooklynin mikroverkko on merkittävä reaali maailman sovellus energian lohkoketjusta. (Boumaiza & Sanfilippo 2024, 10.)

3.3 Virtuaalivoimalat

Useimmat mikroverkot on tarkoitettu täydentämään yleistä sähköverkkoa tai toimimaan tietyn alueen ainoana virtalähteenä. Virtuaalivoimalaitokset (VPP) taas koostuvat useista hajautetun energijärjestelmän laitteista, kuten aurinkopaneeleista ja akuista. (*Suomen energiavisio 2030 2002*, 11.) Virtuaalivoimalaitokset näkyvät sähköverkkoon yhtenä voimalaitoksena ja pystyvät hoitamaan myös verkon ylläpitotehtäviä, kuten jännitteensäätöä ja kysyntäjoustoa (Kaif ym. 2024, 1).

Virtuaalivoimalaitokset voivat olla myös hajautettujen, keskisuurten sähköntuotantoyksiköiden, kuten tuulipuistojen, aurinkopuistojen ja sähkön ja lämmön yhteistuotantoyksiköiden (CHP), sekä joustavien sähkönkuluttajien ja varastointijärjestelmien verkosto. Euroopassa on lukuisia VPP-hankkeita, joilla pyritään lisäämään energiatehokkuutta ja kestävyyttä epävakaiseen energiamarkkinaan (Taulukko 2). (Venegas-Zarama, Muñoz-Hernandez, Baringo, Diaz-Cachinero & De Domingo-Mondejar 2022, 47944.)

Maa	Hankkeen nimi
UK	Falcon, Piclo, Electron, UK SMS VPP, Engie ja KIWI Power VPP, FENIX
Alankomaat	PM VPP, Power Matching City VPP, Vandenborn, VSEF, VFCPP
Tanska	Flex Power, FLECH, Sonnen Community, EDISON
Saksa	Peer energy cloud, Smart watts, VFCPP, EDISON, Web 2 energy, TWENTUES, POSITYF Project
Espanja	VFCPP, FENIX, POSITYF-hanke.
Ranska	FENIX, TWENTUES, POSITYF-hanke.
Puola	Web 2 energy.
Belgia	TWENTUES
Sveitsi	POSITIF-hanke

Taulukko 2. Eurooppalaisia virtuaalivoimalaitoshankkeita (Venegas-Zarama ym. 2022, 47957).

3.4 Uusiutuvan energian integrointi

Lohkoketjuteknologia tarjoaa lupaavan ratkaisun uusiutuvien energialähteiden integroimiseksi verkkoon. Mahdollistamalla kaupankäynnin hajautetulla energialla, lohkoketjuteknologia helpottaa uusiutuvan energian tehokasta jakelua ja kulutusta. Esimerkiksi eräässä energia-alan älykkäitä lohkoketjutoteutuksia selvittävässä tutkimuksessa (Nepal, Yuangyai, Gyawali & Yuangyai 2022, 17) korostetaan uusiutuvan energian järjestelmien toiminnallisia ja transaktiollisia haasteita. Katsauksessa esitetään, että lohkoketju voi merkittävästi parantaa uusiutuvan energian transaktioiden operatiivista tehokkuutta ja läpinäkyvyyttä, edistäen uusiutuvien energialähteiden integroimista verkkoon.

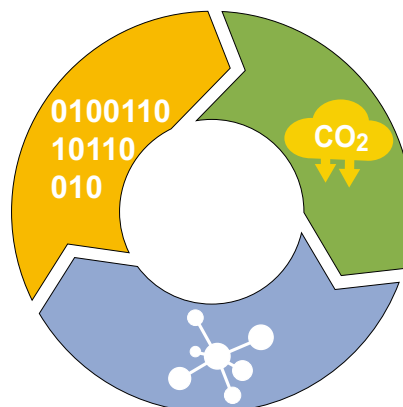
Lisäksi lohkoketju voi tarjota ratkaisuja energian varastointiongelmien, mikä on erityisen tärkeää uusiutuvan energian alalla. Uusiutuvat energiamuodot, kuten aurinko- ja tuulienergia, ovat luonteeltaan epäsäännöllisiä ja niiden tuotanto voi vaihdella sääolosuhteiden mukaan (Fares 2015; Sovacool 2009, 1). Lohkoketju-pohjaiset älykkäät sopimukset mahdollistavat energian varastoinnin automaation, optimoiden näin energian käyttöä ja varastointia vastaamaan kysyntää reaaliajassa (Damisa & Nwulu 2022, 1), parantaen energiatehokkuutta ja vähentäen tuotannon ja kulutuksen välistä kuilua (Taherdoost 2024, 4–5).

Lohkoketjun käyttö uusiutuvan energian alueella voi edistää globaalia yhteistyötä ja skaalautuvuutta. Kansainväliset pilotointiprojektit ovat osoittaneet, että lohkoketjut voivat tarjota uudenlaisen tavan hallita ja rahoittaa näitä hankkeita. Tämä ei ainoastaan edistä kestäväen kehityksen tavoitteita, vaan myös luo pohjan uusiutuvan energian globaalille integraatiolle ja hyväksynnälle. (Taherdoost 2024.)

4 Lohkoketjut energiakaupassa.

4.1 Energiakaupan muutos

Nykyiset energiatrendit ja päätöksenteon tavoitteet (Kuvio 13) voidaan tiivistää ”3D:ksi” (Decentralization, Decarbonization, and Digitalization) eli hajauttaminen, hiilidioksidipäästöjen vähentäminen ja digitalisointi (Peter ym. 2019, 3). Näitä tavoitteita on laajennettu myös sisältämään demokratisaatio ja palveluiden hajauttaminen eli diversifikaatio, jolloin voidaan voidaan puhua 5D:stä (Dash 2016; Wagner & Götz 2021, 1). 5D on enemmän 3D:n laajennus, joten sitä ei käsitellä syvemmin tässä työssä. (Borkovcová ym. 2022, 2) esittävät, että lohkoketjuteknologialla on mahdollista vastata näihin energia-alan kolmeen perustavoitteeseen (kuva 3D). Käsitteet hajauttaminen, hiilidioksidipäästöjen vähentäminen ja digitalisaatio ovat laajasti käytössä energia-alan tutkimuksessa, mutta niiden merkitykset eivät aina ole selvästi määriteltyjä. Vaikeus päästä yksimielisyyteen näistä kestävästä energijärjestelmän keskeisten termien täsmällisestä määrittelystä johtuu siitä, että ne pitävät sisällään monia teknologioita ja sovelluksia (Alanne & Saari 2006, 541–545). Lohkoketjumalli, jolla voitaisiin saavuttaa 3D-tavoitteet energia-alalla koko yhteiskunnan tasolla, on vielä melko kaukainen ajatus. Tämä johtuu siitä, että nämä teknologiat ovat vielä kehitteillä ja niihin vaikuttavat merkittävästi sosiologiset ja taloudelliset tekijät. (Borkovcová ym. 2022, 9.)



Kuvio 13. 3D, eli (Decentralization, Decarbonization, and Digitalization) hajauttaminen, hiilidioksidipäästöjen vähentäminen ja digitalisointi.

Hajautettu energiantuotanto, erityisesti kotitalouksien ja kaupallisten aurinkosähkösovellusten avulla, on muuttanut energiamaisemaa hämärtämällä perinteistä eroa energiantuottajien ja kuluttajien välillä ja nostanut energiamarkkinoiden uudeksi toimijaksi kuluttajat. Lohkoketjuteknologia on lupaava vaihtoehto, jonka avulla kuluttajat voivat liittyä energiamarkkinoille turvallisella ja kustannustehokkaalla tavalla. Lohkoketju mahdollistaa sen, että kuluttajat, kuluttajat ja energiayhtiöt voivat osallistua tehokkaaseen energiakauppaan automatisoimalla suorat energiatransaktiot älysopimuksilla. (Boumaiza & Sanfilippo 2024, 1).

4.2 Vähemmän välikäsiä

Sähkömarkkinat toimivat perinteisesti päivittäisten tai lyhytaikaisten huutokauppojen kautta, joissa kaikki energia myydään yhtenäiseen markkinaselvityshintaan (Cai ym. 2022, 1–2; Choobineh ym. 2022, 2). Lohkoketjuteknologian kehittyminen tarjoaa uusia mahdollisuuksia kustannustehokkaaseen energiakauppaan, välittäjien poistamiseen sekä turvallisuuden ja joustavuuden parantamiseen. Lohkoketjuteknologia vaikuttaa soveltuvan hyvin energiantuotannon ja -jakelun jakelukehyksen luomiseksi mikrotuuli-, aurinko- ja mikrovesivoimaa tuottavien pienten sähköntuotantojärjestelmien välille. (Giungato, Rana, Tarabella & Tricase 2017, 9.)

Erilaisten lohkoketjuteknologiasovellusten joukossa, energiakauppa vaikuttaa siihen parhaiten soveltuvalta. Sähköisen energian osuuksien hallinnointi jakaa yhteneväisyyksiä sähköisen rahan kanssa: muunneltavuus ja jakelu verkkojen kautta, eikä sitä voi kopioida tai kloonata. Lohkoketju on väline, jolla voisi olla mahdollista vastata energia-alan nykyisiin tarpeisiin vahvistamalla loppukuluttajien roolia energiamarkkinassa. Lohkoketju voi tarjota mahdollisuuden toteuttaa läpinäkyvää ja varmaa sähkökauppaa. (Di Silvestre ym. 2020, 11.) Energiayhteisöihin sovellettaessa sillä on mahdollisuus mullistaa energian hallinnan järjestelmiä, mahdollistaa energian vertaisvaihdata ja lisätä uusiutuvan energian tuotannon jäljitettävyyttä (Borkovcová ym. 2022, 1). Lohkoketjuteknologian mahdolliset sovellukset tulevaisuuden energiajärjestelmissä voidaan jakaa kahteen luokkaan: 1. sähköenergian ja -palveluiden kauppa sähkömarkkinoilla ja 2. uusiutuvan energian sertifiointi ja aktiivisten käyttäjien jäljittäminen, kuten

erilaiset kysyntäjoustopalvelukset ja aktiivisten kuluttajien tarjoamat joustopalvelut. (Foti & Vavalis 2021, 5.) Hajautetulla alustalla, kuten lohkoketjussa, mikään yksittäinen taho ei voi olla suoraan vastuussa tällaisista tehtävistä. Viisi suurinta haastetta, joita lohkoketjujen toteuttaminen sähköjärjestelmissä kohtaa ovat infarakenteelliset ongelmat, konsensusalgoritmit, sääntely, skaalautuvuus ja turvallisuuskysymykset. (Choobineh ym. 2022, 2.)

Lohkoketjujen potentiaali, varsinkin verrattuna sen ensimmäisiin sovelluksiin kryptovaluuttojen alalla, on tunnustettu monilla aloilla. Lohkoketjujen mahdollisuudet, erityisesti silloin kun sitä voidaan käyttää yhdessä muiden tekniikoiden, kuten tekoälyn, esineiden internetin, kehittyneiden antureiden ja älykkäiden mitauslaitteiden kanssa, ovat valtavat. Itse asiassa, vaikka monet sähkönvaihtoon liittyvistä prosesseista voidaan toteuttaa myös ensimmäisen sukupolven mitauslaitteilla ja perinteisillä keskitetyillä tietotekniikkajärjestelmillä, siirtyminen lohkoketjuun on väistämätöntä, jotta tulevaisuuden sähköjärjestelmien suorituskyvyn riittävä valvonta voidaan toteuttaa. Lohkoketjun käyttö on välttämätöntä erityisesti reaaliaikaisten tietojen hallinnoimiseksi ja jakamiseksi sähköjärjestelmän käyttäjien (jakeluverkonhaltijat, kauppiat, tuottajat ja loppuasiakkaat) kanssa, jotta voidaan varmistaa toimintojen täydellinen jäljitettävyyden ja energiapalvelujen tarjoamiseen vaadittavien vaatimusten todentaminen. (Galici ym. 2021, 2.)

4.3 Energian vertaiskauppa

Aikaisemmin pienasiakkailla ei ollut mahdollisuutta osallistua suoraan sähkömarkkinoille, koska jakeluverkosta puuttui sopivia viestintä- ja valvontalaitteita. Yleensä he tekivät sopimuksen tukkumarkkinoille osallistuvien vähittäismyyjien kanssa, jotka ostivat energiaa ja toimittivat sitä heidän tarpeisiinsa. Perinteisessä mallissa asiakkaiden kulutus sekä tuotanto mitataan yksilöllisesti ja heiltä peritään kulutetun energian hinta tai heille maksetaan korvausta syötetystä energiasta. Perinteisen energiamarkkinan tarkat rajat hämärtyvät kuluttajien saadessa mahdollisuuden käydä kauppaa energialla vertaiskaupan avulla. Peer

to peer (P2P), eli vertaismarkkinoiden kautta asiakkaat voivat käydä sähkökauppaa keskenään ja jopa tukkumarkkinoilla ilman vähittäismyyjän välittäjää. (Boumaiza & Sanfilippo 2024, 1; Hosseinnezhad, Hayes, O'regan & Siano 2021, 154831–154832.)

Vertaisverkko tarkoittaa sitä, että verkossa ei ole keskushallinnoijaa, vaan kaikki osallistujat (solmut) keskustelevat keskenään suoraan. Tämän ansiosta transaktioita voidaan suorittaa suoraan vertaisten kesken ilman kolmannen osapuolen, kuten energiayhtiön, osallistumista. (Bashir 2023, 11.) Energian vertaisverkoissa, eli paikallisissa energiamarkkinoissa (Hosseinnezhad ym. 2021, 154831) käytetään erilaisia markkina-arkkitehtuureja, kaupankäyntistrategioita ja sovelluksia energian vaihdon helpottamiseksi. Näihin kuuluvat reaaliaikaiset markkinat, dynaamiset hinnoittelumallit ja niin sanotut älysopimukset. Erilaiset kaupankäyntialustat pystyvät antamaan käyttäjille mahdollisuuden asettaa hintoja, hallinnoida liiketoimia ja jopa neuvotella suoraan muiden käyttäjien kanssa mukautuen verkon kysynnän ja tarjonnan dynamiikkaan. (International Renewable Energy Agency 2020, 8; Islam 2024, 4.)

Lohkoketjuteknologia mahdollistaa vertaisverkkokauppojen automatisoinnin hajautetussa tietokanta-arkkitehtuurissa (Boumaiza & Sanfilippo 2024, 1), jossa energiaa tuottavat kuluttajat voivat myydä ylijäämäenergiaansa suoraan muille yhteisön jäsenille (Abdella & Shuaib 2018, 1; Wu, Wu, Guerrero & Vasquez 2022, 6). Vuonna 2017 esitti EU:n JRC (Joint Research Centre) raportissaan energiayhteisöille soveltuvan lohkoketjupohjaisen Helios-mallinsa joka soveltuu myös vertaiskaupankäyntiin. Tämä malli on esitelty tarkemmin luvussa 6.5.

Energian vertaiskauppa (P2P) on yksi lohkoketjun suorimmista sovelluksista energiayhteisöissä. Siano, Marco, Rolan ja Loia (2019, 3) tekivät tutkimuksen, jossa arvioitiin lohkoketjuun perustuvan hajautetun pääkirjatekniikan mahdollisuuksia vertaisverkossa tapahtuvassa energiakaupassa. Tutkimuksessa todetaan, että lohkoketjuteknologia voi alentaa merkittävästi transaktiokustannuksia, lisätä läpinäkyvyyttä ja voimaannuttaa kuluttajia energiamarkkinoilla. Vastavasti Pop ym. (2018, 14) lohkoketjupohjaista kysyntäjousto-ohjelmien hajautettua hallintaa älykkäissä energiaverkoissa käsittelevässä työssä korostetaan,

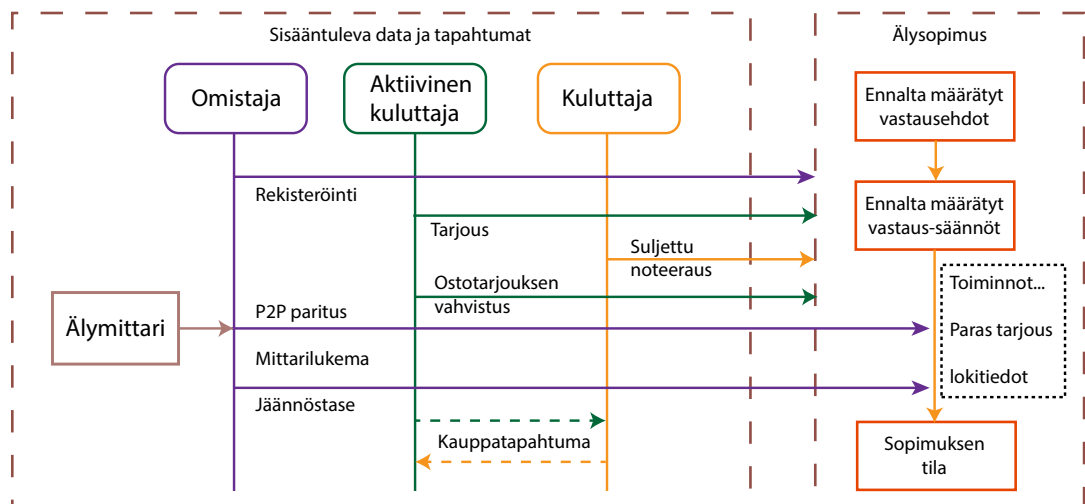
miten lohkoketjuja hyödyntävät kulutus-joustojärjestelmät voi antaa kuluttajille mahdollisuuden osallistua aktiivisesti energiamarkkinoille, optimoida energiankulutusta ja edistää verkon vakautta.

Energian vertaiskauppa on merkittävä lohkoketjusovellus energiayhteisöiden ja mikroverkkojen energianhallinnassa, sillä se mahdollistaa suorat energiakaupat tuottajien ja kuluttajien välillä ilman välikäsiä. Eräs tunnetuimmista lohkoketju-pohjaisen energiakauppa-alustan soveltamiskohteista on Brooklynin mikroverkko, jossa käytetään älykkäitä sopimuksia energiakaupankäynnin automatisointiin (Mengelkamp ym. 2018, 879). K. Li, Yang, Wang, Shi ja Li (2021, 3) huomauttavat kuitenkin, että lohkoketjupohjainen energiakauppa on vielä laajalti kokeiluasteella ja siitä tarvitaan lisää tutkimusta. Kun sähköverkko on siirtymässä nopeasti älykkääseen sähköverkkoon säänneltyjen energiamarkkinoiden sijasta, ovat esineiden internetiin (IoT) perustuvat ratkaisut yleistymässä ja mikrotason vertaisverkkokauppaa ollaan vähitellen ottamassa käyttöön. Tällainen kehitys jättää kuitenkin perinteiset verkon turvallisuuteen sovelletut mallit haavoittuviksi ja tasoittaa tietä lohkoketjulle ja sen hajautetulle kirjanpidolle. Energiamarkkinoiden keskitetyn sääntelyn purkautuessa tilalle tulevien järjestelmien on pystyttävä käsittelemään valtavia määriä mikrotransaktioita. Tämä kaupankäynnin tapahtumien suuri määrä tulee muodostamaan suorituskyvyn pullonkaulan nykyisillä lohkoketjuratkaisuilla, kuten Hyperledgerille ja Ethereumille. (Pradhan ym. 2022, 1.)

Lohkoketjupohjaiset vertaiskaupan alustat koostuvat seuraavista osista: 1. sovelluskerros, joka koostuu alustan omistamasta datakeskuksesta ja käyttöliittymästä, jossa liiketoimintaympäristöä hallinnoidaan; 2. virtuaalikerros, jossa kaupankäyntimekanismi toimii ja tarjotaan käyttäjille. Tähän kerrokseen kuuluu lohkoketjupohjainen tietojärjestelmä; 3. laitteistokerros, jossa esimerkiksi älymittarit toteuttavat kaupankäyntiä ja viestintää IoT-infrastruktuuriin. (Hosseinnezhad ym. 2021, 11.)

4.4 Älysopimusten mahdollisuudet

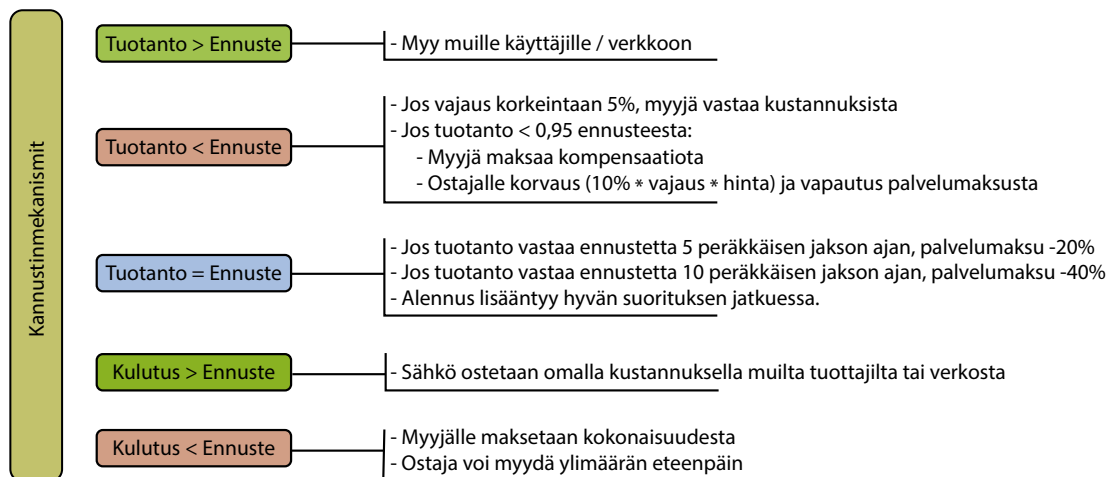
Älysopimuksia käytettäessä kauppatapahtumat toteutetaan automaattisesti kaikkien osapuolten sopimien ennalta asetettujen sääntöjen perusteella. Järjestelmä parantaa transaktioiden tehokkuutta ja varmistaa myös, että kaikki osallistujat voivat luottaa järjestelmään ilman ylimääräistä keskusviranomaista. Energiantuottajat ja -kuluttajat (prosumers ja consumers) ovat suoraan vuorovaikutuksessa toistensa kanssa ja tarjoavat ja myyvät energiaa reaaliaikaisesti kysynnän ja tarjonnan dynamiikan mukaisesti. (Guo ym. 2023, 4–6.) Älysopimusten tekniikka on esitelty tarkemmin luvussa 2.5.



Kuvio 14. Älysopimuksen toiminnot ja niiden loogiset suhteet. Mukailtu alkuperäisestä kuvioista (Guo ym. 2023, 5).

Älysopimusten toimintojen loogisia suhteita on kuvattu kuviossa Kuvio 14. Jos yhden sopimusosapuolen, eli esimerkiksi energiayhteisön jäsenen, toteutunut sähköntuotanto ylittää ennusteen, sopimukseen kirjataan ylimääräisen tehon tarjous. Muut käyttäjät voivat ostaa tätä ylijäämää ja tuottajat voivat myös myydä sitä verkkoon. Älykkäisiin sopimuksiin perustuva järjestelmä pyrkii tasa-painottamaan tuotannon ja kulutuksen suhdetta. Aktiivisia kuluttajia kannustetaan tarkentamaan sähköntuotannon ennustemallejaan, kun taas kuluttajia kehoitetaan säätämään kulutustottumuksiaan. (Guo ym. 2023, 4.) Järjestelmän kannustusmekanismit on esitetty alla (Kuvio 15). Älykkäät sopimukset ovat

kuitenkin vielä kehittymässä ja niiden käyttöönottoon liittyy riskejä. Sopimuksia ei voida käyttöönoton jälkeen muuttaa ja mikäli niissä on virheitä voivat seuraukset olla merkittäviä. (Guo ym. 2023, 14.)



Kuvio 15. Erään energiavertaisverkon sisäinen kannustinjärjestelmän kaavio. Mukailtu alkuperäisestä kuvioista (Guo ym. 2023, 5).

5 Turvallisempia energiajärjestelmiä

5.1 Lisääntynyt avoimuus ja luottamus

Lohkoketjun luontaiset ominaisuudet, kuten muuttumattomuus ja läpinäkyvyys, lisäävät luottamusta energiamarkkinoiden toimijoiden välillä. Teknologia tarjoaa turvallisen ja läpinäkyvän alustan energian alkuperän ja jakelun seurantaan. Ethereum-lohkoketjua on sovellettu myös muissa energiaverkon sovelluksissa, kuten Pop ym. (2018, 9) kuvaavat hajautettuja älyverkon hallintajärjestelmiä koskevassa julkaisussaan. Heidän tuloksensa osoittavat, että lohkoketju-pohjaista hajautettua kysyntäpuolen hallintaa voidaan käyttää energian kysynnän ja tuotannon yhteensovittamiseen älykkään verkon tasolla.

Julkisten laitosten avoimuus niiden pyrkiessä harjoittamaan kestävästä kehityksen tavoitteidensa kanssa johdonmukaista politiikkaa voi lisääntyä huomattavasti, jos näiden rakennusten tai laitosten energiankulutus ja/tai -tuotanto jaetaan automaattisesti ja julkisesti turvallisella ja luotettavalla alustalla. (Nastasi, Manfren & Noussan 2020, 1.) Lisäksi kansalaiset ja osakkeenomistajat voivat seurata tätä tietokokonaisuutta, jolloin kriittiset ongelmat voidaan tunnistaa ja ehdottaa niihin mahdollisia parannuksia. Nämä analyysit voivat auttaa ymmärtämään julkisten varojen käyttöä sekä luomaan kestäviä, kohtuuhintaisia, luotettavia energiapalveluja julkiselle sektorille. (Galici ym. 2021, 1.)

5.2 Turvallisuuden ja tehokkuuden parantaminen

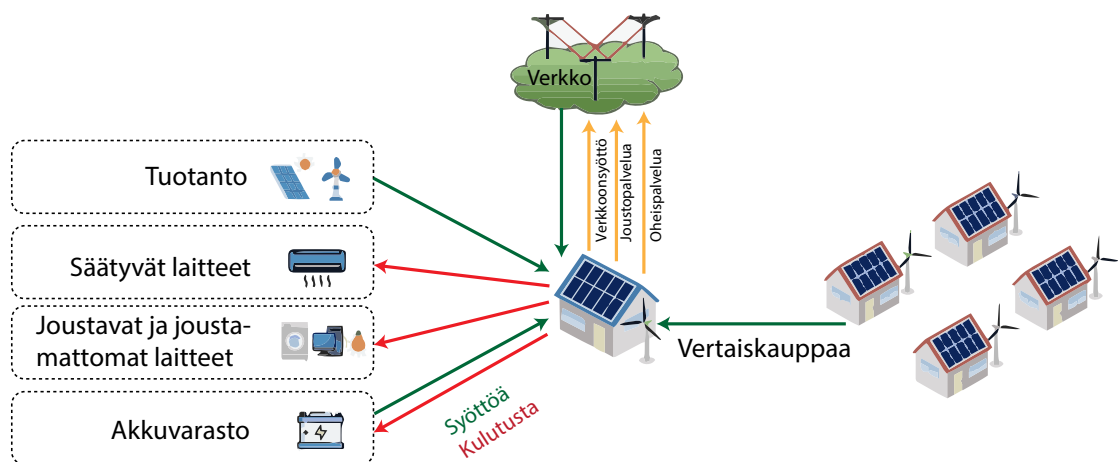
Energianhallintajärjestelmien turvallisuus ja tehokkuus ovat kriittisiä huolenaiheita, joihin lohkoketjuteknologia voi vastata. H. Khan ja Masood (2022, 15) korostavat lohkoketjujen roolia nykyaikaisten energiajärjestelmien luotettavan toiminnan kannalta olennaisten seikkojen, kuten älykkäiden verkkojen turvallisuuden, yksityisyyden suojan ja luottamuksen parantamisessa.

Juszczuk ja Shahzad (2022, 12–13) havaitsivat lohkoketjuteknologiaa uusiutuvassa energiantuotannossa käsittelevässä työssään, että hajautettujen pääkirjateknologioiden soveltamisen ja sen soveltuvuuden uusiutuvan energian alalle olevan kohtuullisen rajallista. Lohkoketjusovelluksien mahdollisina etuina havaittiin muun muassa yritysten yleisen kustannustehokkuuden ja kauppakumppaneiden luottamuksen lisääntyminen, energian demokratisointi ja jäljitettävyyden lisääntyminen, sekä monimutkaisten transaktioiden ja menettelyjen automatisointi. Liiketoiminta-alueiksi, joilla lohkoketjuilla voisi olla suurin vaikutus, tunnistettiin esimerkiksi energiakirjanpito ja oikeudelliset sopimukset ja uusien energiamaarkkinoiden luominen.

6 Energiayhteisöiden lohkoketjusovellukset

6.1 Johdanto

Seuraavissa luvuissa esitellään kolme erilaista energiayhteisöille suunniteltua lohkoketjuja hyödyntävää sovellusta tai mallia. Mallien ja sovellusten käyttökokemuksia ei vielä juuri ole julkaisijoiden omien testausten lisäksi, joten esitteilyssä ja toimivuuden arvioinnissa joudutaan nojautumaan vahvasti kirjoittajien omiin kokemuksiin. Kaksi näistä malleista perustuu Ethereum-lohkoketjuun ja LEC:ksi nimetyn mallin kirjoittajat eivät paljastaneet käyttämänsä lohkoketjun yksityiskohtia.

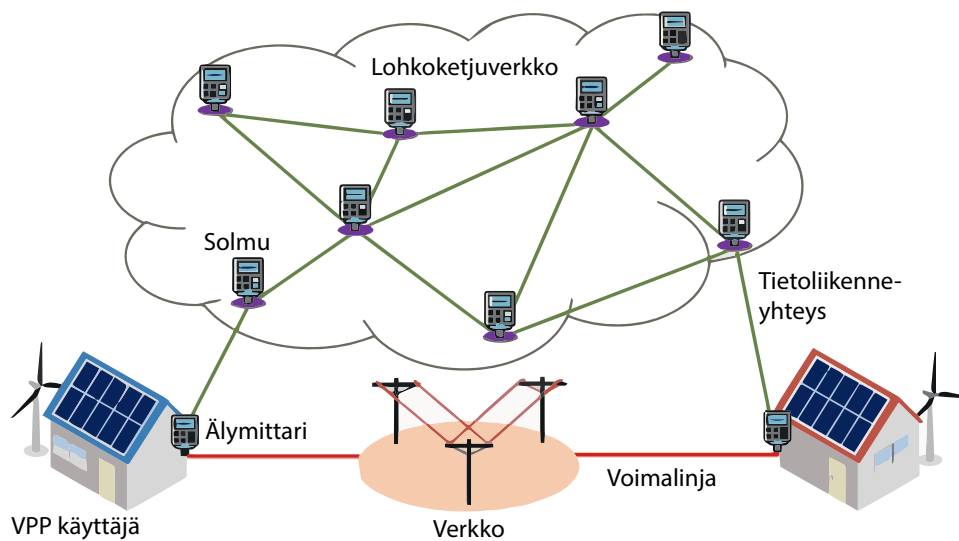


Kuvio 16. DER VPP mallin virtuaalisen voimalan toimintaperiaate. Mukailtu alkuperäisestä kuvioista (Yang ym. 2021, 5).

6.2 DER VPP-malli

Yang ym. (2021, 1) esittelevät julkaisussaan ”Blockchain-Based Decentralized Energy Management Platform for Residential Distributed Energy Resources in A Virtual Power Plant” kehittämänsä lohkoketjupohjaisen VPP-energianhallintajärjestelmän. Järjestelmää nimitetään tässä työssä nimellä DER VPP-malli. Heidän kehittämänsä lohkoketjupohjainen virtuaalisen voimalaitoksen energianhallinta-alusta sisältää myös hajautetun energiakaupan toteutuksen. Järjestelmä

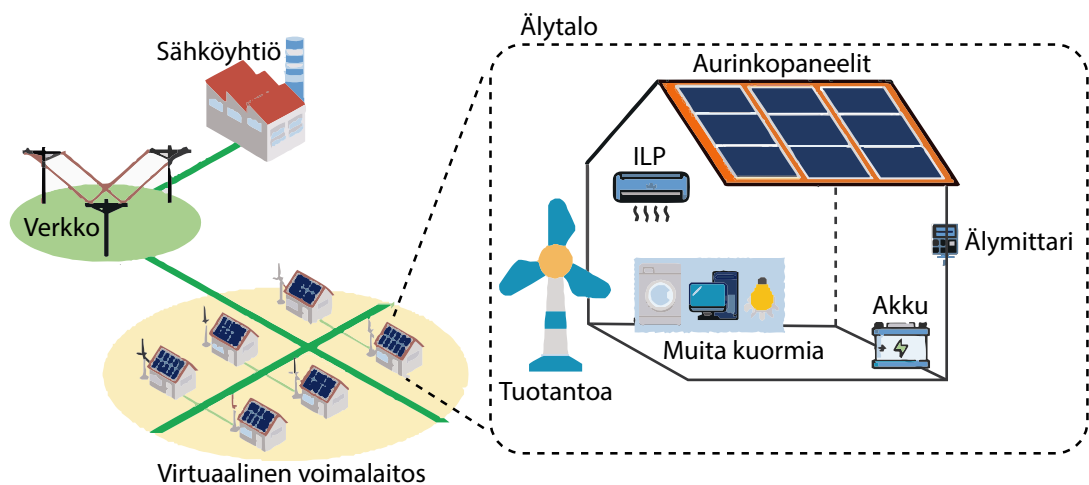
on tarkoitettu kotikäyttäjille, joilla on normaalien vaihtelevien kuormien lisäksi energiavarastoja ja omaa energiantuotantoa (Kuvio 16). Kirjoittajien tietämyksen mukaan tämä on ensimmäinen lohkoketjuteknologiaan perustuva luotettava hajautettu VPP-energianhallinta-alusta, jolla saavutetaan oikea ja todennettavissa oleva energia-aikataulu.



Kuvio 17. Älymittarit muodostavat DER VPP järjestelmän lohkoketjuun solmuja. Älymittarit yhdistetään sähköverkkoon voimalinjalla ja lohkoketjuverkkoon LoRa- tai 5G Narrowband IoT -yhteydellä. Mukailtu alkuperäisestä kuvioista (Yang ym. 2021, 5).

Toisin kuin perinteinen keskitetty VPP:n hallintamenetelmä, lohkoketju on luotettava laskentakone, joka voi ajaa energianhallinta-algoritmia, jolloin keskitetyn koordinaattorin tarve poistuu. Lisäksi lohkoketju tarjoaa turvallisen ja vankan viestintäverkon sekä sen digitaalinen valuutta tarjoaa maksuvälineen kaupankäyntiin. Käyttäjien älymittarit liittyvät lohkoketjuverkkoon lohkoketjun solmuina ja muodostavat vertaisverkon (Kuvio 17), joka välittää lohkoketjun viestejä juoruprotokollan avulla. Lohkoketjusolmut käyttävät konsensusprotokollaa synkronoidakseen paikallisen tilansa verkon muiden solmujen kanssa. Konsensusprotokolla on ratkaiseva komponentti, joka vaikuttaa lohkoketjujärjestelmän kokonaissuorituskykyyn. (Yang ym. 2021, 5-7.)

DER VPP hyödyntää Ethereum lohkoketjuteknologiaa. Ethereum valittiin koska se on vakiintunut ja hyvin testattu järjestelmä, joka tukee järjestelmän tarvitsemia älykkäitä sopimuksia. Lisäksi koska Ethereum on kirjoitettu Go-ohjelmointikielillä ja on avoimen lähdekoodin projekti, oli sen muokkaaminen mahdollista. Ethereum-lohkoketjun toimintatapaa muutettiin siten, että se toimisi tehokkaammin älymittareissa. Ethereum käytti vielä tämän hankkeen aikaan niin sanottua työn todistamisen menetelmää (Proof of Work, PoW), joka on tehokas, mutta vaatii paljon laskentatehoa ja muistia. Testeissä käytettyjen NanoPi-laitteiden vaatimattoman laskentatehon ja muistin vuoksi valtuutuksen todistamiseen käytettiin Proof of Authority (PoA) menetelmää, joka kevytensä vuoksi soveltuu myös älymittareihin. Testeissä havaittiin, että NanoPi:n PoA-solmu kuluttaa noin 1,2 % prosessoriaikaa, 565 Mt muistia ja 157 Mt tallennustilaa, PoW-solmu vei lähes kokonaan laitteen resurssit. (Yang ym. 2021, 11.)



Kuvio 18. DER VPP mallin verkon ja älykkään talon koostumus. Mukailtu alkuperäisestä kuviosta (Yang ym. 2021, 3).

DER VPP mallissa (Kuvio 18) älykkäällä talolla tarkoitetaan kohdetta, joka kykenee sekä tuottamaan että kuluttamaan energiaa. Energian tuotanto voi tapahtua esim. aurinkopaneeleilla tai tuuliturbiineilla. Talossa on normaalisti erilaisia sähköä kuluttavia laitteita kuten esimerkiksi ilmastointilaitte, pesukone ja valaistusta. Lisäksi talossa on sähkön akkuvarasto ylimääräisen energian varastoimiseksi. Yhdistämällä käyttäjien akkuvarastot DER VPP voi tarjota sähköä verkkoon suuren kysynnän aikaan. Älykäs mittari, joka myös yhdistää älykkään talon

paikalliseen sähköverkkoon, hallinnoi ja aikatauluttaa näitä edellä mainittuja komponentteja. Sähkö taloon saadaan itse tuottamalla, ostamalla sitä verkosta tai muilta DER VPP käyttäjiltä P2P-energiakaupan kautta. (Yang ym. 2021, 3.)

Älytalon sähkölaitteet on jaettu kolmeen eri kategoriaan: 1. säädettävä laite, 2. ajallisesti siirrettävä joustava laite ja 3. joustamaton laite. Säädettävää laitetta voidaan säätää älytalon käyttäjän mieltymysten mukaan. Esimerkiksi ilmalämpöpumppu on tyypillinen säädettävä kuorma, koska sen virrankulutus riippuu käyttäjän haluamasta lämpötilasta. Ajallisesti siirrettävissä oleva joustava laite on sellainen kuorma, joka voidaan ajoittaa ja siirtää mihin tahansa toiminta-aikaan, kuten pesukone ja kuivausrumpu. Joustamatonta laitetta (esim. talon valaistus ja jääkaappi) ei voida säätää eikä siirtää ajallisesti. Tässä työssä ilmalämpöpumppu on tyypillinen esimerkki säädettävästä laitteesta. (Yang ym. 2021, 4.)

DER VPP-mallin energianhallinta-alusta mahdollistaa monipuoliset energiakaupat ja verkkopalvelut kotitalouksien välillä. Käyttäjät voivat olla vuorovaikutuksessa toistensa kanssa käydäkseen energiakauppaa molemminpuolisen hyödyn saamiseksi ja tarjotakseen verkkopalveluja, kuten syöttöenergiaa, reserviä ja kysyntäjoustoa. Käyttäjien riippumattomuuden kunnioittamiseksi ja heidän yksityisyytensä säilyttämiseksi, järjestelmän hajautettu optimointialgoritmi säätää käyttäjien energian aikataulutusta, energiakauppaa ja verkkopalveluita. Alusta on osoittautunut tehokkaaksi ja se on vähentänyt käyttäjien kustannuksia merkittävästi. Simulointitulosten perusteella DER VPP-alusta vähensi käyttäjien kustannuksia jopa 38,6 prosenttia ja järjestelmän kokonaiskustannuksia 11,2 %. (Yang ym. 2021, 1.)

6.3 CVPP malli

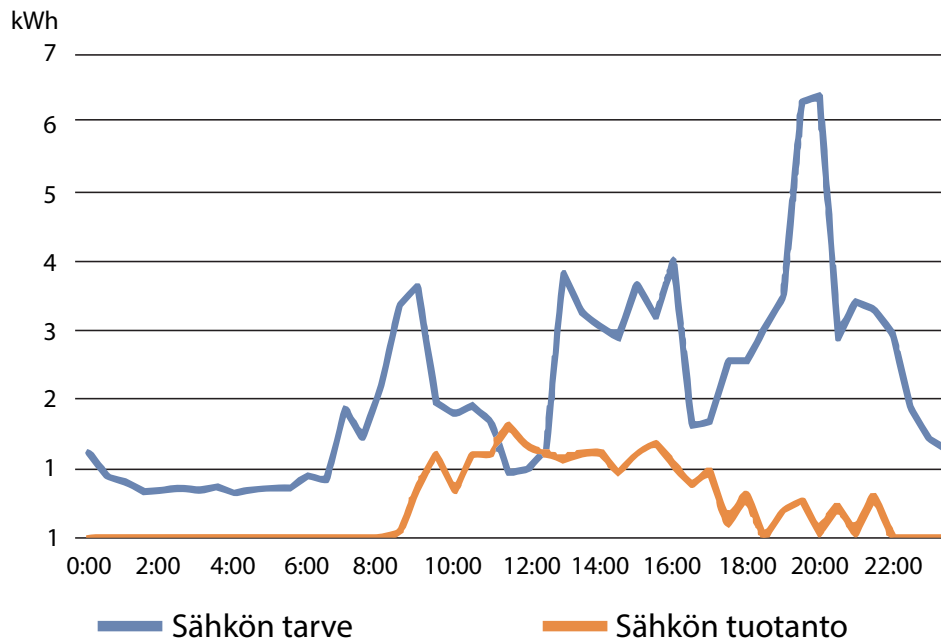
Guo ym. (2023) esittämä CVPP-malli on Ethereumia ja älykkäitä sopimuksia hyödyntävä energian vertaisverkko. CVPP-malli on suunniteltu yhdistämään yhteisön erilaisia hajautettuja energiaresursseja, kuten aurinkopaneeleita, tuulivoimaloita ja energianvarastoja. Yhdistämisen ansiosta yhteisö voi toimia yhtenä

virtuaalisena voimalaitoksena, joka voi tehokkaasti hallita ja jakaa paikallisesti tuotettua energiaa. Järjestelmän oletuksena on, että sähkökäyttäjät myös tuottavat sähköä hajautettujen laitteiden avulla. Lisäksi järjestelmään on sisällytetty sähkön tuotantoa ja kulutusta ennustavia malleja. (Guo ym. 2023, 3.)

Mielenkiintoista mallissa on siihen laaditut selkeät kaupankäynnin säännöt (Guo ym. 2023, 3):

- 1) Tuottajat ja kuluttajat lataavat ennustetun sähköntuotantonsa ja kysyntänsä sekä odotetut sähköhinnat.
- 2) Sopimus lajittelee kuluttajien tarjoukset korkeista alhaisiin ja valitsee sitten kullekin käyttäjälle optimaalisen tarjouksen. Jos useat kuluttajat antavat saman hinnan, järjestelmä sovittaa ensisijaisesti yhteen kuluttajat, joilla on suurempi kysyntä, mikä vähentää energian tuhlaamisen mahdollisuutta.
- 3) Sopimus huomioi kaikki jonossa olevat käyttäjät (matching). Jos sekä tuottajien että kuluttajien tarpeet täyttyvät, transaktio laukaistaan ja poistetaan sitten matching-jonosta. Käyttäjät joille tämä ei onnistu, suorittavat transaktion loppuun niiden käyttäjien kanssa joilla on vielä ylijäämäenergiaa, tai energiantoimittajan kanssa.
- 4) Älymittari lukee edellisen tapahtuman todellisen sähköntuotannon ja -kulutuksen ja lataa sen alustalle.
- 5) Alusta laskee odotetun transaktiomäärän ja tämän kaupankäyntisyklin todellisen sähköntuotannon tai -kulutuksen välisen erotuksen.
- 6) Alusta palkitsee ja rankaisee käyttäjiä tästä transaktiosuorituksesta kannustinpolitiikan mukaisesti.

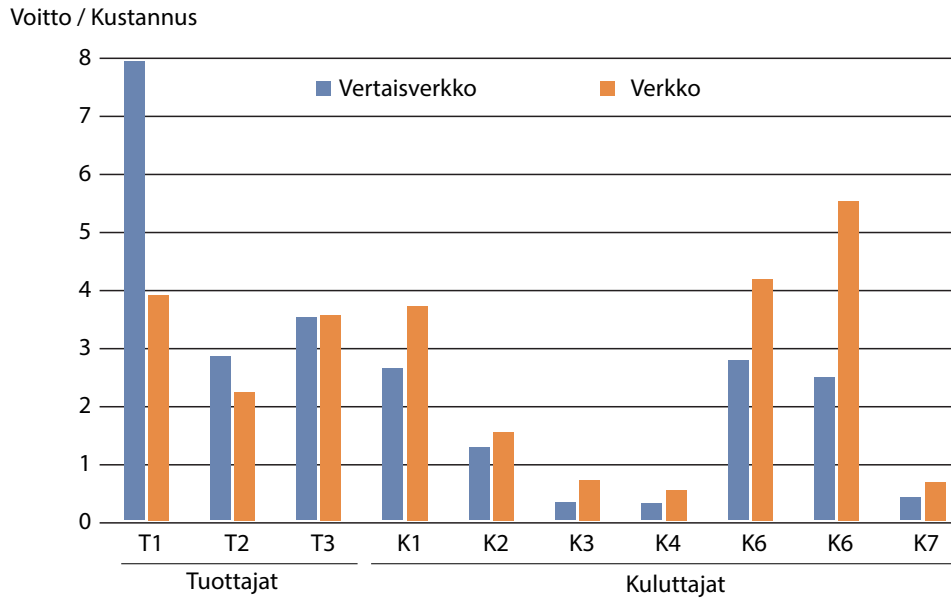
CVPP-mallissa energiakauppa hoidetaan älykkäiden sopimusten avulla. Kauppatapahtumat toteutetaan automaattisesti kaikkien osapuolten sopimien ennalta asetettujen sääntöjen perusteella. Energiantuottajat ja -kuluttajat (prosumers ja consumers) ovat suoraan vuorovaikutuksessa toistensa kanssa, tarjoten ja myyden energiaa reaaliaikaisesti. (Guo ym. 2023, 4–6.)



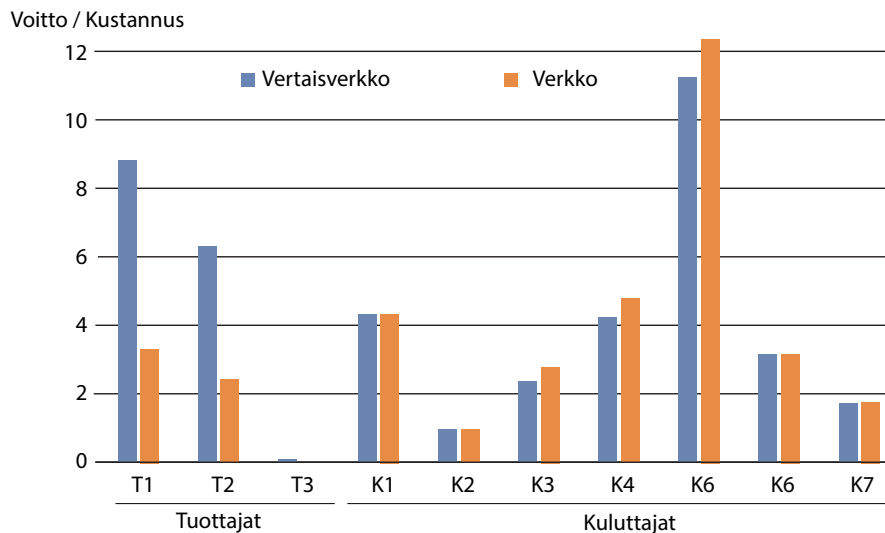
Kuvio 19. Sähkön tarpeen ja sähkön tuotannon käyrät yhden päivän ajalta. Mukailtu alkuperäisestä kuvioista (Guo ym. 2023, 10).

Tarjonnan ja kysynnän suhde (TKS) määritellään kokonaistarjonnan ja kokonaiskysynnän suhteena. Kun TKS on suurempi kuin 1, on energiasta ylitarjontaa. TKS 1 tarkoittaa tarjonnan ja kysynnän tasapainoa ja negatiivinen TKS tarkoittaa, ettei tarjontaa riitä vastaamaan kysyntään. Yllä olevassa kuviossa (Kuvio 19) verrataan kysyntä- ja tarjontakäyriä erään vuorokauden ajalta. Kuviossa on nähtävissä, että kokonaistarjonta ylittää kysynnän selvitysjakson aikana klo 11:30-12:30. Useimmissa muissa tapauksissa TKS on alle 1. (Guo ym. 2023, 10.)

Tarkasteltavan vuorokauden aikaan kello 11:30, on tilanne, jolloin TKS on yli 1 (Kuvio 20). Tuottajien osalta pylväät kuvaavat energian myynnistä saatavia tuloja. Kuluttajien osalta se kuvaa heidän energiakustannuksiansa. P2P-kauppoihin osallistuvien kuluttajien tulot ovat suuremmat kuin suoraan verkkoon energiaa myyvien kuluttajien tulot. Kuluttajille P2P-kaupoista aiheutuvat energiakustannukset ovat alhaisemmat kuin suoraan verkkoon tehtävistä kaupoista aiheutuvat kustannukset. (Guo ym. 2023, 10.)



Kuvio 20. Käyttäjäkohtaiset energiakustannukset yhden tunnin ajalta (11:30), jolloin TKS>1. Mukailtu alkuperäisestä kuviosta (Guo ym. 2023, 11)



Kuvio 21. Käyttäjäkohtaiset energiakustannukset yhden tunnin ajalta (17:00), jolloin TKS <1. Mukailtu alkuperäisestä kuviosta (Guo ym. 2023, 10).

Kello 17.00 aikaan TKS on alle 1 (Kuvio 21). Vaikka sähköntuotantoa on vielä runsaasti, on kysyntä myös kasvanut. Yhteisön sisällä on siis energian ylijäämää. Tässäkin tapauksessa myyminen yhteisön sisälle on kannattavampaa kuin jos sähköä myytäisiin suoraan verkkoon. Jos nettosähköntuotanto on riittämätöntä, yhteisön sisäisiin kauppoihin osallistuminen lisää tuloja hyvin vähän.

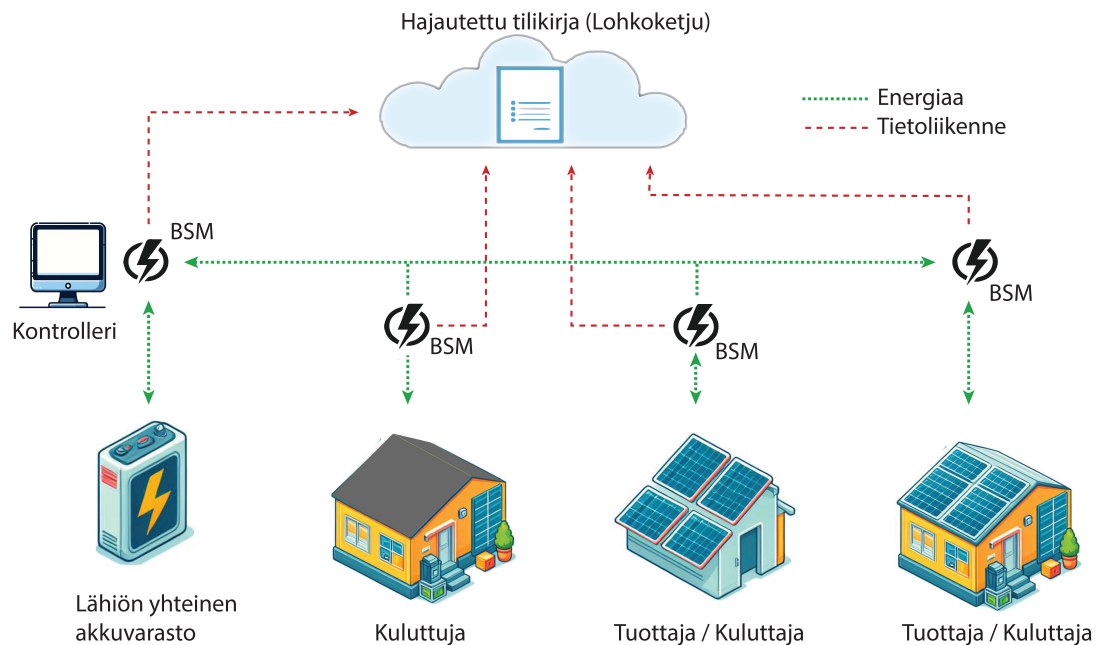
Tällä tarkasteluhetkellä yhteisön sähköntuotanto ei pysty vastaamaan kysyntään ja sisäinen kaupankäynti ei ole juuri kannattavaa. Huomioitaessa koko päivän tilanne, on kauppoihin osallistuminen edelleen kannattavaa. (Guo ym. 2023, 10–11.)

Tutkimuksessa esitellyt simulointitulokset osoittavat, että järjestelmä toimii kohtuullisesti. Vertaisverkon mekanismit voivat luotettavasti toteuttaa resurssien jakamisen kauppamekanismin mukaisesti ja saavuttaa osittaisen tasapainon hajautetun tuotannon ja alueellisen kysynnän välillä. Hyödyistään huolimatta CVPP-malliin liittyy useita haasteita, kuten teknologinen monimutkaisuus, lainsäädännölliset esteet ja älykkään verkkoinfran kustannukset. Lisäksi mallin skaalattavuutta on parannettava siten, että se pystyy käsittelemään tehokkaasti suurempia yhteisöjä ja useita erilaisia energialähteitä. CVPP-mallin vaikuttaa lupaavalta, mutta lisätutkimus ja -pilotoinnit ovat välttämättömiä olemassa olevien haasteiden ratkaisemiseksi ja mallin hiomiseksi laajempaa käyttöönottoa varten. (Guo ym. 2023, 14.)

6.4 LEC

Galici ym. (2021) ehdottavat lohkoketjun soveltamista julkisten rakennusten ja laitosten kestävyysindikaattoreiden laskemiseen, validointiin ja jakamiseen sekä niiden kestävyystavoitteita koskevien parannusten seuraamiseen. Heidän artikkelissaan esitellään lohkoketjusovellusta (Local Energy Community, LEC), joka toimii avoimen energiadatan pääkirjana, sekä tallentaa ja seuraa julkisten rakennusten ja julkisten energiayhteisöjen energialan jälkeä koskevia tietoja. Kehitetty alusta (Kuvio 22) mahdollistaa julkisten rakennusten energiantuotannon ja -kulutuksen kirjoittamisen lohkoketjuun liitettyjen älymittareiden avulla. Kirjoittajat eivät paljasta vielä tässä artikkelissa, käyttämäänsä lohkoketjua, vain että se on jokin yksityinen testiversio. Kun tiedot on todennettu lohkoketjuun, ne voidaan asettaa julkisesti saataville teknistaloudellisia analyysyjä varten joko tutkimuksia ja sisäisiä tai kolmansien osapuolten suorittamia tarkastuksia varten. Alustan toinen ominaisuus, joka perustuu aiemmin julkistettuihin raaka-

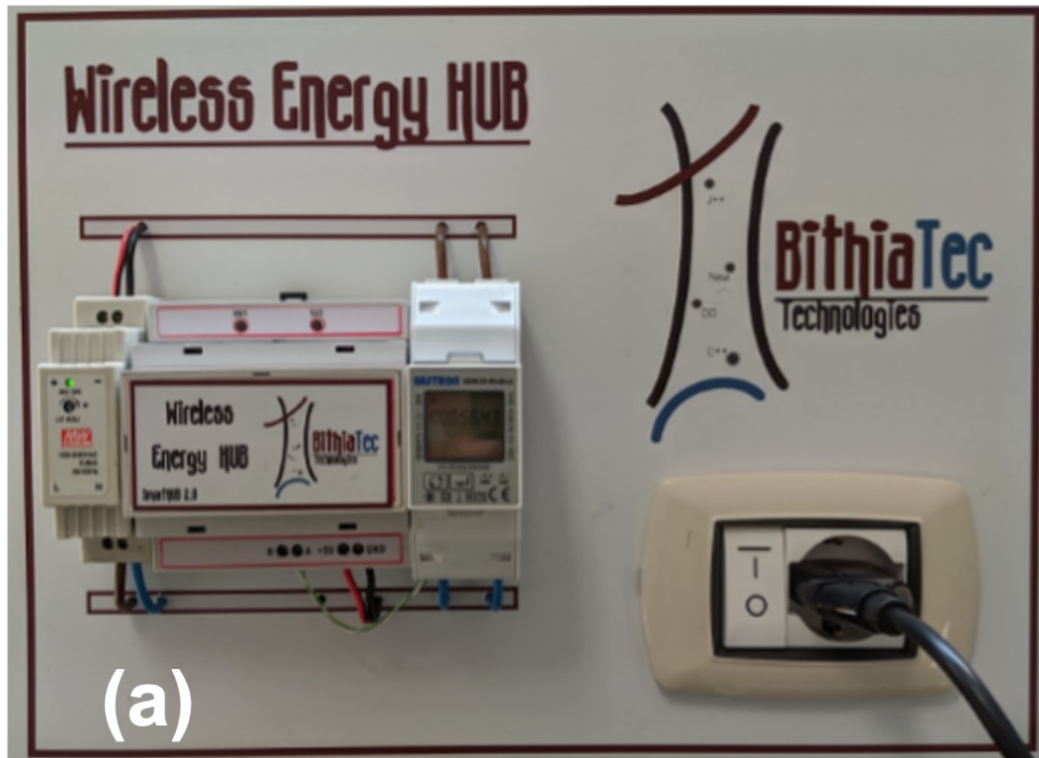
tietoihin, mahdollistaa julkisten rakennusten ja laitosten kestävyysindikaattoreiden laskemisen, validoinnin ja jakamisen, mikä mahdollistaa niiden kestävyystavoitteisiin liittyvien parannusten seuraamisen. (Galici ym. 2021, 1–8.)



Kuvio 22. Paikallisen energiayhteisön hallintoarkkitehtuuri (Blockchain-enabled Smart Meters, BSM). Mukailtu alkuperäisestä kuvioista (Galici ym. 2021, 4).

Ehdotettu järjestelmä koostuu lohkoketjuun perustuvista älykkäistä mittareista (BSM), jotka toimivat ad-hoc-lohkoketjun solmuina (Kuvio 23). Lohkoketjuun tallennetaan energiayhteisön julkisten rakennusten kulutus- ja tuotantotietoja koskevat avoimet tiedot. Raakatietojen saatavuus antaa mahdollisuuden analysoida tietoja ja julkaista kvantitatiivisia arviointeja ja suorituskykyindikaattoreita, jotka koskevat nykyistä käyttöä ja olemassa olevien resurssien hallintaa. Näin voidaan seurata hankkeen jokaisen rakennusosan ympäristöindikaattoreita ajan mittaan, mikä parantaa niiden avoimuutta ja mahdollistaa kunkin toimielimen ponnistelujen arvioinnin sen pyrkiessä parantamaan hiilijalanjälkeään. Järjestelmää sovellettiin eräässä italialaisessa kunnassa sijaitsevaan julkisten rakennusten ryhmään, jotka toimivat energiayhteisönä. Testatut julkiset rakennukset oli varustettu BSM:llä, joka pystyi rekisteröimään niiden kulutuksen ja tuotannon hajautettuun pääkirjanpitoon. Energiatietojen lukemien perusteella analysoidaan ja arvioidaan rakennusten kestävyttä, mikä mahdollistaa rakennusten hallinnan mahdollisen parantamisen. Tulokset osoittavat, että hajautettu alusta avoimen

datan jakamiseen julkisissa sähkö- ja elektroniikkalaitoksissa voi parantaa julkisten laitosten avoimuutta ja energiakestävyyttä. Tätä voidaan puolestaan käyttää parempien ratkaisujen tutkimiseen ja löytämiseen julkisten sähkö- ja elektroniikkalaitosten käyttöönotossa, mikä mahdollistaa vahvan positiivisen palautteen yksityisen, julkisen ja tutkimussektorin välillä. (Galici ym. 2021, 3.)

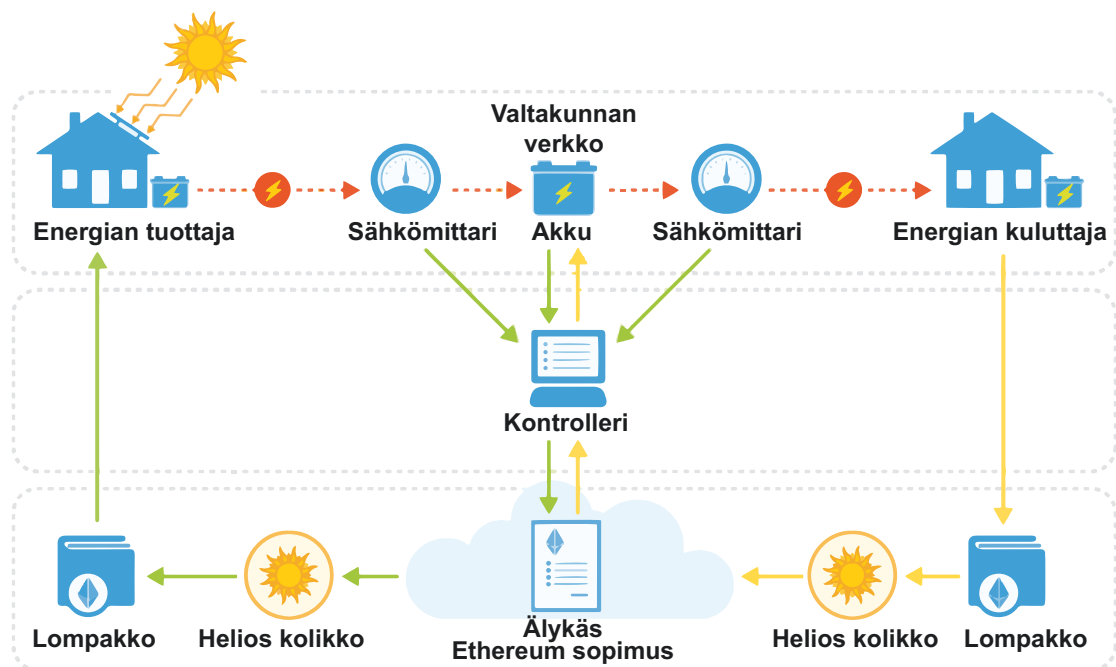


Kuvio 23. Lohkoketjuun perustuva älykäs mittari (BSM) (Galici ym. 2021, 8).

Järjestelmän pilotoinnissa kohdattiin jonkin verran ongelmia, mm. mittareita ei kyetty käyttämään lohkoketjun täysinä solmuina, koska käytössä olleen GSM-väylän kapasiteetti ei riittänyt niin suureen tietoliikenteeseen. Kevyemmällä datamäärällä toimittaessa, jolloin jokainen solmu ei varastoinut koko lohkoketjua itsellään, pystyi järjestelmä toimimaan. Tässä järjestellyssä solmut eivät myöskään vaihda täysiä tapahtumien todisteita keskenään, vaan todisteet ovat ”Merkle tree” muodossa, eikä vaihdanta ole siten aivan täysin varmennettua. Hajautettua tilikirjaa ei käytännön syistä (liian vähän solmuja muodostavia mittareita) tehty julkiseksi, vaan se pidettiin yksityisenä. Sähkömittarit tallensivat tietoja 15 min. välein. Testiä pidettiin onnistuneena. (Galici ym. 2021, 8–14.)

6.5 Helios

Euroopan komission Joint Research Centre on tuottanut Ethereum:iin pohjautuvan sovelluksen tai mallin mikroverkoille nimeltään Helios (Kuvio 24). Sovelluksen nähdään avaavan uusia innovaatioväyliä energiakaupan, -hallinnan ja -jakelun alalle. Malli pyrkii tukemaan siirtymistä kestävämpään energiajärjestelmään kannustamalla uusiutuvan energian paikalliseen tuotantoon ja kulutukseen. Paikallinen lähestymistapa energian jakeluun on tapa vähentää sähkönsiirtohäviöitä, tehden energiajärjestelmästä tehokkaamman. (Kounelis ym. 2017, 25,36.)



Kuvio 24. Helios-malli. Mukailtu alkuperäisestä kuvioista (Kounelis ym. 2017, 17).

Helios-mallin nähdään tuottavan monia etuja. Sen avulla kuluttajat voidaan todella ottaa mukaan energiamarkkinoille ja se voi toimia energiayhteisöjen luomisen mahdollistajana lisää energiamaarkkinajärjestelmän avoimuutta ja luottamusta. Helios voi taata korkeatasoisen turvallisuuden, eheyden ja häiriönsietokyvyn (lohkoketjujen luontaisen luonteen ansiosta). Malli takaa vastuuvollisuuden samalla kun se huolehtii yksityisyydensuojasta. Lisäksi se lupaa avata täysin uusia liiketoimintamahdollisuuksia energiayhteisön konseptiin. (Kounelis ym. 2017, 36.)

Helios-mallin ytimessä on kolme pääkomponenttia: Älykkäät mittarit, jotka mitaavat energiantuotantoa ja -kulutusta reaaliajassa. Fyysisen infrastruktuurin (älykkäät mittarit) ja digitaalisen kehyksen (älykkäät sopimukset) välittäjänä toimii tätä varten tehty ohjelma, välitason kontrolleri. Älykkäät sopimukset hoitavat sähkökaupankäyntiä ja sisäisessä kaupankäynnissä käytettyjen Helios-kolikoiden (HEC) liikennettä. Malli toimii kahdessa energianjakelun pääskenaariossa: Keskitetyssä lähivarastoinnissa tuotettu energia voidaan varastoida keskitetyksi ja jakaa pyynnöstä kuluttajille maksua vastaan. Suora energianvaihdossa energian siirretään aktiivisten kuluttajien ja kuluttajien välillä reaaliaikaisesti kysynnän ja tarjonnan perusteella. (Kounelis ym. 2017, 16–17.)

Vaikka Helios-malli on edistyksellinen lähestymistapa energianhallintaan, sillä on haasteita erityisesti skaalautuvuuden ja sääntelyn noudattamisen suhteen. Merkittäviä esteitä ovat infrastruktuurin teknologiset vaatimukset ja hajautetun energianvaihdon mahdollistavien sääntelypuitteiden tarve. Tällaisen järjestelmän mahdolliset hyödyt, kuten energiakustannusten aleneminen, energiariippumattomuuden lisääntyminen ja uusiutuvien energialähteiden käytön edistäminen, tekevät siitä kuitenkin lupaavan kehityskohteen. Teknologian jatkuva kehittyminen ja sitä tukevat poliittiset toimenpiteet voivat parantaa järjestelmän toteuttavuutta ja hyväksyntää entisestään. (Kounelis ym. 2017, 26–33.)

7 Käytännön pilotit ja testit

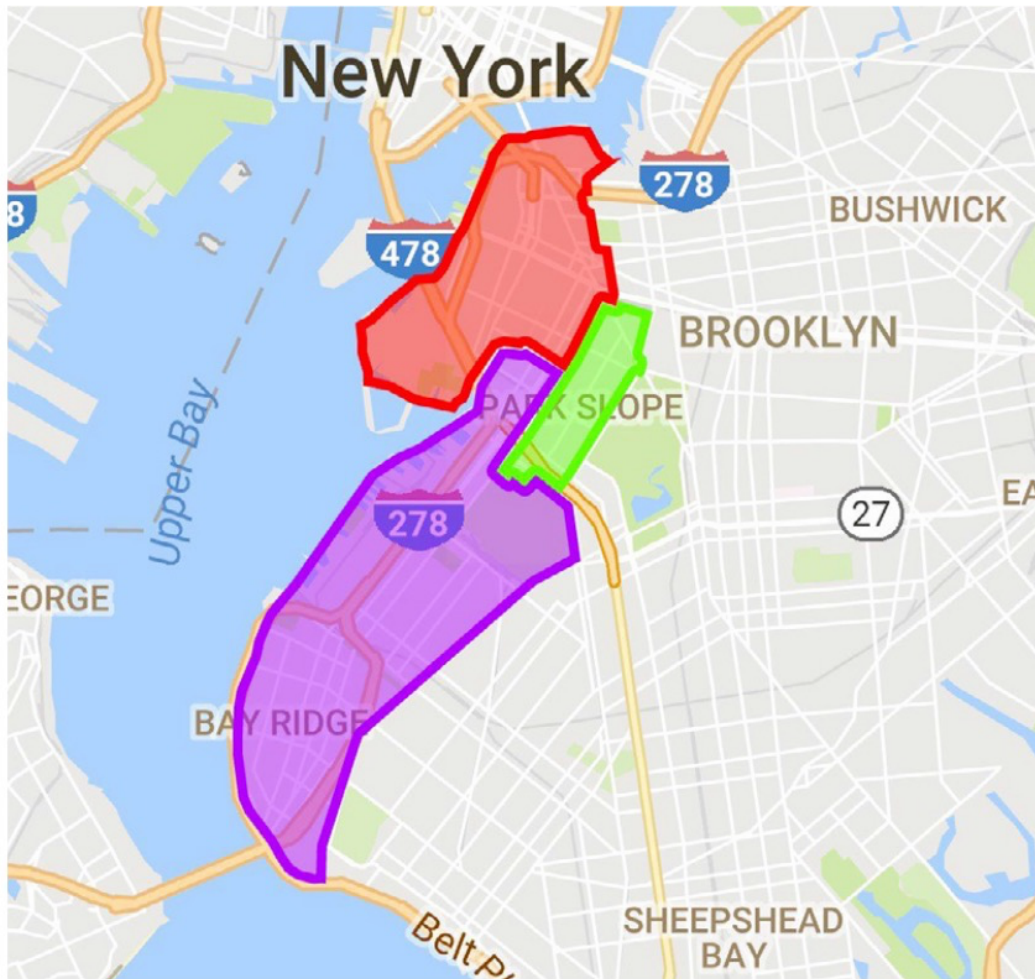
7.1 Brooklyn Microgrid

Brooklyn Microgrid (BMG) on urauurtava hanke, jonka tavoitteena on ollut luoda hajautettu, yhteisölähtöinen energiaverkko lohkoketjuteknologian ja uusiutuvien energialähteiden avulla. Sen käynnisti vuonna 2016 New Yorkin Brooklynissa sijaitseva startup-yritys LO3 Energy. (*Brooklyn Microgrid* 2019; Jadhav 2021.) Brooklyn Microgridin asukkaat voivat käydä kauppaa paikallisesti tuotetulla aurinkoenergialla. Energiantuotannon ja -kulutuksen reaaliaikainen mitataan älykkäillä sähkömittareilla ja tallennetaan lohkoketjuun. Älykkäitä

sopimuksia käyttämällä alusta automatisoi energiakaupan prosesseja, vähentää välikäsien tarvetta ja minimoi transaktiokustannuksia. Järjestelmä mahdollistaa myös dynaamisen hinnoittelun, jolloin energian hinnat heijastavat reaaliaikaisia kysyntä- ja tarjontaolosuhteita. (Jadhav 2021.)

Amerikkalainen LO3 Energy ja ConsenSys käynnistivät 2019 Trans Active Grid -hankkeen. Hankkeen tarkoituksena oli, että yhteisössä asuvat käyttäjät voivat osallistua yhteisön sisäisiin vertaissähkökauppoihin. Käyttäjät voisivat saada reaaliaikaisia tietoja, kuten sähköntuotantoa tai sähkönkulutusta, älykkäiden mittareiden avulla ja käyttää lohkoketjua sähköenergian myymiseen tai ostamiseen. Järjestelmän suunnittelussa oli ongelmia, käyttöliittymä ei ollut riittävän käyttäjätunnettu, käyttäjiä oli liian vähän ja yhteisön koko pieni. (Guo ym. 2023, 2.) Sen jälkeen LO3 Energyn johtama BMG-hanke käynnistyi ja toi mukaan lohkoketjuteknologian. Brooklyn Microgrid (BMG) koostuu New Yorkin Brooklynissa sijaitsevista mikroverkoista (Kuvio 25) ja sen ydinajatuksena on vertaisenergiakaupan mahdollistaminen (P2P) yhteisössä. Aurinkopaneeleilla omistavat asukkaat voivat myydä ylimääräisen energiansa suoraan naapureilleen lohkoketjuun perustuvan virtuaalisen kauppapaikan kautta (Mengelkamp ym. 2018, 876.)

Hanke koostuu kahdesta pääkomponentista: 1. Virtuaalisen yhteisön energiamaarkkina-alusta, joka alusta tarjoaa teknisen infrastruktuurin paikallisille sähkömarkkinoille. Se perustuu yksityiseen lohkoketjuun, jossa käytetään Tendermint-protokollaa. Sähkönmittaus tapahtuu TransActive Grid -älymittarilla (Kuvio 26). TransActive Grid -mittari asennetaan analogisen mittarin rinnalle, jolloin mittaukset voidaan aluksi todentaa analogisesti. 2. Fyysinen mikroverkko: Sähköinen mikroverkko rakennetaan nykyisen jakeluverkon lisäksi. Fyysinen mikroverkko toimii varaverkkona sähkökatkojen varalle. Irrottautumalla perinteisestä verkosta se voi toimia myös saareketilassa. Tällöin kriittiset laitokset (esim. sairaalat) saavat energiaa kiinteään hintaan. Fyysinen mikroverkko käsittää tällä hetkellä 10 kertaa 10 asuinkorttelia. (Mengelkamp ym. 2018, 876.)



Kuvio 25. BMG ulottuu kolmen eri verkkoyhtiön alueelle: the Borough Hall (punainen), the Park Slope (vihreä) ja the Bay Ridge (violetti) (Mengelkamp ym. 2018, 877).

Brooklyn Microgrid -hankkeen tulokset ovat olleet merkittäviä. Se on lisännyt osallistujensa energiaomavaraisuutta, heidän voidessa luottaa enemmän paikallisesti tuotettuun uusiutuvaan energiaan. Tämä pienentää niiden hiilijalanjälkeä, edistää puhtaiden energialähteiden käyttöä ja pienentää energiakustannuksia. Hanke on myös tarjonnut arvokasta tietoa hajautettujen energiajärjestelmien mahdollisuuksista edistää kestäviä energiakäytäntöjä ja yhteisön kestävyttä. (Mengelkamp ym. 2018, 878.)



Kuvio 26. Brooklyn Microgridin TransActive Grid-mittari yhteisön jäsenen kotona Brooklynissa (Cardwell 2017, 1).

BMG toimii LO3 Energyn omalla TransActive Grid -alustalla (älykkäät mittarit, lohkoketju ja hajautettu sovellus), joka helpottaa turvallisia ja läpinäkyviä energiakauppoja. Alusta tallentaa energian tuotanto- ja kulutustiedot, minkä ansiosta osallistujat voivat ostaa ja myydä energiahyvityksiä lähes reaaliaikaisesti paikallisessa mikroverkossaan. (Molly, 2017.)

BMG käyttää fyysisen energiavirran syöttämiseen pääasiassa perinteistä verkkoa, jota ylläpitää riippumaton järjestelmäoperaattori Con Edison, Inc. Fyysinen mikroverkko irrotetaan perinteisestä verkosta vain hätätilanteissa. Kaikki energiavirrat tapahtuvat verkkoinfrastruktuurissa, mutta tiedot siirretään virtuaalikerroksen kautta. Kulutus- ja tuotantotiedot siirretään osallistujien TransActive Grid -älymittareista heidän lohkoketjutileilleen. (Jadhav 2021.)

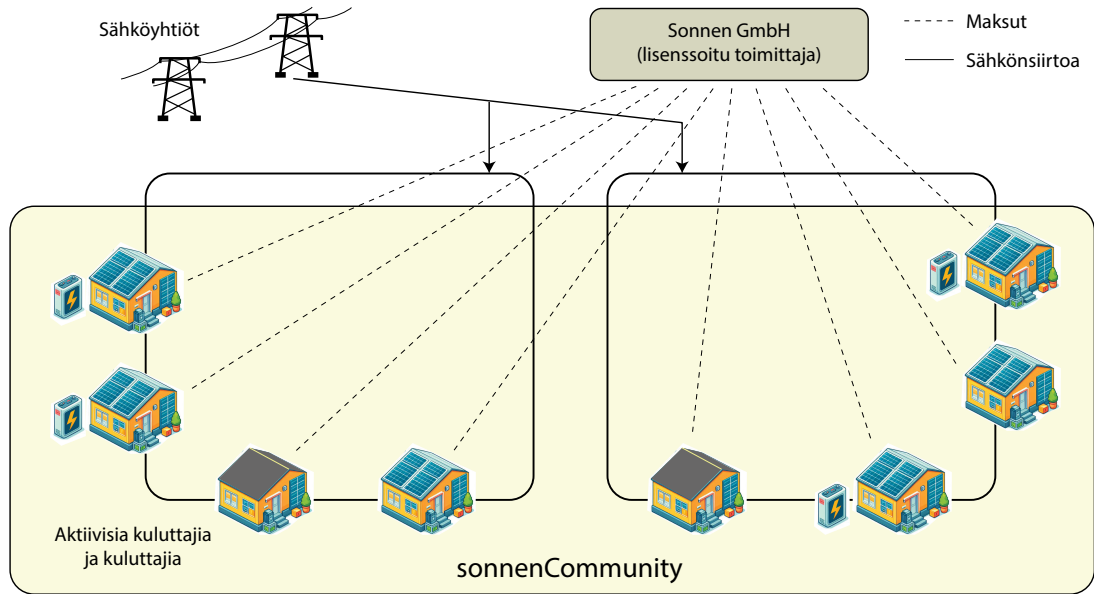
Lohkoketjuteknologia:	<ul style="list-style-type: none"> • Ethereum / Tendermint -protokolla
Ominaisuudet:	<ul style="list-style-type: none"> • Paikallinen energiakauppa • Reaaliaikaiset energiatiedot
Tulokset	<ul style="list-style-type: none"> • Parempi energiaomavaraisuus • Pienempi hiilijalanjälki • Lisääntynyt paikallinen uusiutuvan energian käyttö

Taulukko 3. Brooklyn Microgrid, tiivistelmä (Mengelkamp ym. 2018, 878; Molly, 2017; Jadhav 2021).

7.2 SonnenCommunity

SonnenCommunity on energiayhteisö, jonka tavoitteena on luoda hajautettu ja kohtuuhintainen energiajärjestelmä, joka keskittyy kotitalouksiin. Sen perusti Saksassa vuonna 2015 sonnen-yritys, josta tuli maan ensimmäinen lisensoitu toimittaja, joka luottaa ensisijaisesti pieniin hajautettuihin energiavaroihin. (Hansen ym. 2022, 1–5.) SonnenCommunity yhdistää kotitaloudet aurinkopaneeleilla ja sonnenin älykkäillä akkuvarastojärjestelmillä, jolloin ne voivat tuottaa, varastoida ja jakaa ylijäämäsähköä keskenään. Jäsenet voivat ostaa sonnenin akkujärjestelmiä alennettuun hintaan ja markkinoida ylijäämäenergiaansa suoraan, jolloin he saavat lisävoittoja syöttötariffien lisäksi. He maksavat myös huomattavasti alhaisempia hintoja sähköstä, jota he eivät tuota itse, verrattuna perinteisiin yleishyödyllisiin yhtiöihin. (Hansen ym. 2022, 5; *sonnenCommunity* 2015.) Maaliskuussa 2019 Royal Dutch Shell osti sonnen GmbH:n. Se on nyt Shellin kokonaan omistama tytäryhtiö ja kuuluu sen New Energies -divisioonaan. (Hansen, Darby, Sommer & Andor 2022, 3.)

SonnenCommunity toimii virtuaalisella alustalla, joka integroi akkuvarastojärjestelmät energiakauppaan (Kuvio 27). Jäsenet voivat varastoida ylimääräistä aurinkoenergiaa kotiansa akkuihin ja käyttää tai vaihtaa sitä tarpeen mukaan. Tämä ei ainoastaan auta tasapainottamaan energian tarjontaa ja kysyntää yhteisössä, vaan myös maksimoi uusiutuvien energialähteiden käytön. Järjestelmä on suunniteltu käyttäjäystävälliseksi, ja siinä on intuitiivinen käyttöliittymä, jonka avulla jäsenet voivat seurata energiantuotantoaan, kulutustaan ja kaupan käyntiään. (Hansen ym. 2022, 2-5.)



Kuvio 27. Sähkön ja rahan liikenne sonnenCommunity:ssä. Mukailtu alkuperäisestä kuvioista (Hansen ym. 2022, 4).

Tehokas itseoppiva ohjelmistoalusta seuraa reaaliaikaisesti jäsenten tuotanto- ja kulutustietoja ja tasapainottaa kysyntää ja tarjontaa yhteisössä. Yhdistämällä sääennusteet ja kulutustottumukset se pystyy ennustamaan tarkasti odotettavissa olevan energiantuotannon ja kysynnän, mikä tekee uusiutuvien energialähteiden ajoittaisesta luonteesta ennustettavampaa ja hallittavampaa. Saksassa sonnenCommunity tarjoaa kotitalouksille mahdollisuuden tulla omavaraisiksi energiantuottajiksi, itsenäistyä perinteisistä energialaitoksista ja osallistua aktiivisesti kestäväen energiatulevaisuuden muokkaamiseen. Yhteisö on kasvanut nopeasti perustamisestaan lähtien ja sen jäsenet eri puolilla maata hyötyvät puhtaasta, luotettavasta ja kohtuuhintaisesta energiasta. (sonnenCommunity 2024.)

SonnenCommunity-aloitteen tulokset ovat olleet erittäin myönteisiä. Jäsenet ovat raportoineet lisääntyneestä energiaomavaraisuudesta, jonka ansiosta he voivat luottaa vähemmän sähköverkkoon ja enemmän uusiutuviin energialähteisiinsä. Tämä on johtanut merkittäviin kustannussäästöihin sähkölaskuissa ja kannustanut kestävien energiakäytäntöjen käyttöönottoon. Lisäksi yhteisöllinen malli edistää jäsenten välistä yhteistyötä ja tukea, mikä edistää kollektiivista vastuuntuntoa ympäristön kestävydestä.

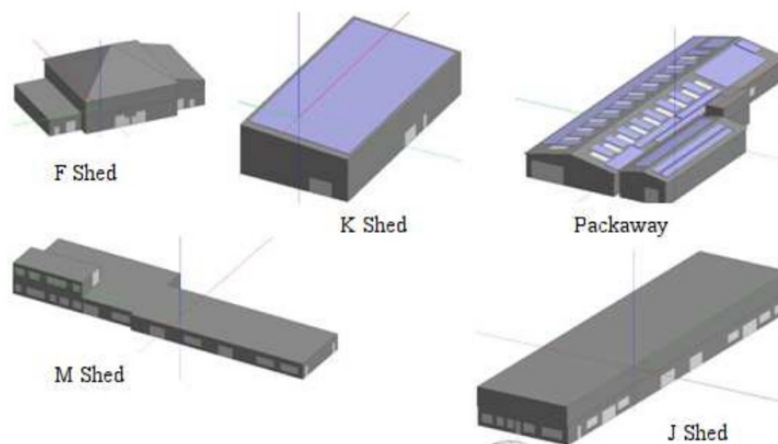
SonnenCommunityn menestys korostaa virtuaalisten energiayhteisöjen mahdollisuuksia edistää siirtymistä kohti kestävämpää ja joustavampaa energiajärjestelmää (Mishra, Singh, Misra & Singh 2023, 1).

Lohkoketjuteknologia:	<ul style="list-style-type: none"> • Hyperledger Fabric
Ominaisuudet:	<ul style="list-style-type: none"> • Virtuaalinen yhteisöalusta • Akkuvarastojen integrointi • Uusiutuvan energian kauppa
Tulokset	<ul style="list-style-type: none"> • Omavaraisuuden lisääntyminen • Energiakustannusten aleneminen • Kestävien energia-käytäntöjen edistäminen.

Taulukko 4. SonnenCommunity ominaisuudet, tiivistelmä (Mishra ym. 2023).

7.3 Milford Haven Port

Etelä-Walesin Milford Havenin satamassa toteutettiin lohkoketjupohjainen järjestelmä, joka mahdollistaa energian vaihdon ja reaaliaikaisen kaupan yhteisön sisällä (Alzahrani, Petri & Rezgui 2019, 3). Alueen aurinkovoimalan teho on noin 5 megawattia ja se sisältää noin 20000 paneelia. Milford Haven sataman energiayhteisö koostuu viidestä rakennuksesta (Kuvio 28, Taulukko 5). (Petri, Barati, Rezgui & Rana 2020, 10.)



Kuvio 28. Milford Haven sataman energiayhteisön rakennukset (Petri ym. 2020, 10).

Rakennus	Käyttötarkoitus	Erityispiirteet
K Shed	Pakastinyksikkö, kylmähuone	Aurinkopaneelit (50 kW)
M Shed	Sisävalaistus ja useita laitteita	-
A osa	Venekorjaamo, toimistotila, varasto/työpaja	-
B ja C osat	Varastotiloina	-
F Shed	Kalanjalostus, kalakonttien varastointi	-
J Shed	Vähittäismyymälä, kalankäsittely, varastot	Monimutkaiset sähköjärjestelmät, eri sidosryhmiä

Taulukko 5. Milford Haven sataman energiayhteisön rakennukset ja niiden käyttötarkoitukset (Petri ym. 2020, 10).

Milford Havenin sataman yhteisössä hyödynnetään älykkäitä sopimuksia energiakauppojen hallintaan (Taulukko 6). Lohkoketjuteknologian käytön on katsottu tarjoavan luotettavan ja väärentämisen estävän tallenteen kaikista liiketoimista, lisäksi läpinäkyvyyttä ja luottamusta yhteisön jäsenten välillä. Järjestelmä mahdollistaa myös energiantuotannon ja -kulutuksen reaaliaikaisen seurannan, jolloin osallistujat saavat ajantasaista tietoa energiankäytöstään. (Petri ym. 2020, 9–12.)

Yhteisön käyttämän järjestelyn tulokset ovat olleet lupaavia. Järjestelmä on parantanut energianjakelun tehokkuutta, vähentänyt siirtohäviöitä ja lisännyt energiainsinöörin turvallisuutta. Mahdollistamalla turvallisen ja läpinäkyvän energiakaupan järjestelmä on kannustanut uusiutuvien energialähteiden käyttöön, mikä on osaltaan vähentänyt hiilidioksidipäästöjä. (Petri ym. 2020, 9–12.)

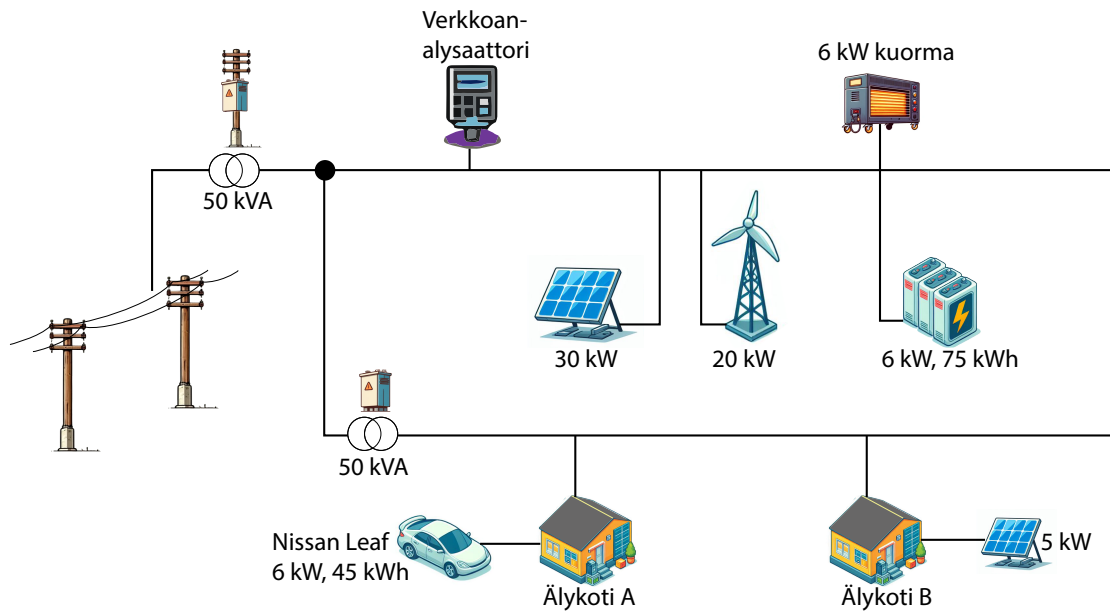
Lohkoketjuteknologia:	<ul style="list-style-type: none"> • Ethereum • Älypöytäsovellukset toteutettu Solidity:llä
Ominaisuudet:	<ul style="list-style-type: none"> • Älykkäät sopimukset energiakauppoja varten • Energian tuotannon ja kulutuksen reaaliaikainen seuranta • Energian tuotannon ja kulutuksen reaaliaikainen kauppa
Tulokset	<ul style="list-style-type: none"> • Energian jakelun tehokkuuden parantaminen, • Liiketoimien turvallisuuden lisääminen ja • Uusiutuvien energialähteiden käytön lisääminen.

Taulukko 6. Milford Haven sataman energiayhteisö, tiivistelmä (Petri ym. 2020, 9–12).

7.4 Kortright Centre Microgrid

Kortright Centre Microgrid (KCM) on Ontarion Vaughan:issa sijaitseva tutkimuslaitos. KCM:ssä on yli 50 kW uusiutuvan energian kapasiteettia, 100 kWh energiavarastoa, 3 sähköautojen latausasemaa sekä 2 älykotia (Kuvio 29). Kortright Centre Microgrid on reaali maailman mikroverkko (Taulukko 7), jota on käytetty testialustana lohkoketjupohjaisten energiakauppajärjestelmien toteuttamisessa ja arvioinnissa. (Saxena, Eng & Brookson 2020, 17.)

Mikroverkossa on tehty simuloituja tapaustutkimuksia, joissa on tutkittu muun muassa P2P-energiakauppaa, verkon ruuhkien lieventämistä sekä sähkökatkojen estämistä. Vertaisenergiakaupan markkinapaikka vähentää yhteisön kesän huippukuormitusta 109,96 kW:sta 52,29 kW:iin (vähennys 52 %), kun taas paikallinen uusiutuvan energian käyttö kasvaa 69 prosentista 93 prosenttiin. Tulokset osoittivat myös, että järjestelmän akkuvarastot kykenivät tukemaan jakeluverkon jännitettä, estäen jatkuvat alijännitteet sähkökatkosten aikana. (Saxena ym. 2020, 4.)



Kuvio 29. Kortright Centre mikroverkon kaaviokuva. Mukailtu alkuperäisestä kuvioista (Saxena ym. 2020, 17).

Reaalimaailman lohkoketjupohjainen TEF (transactive energy frameworks) on toteutettu Hyperledger Fabricin avulla. TEF on markkinapaikka, jossa mikroverkon energiantuottajat voivat tehdä tarjouksia ja käydä kauppaa energiasta. (Saxena ym. 2020, 4.)

Lohkoketjuteknologia:	<ul style="list-style-type: none"> • Hyperledger Fabric
Ominaisuudet:	<ul style="list-style-type: none"> • Älykkäät sopimukset • Sähkön vertaiskauppa • Mikroverkko
Tulokset	<ul style="list-style-type: none"> • Huippukysynnän väheneminen jopa 52 % • Kustannussäästöt jakeluverkkko-operaattoreille • Energiakaupan tehostuminen

Taulukko 7. Kortright Centre mikroverkko, tiivistelmä (Saxena ym. 2021).

8 Haasteet ja mahdollisuudet

8.1 Haasteet

Lohkoketju tarjoaa energiayhteisöille lukuisia mahdollisuuksia, mutta siihen liittyy myös merkittäviä haasteita (Borkovcová ym. 2022, 1–12). Lohkoketjun lupavista sovelluksista energia-alalla huolimatta useat haasteet estävät sen potentiaalin täysimääräisen hyödyntämisen. Näitä ovat muun muassa skaalautuvuusongelmat, järjestelmien toteuttamisen monimutkaisuus eri lohkaketjualustoilla sekä tarve standardeille ja mekanismeille yhteen toimivia lohkaketjuarkkitehtuureja varten. Tulevaisuuden tutkimussuuntauksissa olisi keskityttävä kehittämään tehokkaampia konsensusmekanismeja, jotka olisi räätälöity vuorovaikutukseen, luomaan standardeja yhteen toimivuudelle ja suunnittelemaan arvon talteenoton markkinamekanismeja. (Karumba, Sethuvenkatraman, Dedeoglu, Jurdak & Kanhere 2023; Koukaras ym. 2024.)

8.2 Transaktioiden määrä

Lohkoketjutransaktioiden määrän lisääntyessä voi järjestelmän tehokkuus kärsiä aiheuttaen viivettä, eikä se siten pysty aina vastaamaan energiakaupan tarpeisiin (Onyeka Okoye ym. 2020, 143778). Perinteisten lohkaketjujen alhaisen tehokkuuden ja suuren viiveen aiheuttamien puutteiden korjaamiseksi, ovat ketjun ulkopuoliset transaktiot kiinnostava ratkaisumahdollisuus. Lohkoketjun ulkopuolisilla transaktioilla voidaan siirtää rajoitettuja tietotyyppisiä lohkaketjun ylemmän ja alemman kerroksen välillä alemman kerroksen yksityisten tietojen eristämiseksi ja yksityisyyden varmistamiseksi. (Dong ym. 2022, 2.)

Pradhan ym. (2022, 2) esittelevät ratkaisun jossa sovelletaan kevyttä IOTA Tangle:a. , energiakaupan suunnitteluun. IOTA:n Tangle on avoin ja skaalautuva hajautettu pääkirja, joka on suunniteltu tukemaan kitkatonta tiedon ja arvon siirtoa. Tässä mallissa käytettäisiin DAG-pohjaista ratkaisua (Directed

Acyclic Graph), joka vähentää mikrotransaktioiden palkkiokustannuksia, mutta myös tarjoaa skaalautuvuutta, kvanttivarmennusta ja suurta transaktioiden kapasiteettia pienellä vahvistusviiveellä.

8.3 Konsensusmekanismien suuri energiantarve

Lohkoketjuteknologian energiankulutus, erityisesti PoW-konsensusmekanismeihin perustuvien teknologioiden, on kriittinen huolenaihe. PoW-mekanismi vaatii huomattavia laskentaponnistuksia transaktioiden validoimiseksi ja verkon turvaamiseksi, mikä johtaa merkittävään energiankulutukseen. Esimerkiksi pelkäävät Bitcoinin louhinnan on raportoitu kuluttavan energiaa valtavasti. PoW-lohkoketjujen energiankulutus on kiistatta valtava suhteessa niiden tekniseen suorituskykyyn, mutta niiden kulutus ei kasva merkittävästi, vaikka ne käsittelisivät enemmän transaktioita. (Sedlmeir, Buhl, Fridgen & Keller 2020, 1–8.)

Lohkoketjutoiminnot, erityisesti ne, joissa käytetään Proof of Work (PoW) -konsensusmekanismeja, voivat olla energiantensiivisiä. Tämä on ironista, kun otetaan huomioon, että teknologiaa käytetään kestävien energiakäytäntöjen edistämiseen. Energiatehokkaiden konsensusmekanismien löytäminen on merkittävä haaste. (Nour, Chaves-Avila & Sanchez-Miralles 2022, 9.) PoW:hen liittyvän suuren energiankulutuksen vuoksi on otettu käyttöön vaihtoehtoisia konsensusmekanismeja, kuten Proof of Stake (PoS) ja sen johdannainen Proof of Authority (PoA). Näillä uusilla konsensusmekanismeilla pyritään vähentämään energiankulutusta jakamalla validointioikeudet laskentatehon sijasta polettien osuuden tai omistuksen perusteella. Vaikka nämä vaihtoehdot ovatkin lupaavia, niiden on tasapainotettava keskenään energiätehokkuus, lohkoketjuverkon oikeudenmukaisuus ja luotettavuus. Simulointikokeiden tulokset osoittavat, että energiankulutusta voidaan vähentää yli 75 prosenttia pelkäästään siirtymällä PoS-mekanismiin. (Zhang & Chan 2020, 1.)

Ethereum Merge (15.9.2022) oli tapahtuma, joka siirsi Ethereum verkon PoW -konsensusmekanismista PoS -konsensusmekanismiin. Ennen sulautumista Ethereumin energiankulutuksen arvioitiin olevan noin 46–93 TWh vuodessa.

Crypto Carbon Ratings Institute (CCRI) raportoi, että Ethereumin sähkönkulutus väheni sulautumisen jälkeen yli 99,988 prosenttia. (Ho, 2023, 1.) Ethereumin vuotuinen sähkönkulutus on nykyään noin 0,0026 TWh (Ethereum.org 2024).

Vertaisverkon yksittäisen tapahtuman ja älykkäiden sopimusten energiankulutus vaihtelee huomattavasti niiden monimutkaisuuden, verkon koon ja käytetyn tekniikan vuoksi (Taulukko 8). Hyperledger Fabric verkossa yhden tapahtuman energian kulutukseksi on arvioitu 1 J, kun taas Ethereum solmu, joka ei louhi, kuluttaa noin 0,1 J yhtä tapahtumaa kohden. (Sedlmeir ym. 2020, 606). Älykkäiden sopimusten käyttöönotto lisää aina energian kulutusta (Taulukko 9). Eräessä tutkimuksessa älykkäiden sopimusten lisääminen Ethereum PoW-verkoon lisäsi käytössä olleen järjestelmän tehon tarpeen 156 watista 160 wattiin, eli 2 %. Ethereum PoA verkossa nousua oli 13,9 %, eli 63,9 watista 72,1 wattiin. (Saingre, 2021, 87.)

Lohkoketju	Energian kulutus
Hyperledger Fabric	1 J / tapahtuma
Ethereum (ei louhintaa)	0,1 J / tapahtuma

Taulukko 8. Eri lohkoketjujen energian kulutus yhtä tapahtumaa kohden (Sedlmeir ym. 2020, 606).

Älykkään sopimuksen energiankulutuksen yhdessä solmussa arvioitiin olevan 29,47 J. Mikäli tämä sopimus vahvistetaan jokaisessa Ethereum verkon solussa (11 000 kpl), olisi sen energian kulutus 10×10^5 J, eli noin 0,027 kWh. Ethereum verkossa käsitellään vuodessa yli 140 miljoonaa sopimuskutsua, joiden käsittely globaalisti kuluu energiaa $1,67 \times 10^{13}$ J, eli yli 4,6 GWh. Tässä laskelmassa on käytetty marraskuun 2021 mukaista tilannetta, jolloin Ethereum verkossa oli 11 000 aktiivista jäsentä. (Saingre, 2021, 93–94.) Aktiivisten jäsenten määrä on kuitenkin laskenut huomattavasti tuolloisesta tilanteesta ja tämän hetkinen määrä jossakin 6 500 (etherscan.io, 2024) ja 4 000 välillä (ethernodes.org, 2024).

Konsensusmekanismi	Älykkään sopimuksen vaikutus energian kulutukseen
Ethereum PoW	156 W -> 160 W (+2%)
Ethereum PoA	63,9 W -> 72,1 W (+13,9%)

Taulukko 9. Älykkään sopimuksen vaikutus lohkoketjun energian kulutukseen eri konsensusmekanismeilla (Saingre 2021, 87).

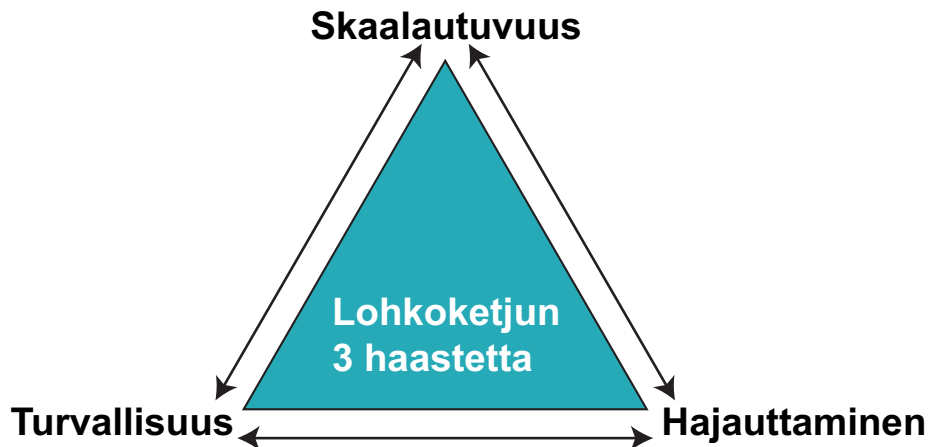
8.4 Skaalautuvuus

Yksi tärkeimmistä haasteista on lohkoketjujärjestelmien skaalautuvuus. Kun transaktioiden määrä kasvaa, lohkoketjuverkon on pystyttävä käsittelemään kasvavaa kysyntää suorituskyvystä tinkimättä (Aldoubaee ym. 2023, 774). Tämä on erityisen tärkeää energiajärjestelmissä, joissa reaaliaikaiset transaktiot ovat ratkaisevan tärkeitä. Bitcoinin ja Ethereumin kaltaiset lohkoketjuverkot kamppailevat usein alhaisen läpäisykyvyn ja suuren transaktioviiveen kanssa (Alshahrani ym. 2023, 2). Viive aiheuttaa helposti pullonkaulan sovelluksissa, joissa kirjattavia tapahtumia syntyy korkealla taajuudella, kuten esimerkiksi energiaverkoissa (Nepal ym. 2022, 11). Tämä rajallinen transaktioiden käsittelykapasiteetti voi haitata lohkoketjupohjaisten energiakauppa-alustojen tehokkuutta (D. Khan, Low & Hashmani 2021, 2; Westphall & Martina 2022, 1).

Skaalautuvuusongelmien voidaan sanoa johtuvan lohkojen rajallisesta koosta ja lohkoketjun mekanismista. Ongelman vaikutus kasvaa transaktioiden ja siten myös verkkoa ylläpitävien solmujen määrän kasvaessa. Samalla kasvaa transaktion kulkemiseen tarvittavien vaiheiden määrä ja täyden konsensuksen saavuttaminen jokaisessa solmussa hidastaa prosessia. (Aldoubaee, Hassan & Rahim 2023, 774–775.) Julkiset lohkoketjut vaativatkin aina paljon laskentatehoa ja tallennustilaa, sekä tehokkaan internet yhteyden (D. Khan ym. 2021, 2).

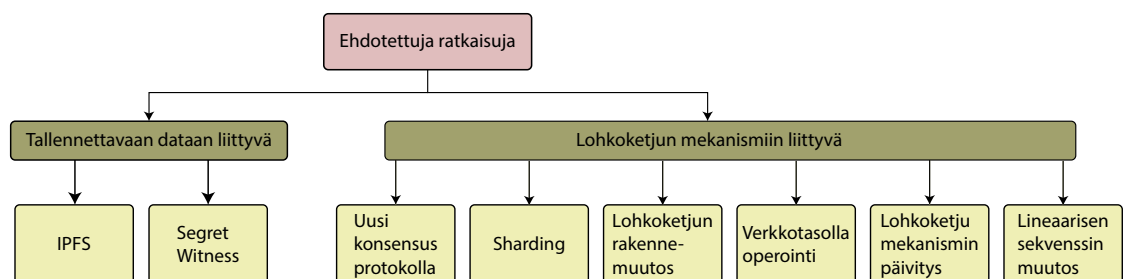
Skaalautuvuusongelman ratkaisu ei ole helppoa, koska se johtuu lohkoketjun perimmäisistä ominaisuuksista, hajauttamisesta ja turvallisuudesta. Tämän vuoksi joudutaan tasapainoilemaan näiden ominaisuuksien välillä (Kuvio 30).

Ehdotetun ratkaisun on tarjottava kompromissi skaalautuvuuden, hajauttamisen ja turvallisuuden välillä. Näiden ominaisuuksien tasapainottaminen voi olla haastavaa, mutta tärkeää päätöksiä tehtäessä. (D. Khan ym. 2021, 2.)



Kuvio 30. Lohkoketjun skaalautuvuuden haasteet muodostuvat turvallisuuden ja hajauttamisen tasapainottamisesta. Mukailtu alkuperäisestä kuvio-osta (D. Khan ym. 2021, 2).

Erilaiset Sharding-tekniikat pyrkivät osaltaan parantamaan skaalautuvuutta hajauttamalla työkuormaa. Suurin osa ratkaisuista on vielä konseptivaiheessa ja testaus todellisissa tapauksissa on vielä kesken. Lohkoketjun skaalautuvuusongelma on merkittävä este sen laajamittaiselle käyttöönotolle. Lohkoketjujen laajamittaisen käytön mahdollistamiseksi on kehitettävä lisää tutkimusta ja parempia ratkaisuja. (D. Khan ym. 2021, 782.)



Kuvio 31. Lohkoketjun skaalautuvuusongelmiin on kehitteillä useita eri ratkaisuja, jotka voidaan luokitella joko tallennustilaan tai lohkoketjun mekanismiin vaikuttaviksi. Mukailtu alkuperäisestä kuvio-osta (Aldoubae ym. 2023, 778).

Lohkoketjujen skaalautuvuusongelmien ratkaisemiseksi on ehdotettu useita innovatiivisia ratkaisuja (Kuvio 31), joista Aldoubaee ym. (2023, 778–779) luettelevat mm. seuraavat:

- Sharding: Tässä tekniikassa lohkoketjuverkko jaetaan pienempiin osioihin, niin sanottuihin "shardeihin", joista kukin pystyy käsittelemään transaktioita itsenäisesti, mikä lisää järjestelmän kokonaiskapasiteettia.
- Layer 2 -ratkaisut: Nämä ratkaisut, kuten tilakanavat ja Lightning Network, toimivat lohkoketjun päällä ja käsittelevät transaktioita nopeammin ja tehokkaammin. Ne auttavat purkamaan transaktiokuormitusta päälohkoketjusta.
- Uudet konsensusmekanismit: Vaihtoehdot PoW:lle, kuten Proof of Stake (PoS) ja delegoitu PoS, tarjoavat energiatehokkaampia transaktioiden validointiprosesseja, jotka voivat skaalautua tehokkaammin ilman PoW:hen liittyviä suuria energiakustannuksia.

8.5 Sääntely

Energia-ala on vahvasti säännelty, ja lohkoketjuteknologian käyttöönotto herättää useita sääntelyyn ja lainsäädäntöön liittyviä huolenaiheita. Tarvitaan selkeää sääntelyä, joka tukee lohkoketjun käyttöä ja varmistaa samalla kuluttajan-suojan, yksityisyyden suojan ja voimassa olevien lakien noudattamisen. (Ahl ym. 2022, 1; Karumba ym. 2023, 11; Nepal ym. 2022, 50.)

Yksi merkittävistä haasteista lohkoketjun käyttöönotossa energia-alalla on GDPR:n noudattamisen varmistaminen. Lohkoketjun muuttumaton luonne voi olla ristiriidassa GDPR:n vaatimusten, kuten oikeuden tietojen poistamiseen, kanssa. Tutkimusten mukaan lohkoketju voidaan kuitenkin suunnitella GDPR:n mukaiseksi käyttämällä erityisiä menetelmiä, jotka sisältävät sisäänrakennetun yksityisyyden suojan. (Ansar, Ahmed, Malik, Helfert & Kim 2024.)

Lohkoketjun integrointi energia-alalle ei ole ongelmattonta. Sääntelyyn liittyviin esteisiin kuuluu tarve selkeisiin ohjeisiin, joissa käsitellään energijärjestelmän eri toimijoiden vastuita ja markkinoiden järjestämistä. Tarvitaan kipeästi säännöksiä, jotka kohdistuvat erityisesti lohkoketjusovelluksiin, jotta voidaan varmistaa, että ne ovat turvallisia, tehokkaita ja hyödyllisiä kaikille sidosryhmille. (Roth ym. 2022.)

Tulevaisuutta ajatellen Euroopan unioni todennäköisesti jatkaa sellaisten säännösten kehittämistä ja tarkentamista, jotka helpottavat lohkoketjun käyttöönottoa energijärjestelmissä ja varmistavat samalla, että ne ovat GDPR:n kaltaisten laajempien sääntelykehysten mukaisia. Tämä edellyttää lohkoketjusovellusten innovoinnin tasapainottamista tietosuojan, turvallisuuden ja järjestelmän luotavuuden kanssa. (Amenta, Riva Sanseverino & Stagnaro 2021.)

Lohkoketjun sääntelyä energia-alalla Euroopassa kehitetään parhaillaan ja painopisteenä on teknologisten innovaatioiden sekä nykyisten oikeudellisten puitteiden yhteensovittaminen. Lohkoketjuteknologian kehittyessä myös sen käyttöä säätelevät säädökset kehittyvät edelleen, jotta energia-ala voi hyödyntää tämän teknologian etuja ja samalla lieventää siihen liittyviä riskejä. (Amenta ym. 2021; Cui ym. 2023; Roth ym. 2022.)

8.6 Yhteentoimivuus

Jotta lohkoketju voisi toimia tehokkaasti energiayhteisöissä, sen on kyettävä toimimaan vuorovaikutuksessa muiden järjestelmien ja teknologioiden kanssa. Koska erilaiset sovellukset edellyttävät erilaisia tarpeita ja ominaisuuksia, odotetaan jatkossa kehitettävän erilaisia lohkoketjualustoja helpottamaan lohkoketjuverkkojen välistä yhteyttä. Eri lohkoketjujen kykyä vaihtaa tietoja ilman kolmatta osapuolta kutsutaan yhteentoimivuudeksi. Yhteentoimivuus eri lohkoketjualustojen välillä ja olemassa olevan energiainfrastruktuurin kanssa on välttämätöntä (Kuvio 32), jotta transaktiot ja integrointi sujuisivat saumattomasti. (Ahl ym. 2022, 4; Choobineh ym. 2022, 5; Nepal ym. 2022, 16.)



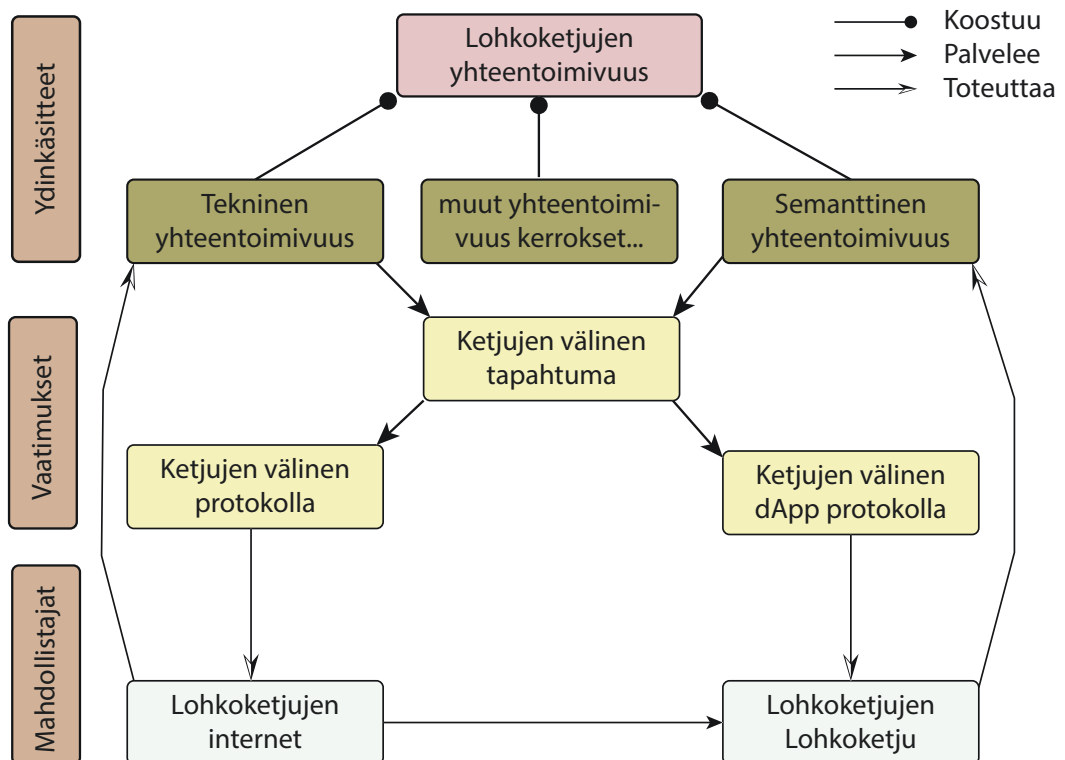
Kuvio 32. Yhteentoimiva sähkölohkoketju, joka yhdistää mikroverkon, voimalaitoksen, teollisuuskuorman ja sähköautojen alustat toisiinsa. Mukailtu alkuperäisestä kuvioista (Choobineh ym. 2022, 6).

Lohkoketjujen yhteentoimivuus mahdollistaa sen, että pystytään yhdistämään yhä hajanaisempaa lohkoketjuekosysteemiä ja hyödyntämään kunkin erillisen ketjun ainutlaatuisia etuja. Kun erilaiset toimialat ottavat lohkoketjuteknologioita käyttöön, ne tarvitsevat väistämättä järjestelmiä, joilla voidaan vaihtaa ja validoida tietoja eri ketjujen välillä. Esimerkiksi yhtä lohkoketjua käyttävä logistiikkayritys saattaa joutua vahvistamaan tapahtumia toista lohkoketjua käyttävän rahoituslaitoksen kanssa. Jos nämä järjestelmät eivät pysty toimimaan yhdessä, lohkoketjujen laajamittainen käyttö voi olla haastavaa. (EU Blockchain Observatory and Forum 2023, 5–6.)

Yhteentoimivuus mahdollistaa monipuolisen ja demokraattisen digitaalisen ympäristön, jossa kaikilla lohkoketjuilla on niiden koosta tai käyttäjäkunnasta riippumatta mahdollisuus osallistua maailmanlaajuiseen arvoketjuun. Tämä edistää

erilaisten ratkaisujen innovointia sekä luo vanhemman ja kestävämmän lohkoketjuekosysteemiin. Toinen merkittävä yhteentoimivuuden hyöty on parantunut turvallisuus. Yhteentoimivuuden puute pakottaa käyttäjät usein tallentamaan omaisuutensa useille alustoille, joilla kullakin on omat turvallisuusoletuksensa ja haavoittuvuutensa. Yhteentoimivuus voi virtaviivaistaa omaisuudenhallintaa, sillä sen avulla käyttäjät voivat hallita ja siirtää omaisuuttaan eri ketjuissa turvallisesti ja tehokkaasti. (EU Blockchain Observatory and Forum 2023, 5–6.)

Lohkoketjujen yhteentoimivuuden ratkaiseminen on tärkeää, mutta samalla myös haastavaa. Haasteita aiheuttavat ratkaisuiden tekninen monimutkaisuus, modulaarisuudesta johtuvat luontaiset turvallisuusongelmat ja tarve säilyttää hajautettu toiminta samalla kun edistetään yhteentoimivuutta. Teknisiä monimutkaisuuksia ovat esimerkiksi: 1. transaktioiden lopullisuuden varmistaminen eri ketjuissa, 2. ketjujen välisen älysopimusten toteutuksen hallinta ja 3. tietojen eheyden säilyttäminen ketjujen välisen viestinnän aikana. (EU Blockchain Observatory and Forum 2023, 5–6.)



Kuvio 33. Yhteentoimivuuden toteuttamistapoja. Mukailtu alkuperäisestä kuvio-osta (EU Blockchain Observatory and Forum 2023, 7–8).

Lohkoketjujen yhteentoimivuus voidaan toteuttaa usealla eri tavalla (Kuvio 33), kuten esimerkiksi ketjujen välisellä yhteentoimivuudella, protokollien ja tietojen yhteentoimivuudella, sekä älykkäiden sopimusten yhteentoimivuudella. Ketjujen välinen yhteentoimivuus liittyy sellaisten protokollien, teknologioiden ja standardien luomiseen, jotka mahdollistavat tiedon siirron eri lohkoketjujen välillä ilman keskitettyjä pörssejä tai välittäjiä (S. Khan, Amin, Azar & Aslam 2021, 116675). Ketjujen välinen yhteentoimivuus luo hyötyä tarjoamalla hajautetuille sovelluksille uudenlaisia mahdollisuuksia toimia erilaisten lohkoketjualustojen kanssa. Turvallisen lohkoketjujen välinen yhteentoimivuus vaatii, että pääketju on sivuketjujen logiikan mitätöiville turvallisuusrikkomuksille riittävän suojattu. (Belchior, Vasconcelos, Guerreiro & Correia 2021, 22.)

Lohkoketjuverkoissa käytetään usein erilaisia protokollia, jotka sisältävät erilaisia konsensusmekanismeja, tietorakenteita ja transaktiomuotoja. Protokollien yhteentoimivuus tarjoaa eri lohkoketjuille valmiudet yhteensopivien protokollien luomiseen. Prosessi edellyttää standardiprotokollien ja -rajapintojen kehittämistä eri lohkoketjujärjestelmien välistä viestintää varten. (EU Blockchain Observatory and Forum 2023, 7). Ketjujen välisten viestintäprotokollien suunnittelu on haasteellista, koska eri lohkoketjuissa voidaan käyttää erilaisia konsensusprotokollia, lohkokokoja, vahvistusaikoja tai verkkomalleja (G. Wang, Wang & Chen 2023, 1).

Tietojen yhteentoimivuus tarkoittaa sellaisten protokollien, tietomallien ja tietojen kartoitusmekanismien luomista, jotka helpottavat saumatonta tietojen vaihtoa eri lohkoketjuverkkojen välillä. Älykkäiden sopimusten yhteentoimivuudella pyritään virtaviivaistamaan älykkäiden sopimusten toteuttamista ja sitouttamista eri lohkoketjuverkoissa. Prosessi edellyttää sellaisten vakiintuneiden protokollien, standardien ja/tai siltojen luomista, jotka helpottavat älykkäiden sopimusten toteuttamista useissa ketjuissa ja kykyä toimia yhdessä toistensa kanssa. (EU Blockchain Observatory and Forum 2023, 8.)

8.7 Turvallisuus

Lohkoketju on tunnettu turvallisuusominaisuuksistaan, mutta teknologian hajautettu luonne aiheuttaa ainutlaatuisia turvallisuushaasteita (Kuvio 34). Käyttäjätietojen yksityisyyden varmistaminen ja verkon suojaaminen verkkohyökkäyksiltä ovat huolenaiheita, jotka on ratkaistava. (T. Wang, Hua, Wei & Cao 2022, 11.)



Kuvio 34. Energiasiirtymään sovellettavan lohkoketjuteknologian vaatimukset. Mukailtu alkuperäisestä kuvioista (Fulli ym. 2022, 4).

Huolimatta lohkoketjujen energiavaihdantaan tuomista eduista, on edelleen ongelmia, jotka haittaavat niiden käytännön soveltamista. Yksi suurimmista on tietosuoja. Kun käyttäjien kulutus- ja tuotantotietoja on kirjattu lohkoketjuun, ei niitä voida enää poistaa. Vaikka lohkoketjujen tietosuojaan alalla on tehty erilaisia lupaavia ponnisteluja, tietojen poistaminen pääkirjasta on edelleen merkittävä

ongelma prosessin toteuttamiskelpoisuuden kannalta (K. Li ym. 2021, 1), etenkin kun otetaan huomioon henkilötietojen suoja koskevat uudet lainsäädännölliset normit ((EU) 2016/679, 2016). Asukkaiden yksityisyyteen liittyvät huolenaiheet eivät kuitenkaan koske julkisia rakennuksia ja tiloja. Sitä vastoin näiden tietojen julkistaminen voi olla suuri etu sekä yhteiskunnalle että julkisille laitoksille. (Morrison 2018, 62.)

Sopivien markkinamallien ja liiketoimintamallien kehittäminen, joilla lohkoketjuteknologiaa voidaan hyödyntää energiayhteisöissä, on haasteellista. Näiden mallien on vastattava lohkoketjujen hajautettua ja läpinäkyvää luonnetta ja oltava samalla taloudellisesti kannattavia. Jotta lohkoketjupohjaiset energiajärjestelmät menestyisivät, on kuluttajien hyväksyttävä ja omaksuttava ne. Kuluttajien kannustaminen osallistumaan ja luottamaan näihin uusiin järjestelmiin on haaste, joka edellyttää koulutusta ja teknologian hyötyjen osoittamista. (Ahl ym. 2022, 2–4.)

Lohkoketjusovellusten turvallisuus edellyttää kattavien strategioiden kehittämistä kyberuhkien varalle ja sähkönsaannin varmistamiseksi. Ratkaisevan tärkeyttä on myös edelleen kehittää mekanismeja, joilla turvataan tietoturva ja tietojen eheys. Tarkoilla tiedonjakokäytännöillä tulee rajoittaa tiedonsaantia vain siihen, mikä on tarpeen lohkoketjupohjaisten palvelujen aktivoimiseksi. Lisäksi tietosuoja- ja kyberturvallisuustoimenpiteiden integroinnin virtaviivaistamisella parannetaan järjestelmän kokonaisturvallisuutta vaarantamatta toiminnallisuutta tai käyttäjäkokemusta. Näiden vaatimusten toteuttaminen parantaa lohkoketjutransaktioiden turvallisuutta ja edistää niiden toiminnan kestävyttä. (Fulli ym. 2021, 3.)

Nykyaikaisten televiestintäverkkojen ja Internetin kestävyttä ja turvallisuutta on arvioitava tarkasti, erityisesti kyberturvallisuuden näkökulmasta, kun otetaan huomioon energian digitalisoitumisen vaikutukset. Arvioinnin olisi ulotuttava lohkoketjuteknologioita tukevan perusinfrastruktuurin kestävyteen, mukaan lukien lohkoketjujen ydininfrastruktuurin ja loppukäyttäjäsovellusten ja -laitteiden ky-

berturvallisuuden sertifiointi. Lohkoketjuratkaisujen suunnittelussa on myös olennaisen tärkeää käyttää vahvoja todennusjärjestelmiä, sillä ne varmistavat, että pääsyä verkkoon ja tietoihin valvotaan turvallisesti. (Fulli ym. 2021, 3.)

9 Yhteenveto

Tässä työssä esiteltyjen energiayhteisösovellusten ja virtuaalisten voimalaitosten mallit tarjoavat ratkaisuja hajautettujen energiavarojen hallintaan ja käytön optimointiin, pyrkien samalla parantamaan sähköverkon vakautta ja edistämään uusiutuvan energian käyttöä. Virtuaaliset voimalaitokset kokoavat hajautettuja energiavarantoja ja osallistuvat aktiivisesti sähkömarkkinoille, kun taas paikalliset mallit, kuten Brooklyn Microgrid, keskittyvät uusiutuvan energian jakamiseen yhteisöissä ja tukevat paikallista omavaraisuutta. Näissä käytettyjen lohkoketjusovelluksien kokemuksia ja niistä tehtyjä havaintoja voidaan hyödyntää suunniteltaessa Älykkäät energiayhteisöt hankkeen omaa lohkoketjusovellusta.

Lohkoketjuilla toteutettavissa vertaisverkoissa tapahtuva yhteisön sisäinen kaupankäynti on mahdollista toteuttaa älykkäillä sopimuksilla ja niiden käyttäminen pystyy tuottamaan taloudellista hyötyä sekä tehostamaan yhteisön energian kulutusta. Reaalimaailman testeissä törmättiin usein lohkoketjuverkon skaalautuvuus ongelmaan ja kuinka paljon käytössä olevien solmujen koko vaikutti verkossa tapahtuvan tietoliikenteen määrään. Useimpien energiayhteisöiden kohdalla tämä ei välttämättä tule muodostamaan ongelmaa, mikäli käytetään yksityisiä lohkoketjuja julkisten sijaan. Tulokset osoittavat, että valmista, edes useimmille energiayhteisöille sopivaa ratkaisua ei ole vielä saatavilla, vaan että kehitystyötä on vielä jatkettava. Kehitystyössä on kiinnitettävä suurta huomiota erityisesti sovellusten energiatehokkuuteen ja tietosuojaan.

Lohkoketjuteknologialla on paljon annettavaa näyttöön perustuvan päätöksenteon tukemisessa ja sujuvoittamisessa kestävän energian alalla. Perinteisesti suurin osa maailman rahoitus-, energia- ja muista operaatioista tapahtuu pankkien ja markkinatoimijoiden kaltaisten välittäjien avulla. Lohkoketju poistaa

tarpeen tällaisilta luotetuilta kolmansilta osapuolilta, jotka valvovat ja validoivat tietojen ja arvojen vaihtoa. Lisäksi lohkoketjuun tallennetut transaktiot voidaan tarkistaa riippumattomasti. Laittomat transaktiot havaitaan ja suljetaan automaattisesti pois lohkoketjusta, jolloin asianomaisten osapuolten on hankalaa toteuttaa haitallisia toimia. Lohkoketjuun kirjattuja tietoja on myös lähes mahdollista muuttaa tai peukaloida.

Energia- ja digitaaliteollisuus on selvästi kiinnostunut hyödyntämään lohkoketjujen mahdollisuuksia. Pilottihankkeita ja käyttökohteita on useita ympäri Eurooppaa. Teknologinen suorituskyky ja skaalautuvuus ovat jo sillä tasolla, että näiden teollisuudenalojen on mahdollista hyödyntää lohkoketjuja. Kuluttajat eivät kuitenkaan ole vielä täysin mukana digitaalisissa energiahankkeissa ja riippumattomilla yhdistäjillä tai koordinoitupalvelun tarjoajilla (aggregaattoreilla) on edelleen markkinoille pääsyn esteitä. Lohkoketjujen kestävyys ja energiatalouden jälki ahkeran keskustelun aiheena, mutta sen arvioinnissa on vielä puutteita.

Energiajärjestelmän ydintoimintoihin, kuten esimerkiksi fyysiseen sähköjakaaluun liittyvät lohkoketjusovellukset, vaativat vielä kehitystyötä. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että riittävät takeet turvallisuudesta, sertifiointista ja standardoinnista puuttuvat. Lohkoketjulla on paljon potentiaalia toimia energiayhteisön hajautettuna ajurina. Lohkoketju näyttää soveltuvan tukemaan energiakauppaa paikallisilla tai laajemmilla markkinoilla, energianhallintaa ja joustopalvelujen tarjoamista sekä useita sertifiointi- ja laskutusprosesseja. Riittävä ja yhteentoimiva älykäs mittausinfrastrukturi on välttämätön edellytys energiayhteisöjen lohkoketjupalvelujen ja vertaisverkkokaupan aktivoimiseksi.

Lähteet

- Abdella, J., & Shuaib, K. 2018. Peer to Peer Distributed Energy Trading in Smart Grids: A Survey. *Energies*, 11(6), Article 6. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/en11061560>.
- Ahl, A., Goto, M., Yarime, M., Tanaka, K., & Sagawa, D. 2022. Challenges and opportunities of blockchain energy applications: Interrelatedness among technological, economic, social, environmental, and institutional dimensions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, 112623. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112623>.
- Alanne, K., & Saari, A. 2006. Distributed energy generation and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(6), 539–558. . Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.11.004>.
- Alchemy, 2024. List of 64 Blockchains. <https://www.alchemy.com/top/blockchains>. 16.4.2024.
- Aldoubae, A., Hassan, N. H., & Rahim, F. A. 2023. A Systematic Review on Blockchain Scalability. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 14(9). Lampung: Utan Kayu Publishing. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0140981>.
- Alshahrani, H., Islam, N., Syed, D., Sulaiman, A., Al Reshan, M. S., Rajab, K., Shaikh, A., Shuja-Uddin, J., & Soomro, A. 2023. Sustainability in Blockchain: A Systematic Literature Review on Scalability and Power Consumption Issues. *Energies*, 16(3), Article 3. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/en16031510>.
- Alzahrani, A., Petri, I., & Rezgui, Y. 2019. Analysis and simulation of smart energy clusters and energy value chain for fish processing industries. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.09.022>.
- Amenta, C., Riva Sanseverino, E., & Stagnaro, C. 2021. Regulating blockchain for sustainability? The critical relationship between digital innovation, regulation, and electricity governance. *Energy Research & Social Science*, 76, 102060. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102060>.
- Ansar, K., Ahmed, M., Malik, U. R., Helfert, M., & Kim, J. 2024. Blockchain based general data protection regulation compliant data breach detection system. *PeerJ Computer Science*, 10, e1882. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1882>.
- Bashir, I. 2023. *Mastering Blockchain: Inner workings of blockchain, from cryptography and decentralized identities, to DeFi, NFTs and Web3*. Birmingham: Packt Publishing Ltd.
- Belchior, R., Vasconcelos, A., Guerreiro, S., & Correia, M. 2021. A Survey on Blockchain Interoperability: Past, Present, and Future Trends. *ACM Computing Surveys*, 54(8), 168:1–168:41. New York: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3471140>.
- Blomqvist, K., Kuittinen, V., & Räsänen, N. 2023. Energiayhteisöt Pohjois-Karjalassa: Kommunikoiva energia -hankkeen kehittämistyön tuloksia. Joensuu: Karelia-ammattikorkeakoulu. <http://www.theseus.fi/handle/10024/816895>.

- Borkovcová, A., Černá, M., & Sokolová, M. 2022. Blockchain in the Energy Sector—Systematic Review. *Sustainability*, 14(22), Article 22. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/su142214793>.
- Boumaiza, A., & Sanfilippo, A. 2024. A Testing Framework for Blockchain-Based Energy Trade Microgrids Applications. *IEEE Access*, PP, 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3367999>.
- Brooklyn Microgrid. 2019. Brooklyn Microgrid. <https://www.brooklyn.energy/about>. 5.9.2024.
- Buterin, V. 2013. Ethereum white paper. GitHub repository, 1, 22–23.
- Cachin, C. 2016. Architecture of the Hyperledger Blockchain Fabric.
- Cai, T., Dong, M., Chen, K., & Gong, T. 2022. Methods of participating power spot market bidding and settlement for renewable energy systems. *Energy Reports*, 8, 7764–7772. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.291>.
- Caramizaru, E., & Uihlein, A. 2020. Energy communities: An overview of energy and social innovation. JRC Publications Repository. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/180576>.
- Cardwell, D. 2017. Solar Experiment Lets Neighbors Trade Energy Among Themselves. *The New York Times*. New York: The New York Times Company. <https://www.nytimes.com/2017/03/13/business/energy-environment/brooklyn-solar-grid-energy-trading.html>. 13.3.2024.
- Choobineh, M., Arab, A., Khodaei, A., & Paaso, A. 2022. Energy innovations through blockchain: Challenges, opportunities, and the road ahead. *The Electricity Journal*, 35(1), 107059. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.107059>.
- COM (2023) 148 Final 2023. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52023PC0148>.
- Cong, L. W., & He, Z. 2019. Blockchain Disruption and Smart Contracts. *The Review of Financial Studies*, 32(5), 1754–1797. Cambridge: National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.1093/rfs/hhz007>.
- Cui, M., Feng, T., & Wang, H. 2023. How can blockchain be integrated into renewable energy? --A bibliometric-based analysis. *Energy Strategy Reviews*, 50, 101207. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101207>.
- Damisa, U., & Nwulu, N. I. 2022. Blockchain-Based Auctioning for Energy Storage Sharing in a Smart Community. *Energies*, 15(6), Article 6. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/en15061954>.
- Dash, A. K. 2016. From darkness to Light. From Darkness to Light. New York: Infosys. <https://www.infosys.com/insights/age-possibilities/documents/darkness-to-light.pdf>.
- Di Silvestre, M. L., Favuzza, S., Riva Sanseverino, E., & Zizzo, G. 2018. How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 483–498. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.068>.

- Di Silvestre, M. L., Gallo, P., Guerrero, J. M., Musca, R., Riva Sanseverino, E., Sciumè, G., Vásquez, J. C., & Zizzo, G. 2020. Blockchain for power systems: Current trends and future applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119(109585). Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109585>.
- Dong, J., Song, C., Zhang, T., Hu, Y., Zheng, H., & Li, Y. 2022. Efficient and privacy-preserving decentralized energy trading scheme in a blockchain environment. *Energy Reports*, 8, 485–493. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.155>.
- Energiategollisuus. 2024. Kestävä energiatulevaisuus asiakkaille. Helsinki: Energiategollisuus ry. <https://energia.fi/meista/visio/kestava-energiatulevaisuus-asiakkaille>. 23.4.2024.
- Energiayhteisötyöryhmä. 2023. Energiayhteisöt ja erilliset linjat: Energiayhteisötyöryhmän loppuraportti. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164884>.
- Ethereum.org. 2024. Ethereum Energy Consumption. Ethereum.Org. <https://ethereum.org/en/energy-consumption>. 7.8.2024.
- Ethernodes.org—The Ethereum Network & Node Explorer. 2024. <https://ethernodes.org>. 14.8.2024.
- etherscan.io. 2024. Ethereum Node Tracker | Etherscan. Ethereum (ETH) Blockchain Explorer. <https://etherscan.io/nodetracker>. 14.8.2024.
- EU Blockchain Observatory and Forum. 2023. The current state of interoperability between blockchain networks. Bryssel: Euroopan komissio. https://blockchain-observatory.ec.europa.eu/publications/current-state-interoperability-between-blockchain-networks_en. 10.5.2024.
- Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukset (EU) 2016/679. 2016. Luxembourg: Euroopan unionin julkaisutoimisto. <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/679/2016-05-04/fin>.
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2019/944, EP, CONSIL, 158 OJ L. 2019. Luxembourg: Euroopan unionin julkaisutoimisto. <http://data.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj/fin>
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/2001. 2018. Luxembourg: Euroopan unionin julkaisutoimisto. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=CELEX:32018L2001>.
- Fares, R. 2015. Renewable Energy Intermittency Explained: Challenges, Solutions, and Opportunities. *Scientific American*. Lontoo: Springer Nature. <https://www.scientificamerican.com/blog/plugged-in/renewable-energy-intermittency-explained-challenges-solutions-and-opportunities>.
- Feger, A. 2024. Blockchain technology: What it is, benefits, and its cross-industry applications. EMARKETER. <https://www.emarketer.com/insights/blockchain-technology-applications-use-cases>. 21.4.2024.
- Foti, M., & Vavalis, M. 2021. What blockchain can do for power grids? *Blockchain: Research and Applications*, 2(1), 100008. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.bcra.2021.100008>.
- Fulli, G., Kotsakis, E., & Nai, F. I. 2021. Policy and regulatory challenges for the deployment of blockchains in the energy field. JRC Publications Repository. Bryssel: Euroopan komissio. <https://doi.org/10.2760/416731>.

- Fulli, G., Nai, F. I., Andreadou, N., Geneiatakis, D., Giuliani, R., Joanny, G., Kotsakis, E., Kounelis, I., Lucas, A., Martin, T., O'Neill, G., Sachy, M., Soupionis, I., & Steri, G. 2022. Blockchain solutions for the energy transition, Experimental evidence and policy recommendations. JRC Publications Repository. Bryssel: Euroopan komissio. <https://doi.org/10.2760/62246>.
- Galici, M., Mureddu, M., Ghiani, E., Celli, G., Pilo, F., Porcu, P., & Canetto, B. 2021. Energy Blockchain for Public Energy Communities. *Applied Sciences*, 11(8), Article 8. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/app11083457>.
- Giungato, P., Rana, R., Tarabella, A., & Tricase, C. 2017. Current Trends in Sustainability of Bitcoins and Related Blockchain Technology. *Sustainability*, 9(12), Article 12. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/su9122214>.
- Guo, M., Zhang, K., Wang, S., Xia, J., Wang, X., Lan, L., & Wang, L. 2023. Peer-to-peer energy trading and smart contracting platform of community-based virtual power plant. *Frontiers in Energy Research*, 10. Basel: Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1007694>.
- Hansen, B., Darby, P., Sommer, S., & Andor, M. 2022. NEWCOMERS summary case study report: The sonnenCommunity. https://www.newcomersh2020.eu/upload/files/NEWCOMERS_Summary-Case-study-report_sonnenCommunity.pdf.
- Hatziargyriou, N. 2023. Differences and synergies between local energy communities and microgrids. *Oxford Open Energy*, 2, oia013. Oxford: Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/ooenergy/oia013>.
- Hirvonen, R. 2002. Suomen energiavisio 2030: Suomenkielinen tiivistelmä. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. <https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2002/visiokirja.pdf>.
- Ho, C. 2023. One Year After The Merge: Sustainability Of Ethereum's Proof-Of-Stake Is Uncertain. New Jersey: Forbes. <https://www.forbes.com/sites/digital-assets/2023/10/11/one-year-after-the-merge-sustainability-of-ethereums-proof-of-stake-is-uncertain>.
- Holechek, J. L., Geli, H. M. E., Sawalrah, M. N., & Valdez, R. 2022. A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050? *Sustainability*, 14(8), Article 8. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/su14084792>.
- Hosseinnezhad, V., Hayes, B., O'regan, B., & Siano, P. 2021. Practical Insights to Design a Blockchain-Based Energy Trading Platform. *IEEE Access*, 9, 154827–154844. New York: IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3127890>.
- International Renewable Energy Agency. 2020. Peer-to-peer electricity trading—Innovation Landscape Brief. Masdar City: Irena. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Peer-to-peer_electricity_trading_2020.pdf. 21.8.2024.
- Islam, N. 2024. A Review of Peer-to-Peer Energy Trading Markets: Enabling Models and Technologies. *Energies*, 17(7), Article 7. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/en17071702>.

- Jadhav, A. 2021. Energy Paradigm shift by implementing decentralized communities: A Case Study of the Brooklyn Microgrid. Oslo: Solar Edition. <https://solaredition.com/energy-paradigm-shift-by-implementing-decentralized-communities-a-case-study-of-the-brooklyn-microgrid>. 21.8.2024.
- Johansson, P. E., Eerola, M., Innanen, A., & Viitala, J. 2019. Lohkoketju, Tiekartta päättäjille (e-kirja). Helsinki: Alma Talent. <https://shop.almatalent.fi/sivu/tuote/lohkoketju/2438636>.
- Juszczyk, O., & Shahzad, K. 2022. Blockchain Technology for Renewable Energy: Principles, Applications and Prospects. *Energies*, 15(13), Article 13. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/en15134603>.
- Kaif, A. M. A. D., Alam, K. S., & Das, K. 2024. Blockchain based sustainable energy transition of a Virtual Power Plant: Conceptual framework design & experimental implementation. *Energy Reports*, 11, 261–275. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.11.061>.
- Karumba, S., Sethuvenkatraman, S., Dedeoglu, V., Jurdak, R., & Kanhere, S. 2023. Barriers to blockchain-based decentralised energy trading: A systematic review. *International Journal of Sustainable Energy*, 42(1), 41–71. Lontoo: Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2171417>.
- Khan, D., Low, T., & Hashmani, M. 2021. Systematic Literature Review of Challenges in Blockchain Scalability. *Applied Sciences*, 11, 9372. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.3390/app11209372>.
- Khan, H., & Masood, T. 2022. Impact of Blockchain Technology on Smart Grids. *Energies*, 15(19), Article 19. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.3390/en15197189>.
- Khan, S., Amin, M. B., Azar, A. T., & Aslam, 2021. Towards Interoperable Blockchains: A Survey on the Role of Smart Contracts in Blockchain Interoperability. *IEEE Access*, 9, 116672–116691. New York: IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3106384>.
- Khan, N., Loukil, F., Ghedira-Guegan, C., Benkhelifa, E., & Bani-Hani, A. 2021. Blockchain smart contracts: Applications, challenges, and future trends. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 14(5), 2901–2925. Lontoo: Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s12083-021-01127-0>.
- Kou, P., Liang, D., & Gao, L. 2017. Distributed EMPC of multiple microgrids for coordinated stochastic energy management. *Applied Energy*, 185, 939–952. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.092>.
- Koukaras, P., Afentoulis, K. D., Gkaidatzis, P. A., Mystakidis, A., Ioannidis, D., Vagropoulos, I., & Tjortjis, C. 2024. Integrating Blockchain in Smart Grids for Enhanced Demand Response: Challenges, Strategies, and Future Directions. *Energies*, 17(5), Article 5. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/en17051007>.
- Kounelis, I., Karopoulos, G., Giuliani, R., Geneiatakis, D., Di Gioia, R., Steri, G., Neisse, R., & Nai-Fovino, I. 2017. Blockchain in energy communities: A proof of concept. Publications Office of the European Union. Bryssel: Euroopan komissio. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/121912>.

- Li, H., Xiao, F., Yin, L., & Wu, F. 2021. Application of Blockchain Technology in Energy Trading: A Review. *Frontiers in Energy Research*, 9. Basel: Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.671133>.
- Li, K., Yang, Y., Wang, S., Shi, R., & Li, J. 2021. A lightweight privacy-preserving and sharing scheme with dual-blockchain for intelligent pricing system of smart grid. *Computers & Security*, 103, 102189. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102189>.
- Mengelkamp, E., Gärttner, J., Rock, K., Kessler, S., Orsini, L., & Weinhardt, C. 2018. Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid. *Applied Energy*, 210, 870–880. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.054>.
- Mishra, M., Singh, A., Misra, R. K., & Singh, D. 2023. Virtual Community based Peer-to-Peer Energy Trading. 2023 5th International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Flexible Green Energy Technologies (ICEPE), 1–6. New York: IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ICEPE57949.2023.10201494>.
- Molly, 2017. The Brooklyn microgrid: Blockchain-enabled community power. *Power Technology*. <https://www.power-technology.com/features/featurethe-brooklyn-microgrid-blockchain-enabled-community-power-5783564>. 11.4.2024.
- Morrison, R. 2018. Energy system modeling: Public transparency, scientific reproducibility, and open development. *Energy Strategy Reviews*, 20, 49–63. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.12.010>.
- Nakamoto, 2008. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>. 21.8.2024.
- NASEO, 2024. Microgrids State Working Group, NASEO. <https://www.naseo.org/issues/electricity/microgrids>. 21.8.2024.
- Nastasi, B., Manfren, M., & Noussan, M. 2020. Open Data and Energy Analytics. *Energies*, 13(9), Article 9. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/en13092334>.
- Nepal, J. P., Yuangyai, N., Gyawali, S., & Yuangyai, C. 2022. Blockchain-Based Smart Renewable Energy: Review of Operational and Transactional Challenges. *Energies*, 15(13), Article 13. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/en15134911>.
- Nour, M., Chaves-Avila, J. P., & Sanchez-Miralles, A. 2022. Review of Blockchain Potential Applications in the Electricity Sector and Challenges for Large Scale Adoption. *IEEE Access*, 10, 47384–47418. New York: IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3171227>.
- Nuryyev, G., Wang, Y.-P., Achyldurdyeva, J., Jaw, B.-S., Yeh, Y.-S., Lin, H.-T., & Wu, L.-F. 2020. Blockchain Technology Adoption Behavior and Sustainability of the Business in Tourism and Hospitality SMEs: An Empirical Study. *Sustainability*, 12(3), Article 3. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/su12031256>.
- O'Dwyer, E., Pan, I., Acha, S., & Shah, N. 2019. Smart energy systems for sustainable smart cities: Current developments, trends and future directions. *Applied Energy*, 237, 581–597. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.024>.

- Onyeka Okoye, M., Yang, J., Cui, J., Lei, Z., Yuan, J., Wang, H., Ji, H., Feng, J., & Ezech, C. 2020. A Blockchain-Enhanced Transaction Model for Microgrid Energy Trading. *IEEE Access*, 8, 143777–143786. New York: IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3012389>.
- Orsini, L., Kessler, S., Wei, J., & Field, H. 2019. How the Brooklyn Microgrid and TransActive Grid are paving the way to next-gen energy markets. Teoksessa W. Su & A. Q. Huang (Toim.), *The Energy Internet* (ss. 223–239). Sawston: Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102207-8.00010-2>.
- Pavloff, U., Amoussou-Guenou, Y., & Tucci-Piergiovanni, 2022. Ethereum Proof-of-Stake under Scrutiny (Extended Version). CEA DILS. <https://hal.science/hal-03821290>.
- Peter, V., Paredes, J., Rosado Rival, M., Soto Sepúlveda, E., & Hermosilla Astorga, D. A. 2019. Blockchain meets energy: Digital solutions for a decentralized and decarbonized sector. German-Mexican Energy Partnership (EP) and Florence School of Regulation (FSR). Fiesole: Cadmus. <https://cadmus.eui.eu/handle/1814/63369>.
- Petri, I., Barati, M., Rezgui, Y., & Rana, O. F. 2020. Blockchain for energy sharing and trading in distributed prosumer communities. *Computers in Industry*, 123, 103282. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103282>.
- Pop, C., Cioara, T., Antal, M., Anghel, I., Salomie, I., & Bertoncini, M. 2018. Blockchain Based Decentralized Management of Demand Response Programs in Smart Energy Grids. *Sensors*, 18(1), Article 1. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/s18010162>.
- Pradhan, N. R., Singh, A. P., Verma, S., Kavita, Wozniak, M., Shafi, J., & Ijaz, M. F. 2022. A blockchain based lightweight peer-to-peer energy trading framework for secured high throughput micro-transactions. *Scientific Reports*, 12(1), 14523. Lontoo: Springer Nature. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18603-z>.
- Pylväläinen, E. 2022. Kiinteistörajat ylittävän energiayhteisön toteutusvaihtoehdot. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. Sähkötekniikan diplomityö. Lappeenranta: LUT-yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2022112166279>.
- Rahut, S., Tanvir, R., Rahman, S., & Akhter, 2019. Scientific Paper Peer-Reviewing System With Blockchain, IPFS, and Smart Contract, 189–221. Hershey: IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-9257-0.ch010>.
- Roth, T., Utz, M., Baumgarte, F., Rieger, A., Sedlmeir, J., & Strüker, J. 2022. Electricity powered by blockchain: A review with a European perspective. *Applied Energy*, 325, 119799. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119799>.
- Rouhani, S., & Deters, R. 2019. Security, Performance, and Applications of Smart Contracts: A Systematic Survey. *IEEE Access*, 7, 50759–50779. New York: IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2911031>.
- Saingre, D. 2021. Measuring performances and footprint of blockchains with BCTMark: a case study on Ethereum smart contracts energy consumption. *Cluster Computing*, 2022, 25 (4). <https://inria.hal.science/hal-03330325>.

- Saxena, S., Eng, P., & Brookson, A. 2020. Report to Natural Resources Canada Climate Change Adaptation – AP66. Toronto: The Sustainable Technologies. https://sustainabletechnologies.ca/app/uploads/2021/01/Transactional-Energy-Framework-for-Net-Zero-Energy-Communities_Final-Report_NRCan.pdf.
- Sedlmeir, J., Buhl, H. U., Fridgen, G., & Keller, R. 2020. The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth. *Business & Information Systems Engineering*, 62(6), 599–608. Lontoo: Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s12599-020-00656-x>.
- Shahzad, S., Abbasi, M. A., Ali, H., Iqbal, M., Munir, R., & Kilic, H. 2023. Possibilities, Challenges, and Future Opportunities of Microgrids: A Review. *Sustainability*, 15(8), Article 8. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/su15086366>.
- Siano, P., Marco, G., Rolan, A., & Loia, V. 2019. A Survey and Evaluation of the Potentials of Distributed Ledger Technology for Peer-to-Peer Transactive Energy Exchanges in Local Energy Markets. *IEEE Systems Journal*, 13, 3454–3466. New York: IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2903172>.
- sonnenCommunity, 2015. Sonnen. <https://sonnengroup.com/press-release-sonnencommunity>. 21.8.2024.
- sonnenCommunity, 2024. Sonnen. <https://sonnengroup.com/sonnencommunity>. 21.8.2024.
- Sovacool, B. K. 2009. The intermittency of wind, solar, and renewable electricity generators: Technical barrier or rhetorical excuse? *Utilities Policy*, 17(3), 288–296. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2008.07.001>.
- Szabo, N. 1997. The Idea of Smart Contracts. <https://urly.fi/3EI3>. 21.8.2024.
- Sähkömarkkinalaki 588/2013. 2013. Sähkömarkkinalaki 588/2013. Oikeusministeriö. Helsinki: Edita Lakitieto Oy. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>.
- Taherdoost, H. 2024. Blockchain Integration and Its Impact on Renewable Energy. *Computers*, 13(4), Article 4. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/computers13040107>.
- Toffler, A. 1981. *The Third Wave*. Hampshire: Pan Macmillan Limited. https://ia801200.us.archive.org/9/items/TheThirdWave-Toffler/TheThirdWave_-_Toffler.pdf. 21.8.2024.
- Ton, D. T., & Smith, M. A. 2012. The U.S. Department of Energy’s Microgrid Initiative. *The Electricity Journal*, 25(8), 84–94. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.013>.
- Valtioneuvoston asetus 1133/2020. 2020. Helsinki: Edita Lakitieto Oy. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2020/20201133>.
- Valtioneuvoston asetus sähkötoimitusten selvityksestä ja mittauksesta (767/2021) 2021. Helsinki: Edita Lakitieto Oy. <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2021/20210767>.

- Venegas-Zarama, J. F., Muñoz-Hernandez, J. I., Baringo, L., Diaz-Cachinero, P., & De Domingo-Mondejar, I. 2022. A Review of the Evolution and Main Roles of Virtual Power Plants as Key Stakeholders in Power Systems. *IEEE Access*, 10, 47937–47964. New York: IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3171823>.
- Wagner, O., & Götz, T. 2021. Presentation of the 5Ds in Energy Policy: A Policy Paper to Show How Germany Can Regain Its Role as a Pioneer in Energy Policy. *Energies*, 14(20), Article 20. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/en14206799>.
- Wahlund, M., & Palm, J. 2022. The role of energy democracy and energy citizenship for participatory energy transitions: A comprehensive review. *Energy Research & Social Science*, 87, 102482. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102482>.
- Wang, G., Wang, Q., & Chen, 2023. Exploring Blockchains Interoperability: A Systematic Survey. *ACM Computing Surveys*, 55, 290:1–290:38. New York: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3582882>.
- Wang, T., Hua, H., Wei, Z., & Cao, J. 2022. Challenges of blockchain in new generation energy systems and future outlooks ☆. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 135, 107499. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107499>.
- Westphall, J., & Martina, J. E. 2022. Blockchain Privacy and Scalability in a Decentralized Validated Energy Trading Context with Hyperledger Fabric. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(12), 4585. Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/s22124585>.
- Wood, D. G. 2024. Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger. <https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf>.
- Wu, Y., Wu, Y., Guerrero, J. M., & Vasquez, J. C. 2022. Decentralized transactive energy community in edge grid with positive buildings and interactive electric vehicles. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 135, 107510. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107510>.
- Yang, Q., Wang, H., Wang, T., Zhang, S., Wu, X., & Wang, H. 2021. Blockchain-Based Decentralized Energy Management Platform for Residential Distributed Energy Resources in A Virtual Power Plant. *Applied Energy*, 294, 117026. Oxford: Elsevier Publishing. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117026>.
- Zhang, R., & Chan, W. K. (Victor). 2020. Evaluation of Energy Consumption in Block-Chains with Proof of Work and Proof of Stake. *Journal of Physics: Conference Series*, 1584(1), 012023. Bristol: IOPscience. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1584/1/012023>.
- Zhang, R., Xue, R., & Liu, L. 2019. Security and Privacy on Blockchain. *ACM Computing Surveys*, 52(3), 51:1–51:34. New York: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3316481>.