

Timo Moilanen

LOHKOKETJUN HYÖDYNTÄMINEN ENERGIAJÄRJESTELMISSÄ

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastajat: Sami Repo
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Timo Moilanen: Lohkoketjujen hyödyntäminen energijärjestelmissä

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma

Toukokuu 2021

Lohkoketju on nouseva teknologia, joka on herättänyt huomattavaa kiinnostusta markkinoilla vuoden 2008 jälkeen, kun ensimmäisen sitä hyödyntävä sovellus, Bitcoin, julkaistiin. Viime vuosina lohkoketjuprojekteja on toteutettu laaja-alaisesti erilaisissa sovellutuksissa, mutta suuri osa kokeiluista on kuitenkin jäänyt suunnitteluasteelle. Tähän syytä on monia, kuten teknologian varhainen kypsyyssaste, minkä takia joitakin teknillisiä ongelmia on vielä ratkaisematta. Teknologia kuitenkin kehittyi nopeasti koko ajan, joten on olennaista tarkastella itse konseptin toimivuutta.

Tässä työssä tutustutaan lohkoketju-teknologian perusperiaatteisiin, kuten järjestelmäarkkitehtuureihin ja konsensusalgoritmeihin, sekä tutkitaan teknologian hyödyntämismahdollisuuksia energijärjestelmissä. Työn tavoite on analysoida ja kartoittaa mitä hyötyjä lohkoketjujen käyttäminen voisi saavuttaa valittuihin sovelluskohteisiin tutustumalla teoriaan ja käytännön hankkeisiin. Lisäksi tutkitaan tulevaisuuden näkymiä ja haasteita mitä on vielä ratkaisematta.

Lohkoketjujen taustalla oleva tekniikat perustuvat kryptografiaan, konsensusmekanismeihin ja hajautettuun verkkoon. Näiden pohjalta lohkoketjujen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat tiedon muuttamattomuus, hajautettavuus ja läpinäkyvyys. Lohkoketjuteknologia mahdollistaa osapuolten välisen automatisoidun digitaalisen tiedonvaihdon ilman keskitettyä hallitsijaa. Muutos hajautettuun, avoimeen ja yhteisön hallinnoimaan tietoverkkoon voi vaikuttaa merkittävästi nykyisiin markkinoihin luoden uudenlaisia liiketoiminnalleja.

Energiatoimialalla eniten suosiota saadut käyttökohteet liittyvät etenkin älykkäisiin sopimuksiin ja edelleen sähkönkaupankäyntiin. Älykkäillä sähkömarkkinoilla lohkoketjuteknologialla on potentiaalia automatisoida ja suoraviivaistaa maksuprosesseja sekä mahdollistaa loppukäyttäjien toimimisen aktiivisemmin tulevaisuuden yhä joustavimmilla markkinoilla. Mahdollisia käyttökohteita paljastui lisäksi sähköautojen latausjärjestelmien hajauttamisessa ja joustopalveluiden muodostamisessa.

Lohkoketjuteknologia on kaiken kaikkiaan mielenkiintoinen konsepti alueellisten ja kansainvälisten energijärjestelmien tulevaisuudelle. Vaikkakin projekteja energiasektorilla on ollut monia, on laajassa käytössä olevien ratkaisujen määrä vielä hyvin vähäistä. Teknologian tulevaisuuden menestyminen tulee riippumaan paljolti sen saamasta tuesta, jatkotutkimuksista, yritysten välisestä yhteistyöstä sekä onnistuneista käytännön projekteista.

Avainsanat: lohkoketju, energijärjestelmä, teknologia, kryptografia, älykäs sopimus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Johdanto | 1 |
| 2. | Johdatus lohkoketjuihin | 3 |
| 2.1 | Määritelmä ja teknologia | 3 |
| 2.2 | Rakenne | 4 |
| 2.3 | Keskitetty ja hajautettu tietoverkko | 5 |
| 2.4 | Julkisen avaimen järjestelmä | 7 |
| 2.5 | Konsensusmekanismit | 7 |
| 2.6 | Julkinen ja yksityinen lohkoketju | 8 |
| 2.7 | Lyhyt historiakatsaus | 9 |
| 3. | Lohkoketjuteknologian integroiminen energiajärjestelmiin | 12 |
| 3.1 | Älykkäät sopimukset | 14 |
| 3.2 | Energian kaupankäynti | 15 |
| 3.3 | Mikroverkkoalustat | 17 |
| 3.4 | Sähköajoneuvojen latausjärjestelmät | 17 |
| 3.5 | Joustopalvelut | 20 |
| 3.6 | Soveltuvuus energiasektorille | 21 |
| 4. | Tämänhetkisiä hankkeita | 23 |
| 4.1 | LO3 Energy -mikroverkko | 23 |
| 4.2 | Power Ledger -kaupankäyntialusta | 24 |
| 4.3 | Share&Charge -sähköautojen latausjärjestelmä | 24 |
| 4.4 | Horisontti-ohjelmat Euroopassa | 25 |
| 4.4.1 | INTERFACE-hanke | 25 |
| 4.4.2 | SOFIE-hanke | 26 |
| 5. | Tulevaisuuden näkymät ja haasteet | 28 |
| 5.1 | Skaalautuvuus | 28 |
| 5.2 | Energiankulutus | 29 |
| 5.3 | Laki ja sääntely | 30 |
| 6. | Yhteenveto | 32 |
| | Lähteet | 33 |

LYHENTEET JA MERKINNÄT

| | |
|---------|---|
| AML | Anti Money Laundering |
| CIREN | International Conference on Electricity Distribution |
| DEDE | Decentralized Energy Data Exchange (osa SOFIE-hanketta) |
| DEFM | Decentralized Energy Flexibility Marketplace (osa SOFIE-hanketta) |
| EU | Euroopan unioni |
| GDPR | General Data Protection Regulation (EU:n tietosuojasetus) |
| IEA | International Energy Agency (Kansainvälinen energiajärjestö) |
| IFPEN | French Institute of Petroleum |
| KYC | Know Your Customer |
| P2P | Peer-to-peer -verkko eli vertaisverkko. |
| PKI | Public Key Infrastructure |
| PoA | PoA on lyhenne Proof of Authority konsensusmekanismista. |
| PoS | PoS on lyhenne Proof of Stake konsensusmekanismista. |
| PoW | PoW on lyhenne Proof of Work konsensusmekanismista. |
| SOFIE | Secure Open Federation for Internet Everywhere |
| The DAO | The Decentralized Autonomous Organization |
| V2G | Vehicle-to-grid |

1. JOHDANTO

Energiajärjestelmät ovat kokeneet suuria muutoksia, kun uusiutuva energia ja hajautettu tuotanto ovat nousseet ajankohtaisiksi aiheiksi. Samalla muutos on tuonut omat ongelmansa keskitettyjen verkkojen hallintaan, kun nykyiset sähköverkot on suunniteltu yksisuuntaiseen tehonsiirtoon. Älykkäiden verkkojen kehittyessä uusien tekniikoiden käyttöönotto ongelmiensa ratkaisemiseksi on ollut energiayritysten tutkassa. Viime vuonna onkin nähty suuri määrä tutkimuksia ja hankkeita muun muassa lohkoketjuteknologian hyödyntämisessä.

Vuonna 2008 ensimmäinen lohkoketjuteknologiaa hyödyntävä sovellutus, Bitcoin, valmistui. Sen kehittäjä Satoshi Nakamoto loi kyseisen kryptovaluutan luodakseen maksujärjestelmän, joka toimisi ilman finanssilaitoksia. Perinteinen maksujärjestelmä kärsii luottamukseen liittyvistä heikkouksista, missä kolmannen osapuolen on huolehdittava järjestelmän ylläpidosta ja osapuolten varmistamisesta. Bitcoinissa transaktioiden varmistajina toimivat muut verkon käyttäjät, jotka saavat varmistukseen käytettävästä laskentatehon luovuttamisesta palkkion. [1, s. 4] Tätä hajautettua tietokantajärjestelmää onkin kutsuttu Internetin jälkeen merkittävimmäksi teknologiseksi keksinnöksi. Kyseinen teknologia on nostattanut muidenkin sektorien mielenkiinnon.

Lohkoketju on pohjimmiltaan digitaalinen tilikirja, joka on jaettu verkon kaikkien sen ylläpitoon osallistuvien laitteiden kesken. Uusien tapahtumien tai transaktioiden lisääminen ketjuun tapahtuu näiden laitteiden tekemien varmistuksien avulla. Lohkojen ja ketjujen muodostaman rakenteen takia aikaisempien lohkojen tietoja ei voida yleisesti muuttaa, mikä lisää luottamusta ja tiedon eheyttä.

Tässä työssä tarkastellaan, miten lohkoketjuteknologiaa voidaan hyödyntää ja mitä parannuksia se tuo energiajärjestelmiin. Keskeisimpinä sovellutuksina ovat älykkäät sopimukset ja vertaisverkossa toimiva kauppapaikka, jotka mahdollistavat automaattisen ja turvallisen kaupankäynnin. Työn tavoitteena on kartoittaa ja analysoida nykyisten sovellusten tilaa energia-alalla teknologiselta ja kaupalliselta kannalta, jonka pohjalta lukija saa kattavan ja käytännönläheisen kuvan lohkoketjuista. Työssä myös tarkastellaan haasteita, jotka ovat vielä ratkaisematta tekniikan tulevaisuuden menestymiselle. Ratkaistavia ongelmia on vielä monitasoisesti sekä teknilliseltä että yhteiskunnalliselta osalta ennen kuin tekniikkaa on mahdollista hyödyntää täysin osin.

Työn alku käsittelee lohkoketjuteknologiaa erillisenä osana. Kappaleesta lukija saa käsityksen sen toiminnasta ja peruseräiteistä työn kannalta oleellisilta osin. Samalla käydään läpi lyhyt historiakatsaus. Kolmannessa kappaleessa syvennyttään lohkoketjujen käytännön soveltamiseen energiajärjestelmissä ja tutkitaan sovelluksia sekä vaatimuksia sen käyttöönottoon. Neljännessä kappaleessa käydään läpi muutamia hankkeita, joita on aloitettu viime aikoina sekä yleiskatsauksella että kaupallistumisella. Lopuksi tarkastellaan tulevaisuuden näkymiä ja haasteita, jotka ovat tähän asti olleet muun muassa skaalautuminen ja energiankulutus sekä varhaisen kehitysprosessin tuomat tietoturva- ja sääntelyongelmat [2, s. 145]. Viimeinen, kuudes kappale, kokoaa yhteen tärkeimmät havainnot.

2. JOHDATUS LOHKOKETJUIHIN

Lohkoketju on viime vuosien aikana noussut otsikoihin sekä sen saaman kritiikin puolesta että innovaatiosta. Monen kuullessa sanan lohkoketju tulee mieleen Bitcoin, joka on ensimmäinen tekniikkaa hyödyntävä sovellus. Käsite on kuitenkin paljon laajempi ja sen mahdollisuudet merkittävästi suuremmat maksutoimenpiteiden lisäksi. Teknologia on listattu vuonna 2018 Suomessa nopeimpana teknillisenä nousijana, mikä on toisaalta myös kasvattanut paljon odotuksia [3, s. 19].

2.1 Määritelmä ja teknologia

Lohkoketju eli blockchain on yksinkertaisesti sanottuna hajautettu ja jaettu digitaalinen tietorakenne, joka sisältää jatkuvasti kasvavan dataosion. Tietokantaa hallitsevat käyttäjät yhdessä eli toteutus on vastakohtainen jonkin tahon hallinnoimalle keskitetylle tietokannalle. Tämänkaltaisia tietokantoja kutsutaan myös hajautetuiksi tilikirjoiksi (distributed ledger technology). Hajautetun ominaisuuden takia lohkoketjut tarjoavat läpinäkyvän, luotettavan ja muuttumattoman tiedonsiirron [2, s. 143]. Tässä on pieniä eroja riippuen siitä onko lohkoketju julkinen vai yksityinen, mutta siihen palataan myöhemmin.

Termin määritelmä on moniselitteinen. Järjestelmää, joka käyttää samanlaisia periaatteita kuin lohkoketjut, ei välttämättä käytetä hajautettuihin tietokantoihin rinnastetuissa toiminnoissa, eivätkä kaikki hajautetut tietokannat käytä samanlaisia toimintoja kuin lohkoketjut [4, s. 2]. Mattilan et al. [4, s. 2] mukaan lohkoketjuteknologia-käsitettä käytetään yleisesti viittamaan seuraaviin asioihin:

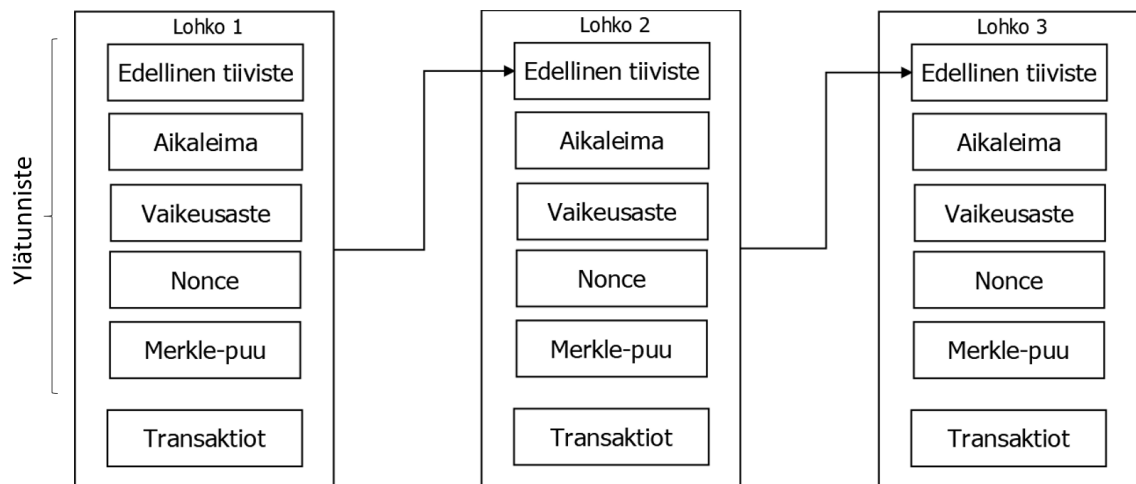
1. kryptografisesti ketjutettu tietorakenne
2. tietorakenne, joka käyttää hajautettua digitaalista konsensusarkkitehtuuria
3. kyseisesten arkkitehtuurien päälle rakennettujen sovelluston joukko.

Kryptografia on matemaattinen ja laskennallinen käytäntö tietojen muuttamiseen selkokielisestä salaiseen muotoon. Lohkoketjuissa kryptografiaa käytetään sekä lohkojen ketjuttamiseen että tiedon salaamiseen. Konsensuksella eli yhteisymmärryksen toteutumisella tarkoitetaan tekniikkaa, jolla varmistetaan uuden lohkon kelpoisuus sekä tehdään hyväksyminen tietorakenteeseen. Konsensusmekanismeja on monia erilaisia, joista yleisimmät käydään läpi luvussa 2.4.

2.2 Rakenne

Lohkoketju nimensä mukaisesti koostuu lohkoista ja ketjuista, jotka linkittävät lohkot toisiinsa. Jokainen lohko sisältää tiettyjä tietoja, kuten aiemmasta lohkoista lasketun kryptografisen tiivisteen eli hashin, aikaleimauksen ja itse datan. Lohkon omaa tiivistettä ei pidetä tallessa lohkoissa, vaan vastaanottavat laitteet laskevat sen itse. Kryptografinen tiiviste on metodi, joka voi muuttaa mitä tahansa selkokieleistä dataa vakiopituiseksi salatekstiksi tiivistefunktion avulla. Prosessi on yksisuuntainen, joten lopputulosta ei voida kääntää takaisin dataksi. [5, s. 2] Tässä tilanteessa tiivistettä käytetäänkin tarkistussummana, jonka avulla varmistetaan, että edellisessä lohkoissa oleva tieto ei ole muuttunut [1, s. 3]. Sen päätarkoitus on siten lohkojen linkitys ja tallennettujen tietojen eheyden varmistus. Tämä takaa lohkoketjujen yhden merkittävimmän ominaisuuden eli tiedon muuttumattomuuden, jolloin aiemman lohkon sisältöä ei voida muuttaa ilman seuraavien lohkojen muuttamista.

Esimerkiksi mikä tahansa muutos lohkoissa 1 muuttaa myös siitä laskettua tiivistettä, jolloin lohko 2 tallennettu tiiviste ja lohkon 1 uusi tiiviste eroavat toisistaan. Tämä tilanne tuottaa virheen ja muutosta ei hyväksytä. Ydinajatus onkin se, että hyökkääjän on lähes mahdotonta muuttaa jo varmistetun lohkon sisältöä pitkässä lohkoketjussa, koska muutos vaatisi valtavaa määrää laskentatehoa lohkojen uudelleenlaskentaan. Kuvassa 2.1 on hahmotus Bitcoinin lohkoketjujen rakenteesta.

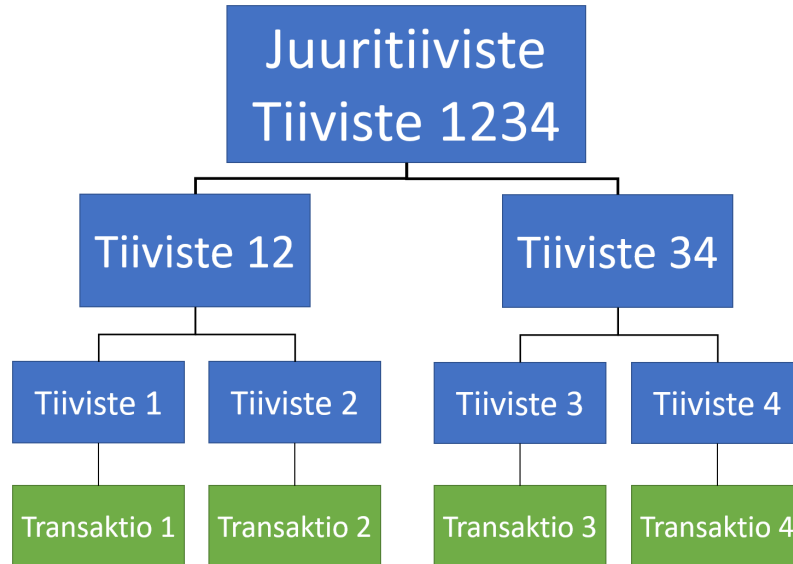


Kuva 2.1. Bitcoinin lohkoketjun rakenne. [6]

Lohkon ylätunniste koostuu metatiedoista eli lohkon sisältöä määrittävistä tiedoista. Bitcoinissa ylätunniste sisältää edellisen lohkon tiivisteen, konsensusmekanismiin liittyviä metatietoja kuten vaikeusasteen sekä tietoja transaktioista Merkle-puun avulla.

Merkle-puuta hyödynnetään tilan säästämiseen datan kasvaessa suureksi ja eheyden todentamisen nopeuttamiseen luomalla kaikista lohkoissa olevista transaktioista digitaalisen sormenjäljen. Näiden syiden takia monet lohkoketjut käyttävätkin sitä. Merkle-puu rakentuu rekursiivisesti yhdistämällä transaktioiden hajautusarvoja toisiinsa ja muodostamalla

näistä yhteisiä tiivisteitä puumaisen rakennelman kautta. Prosessi aloitetaan puun alaosasta, kunnes lopulta saavutetaan kaikista lohkokossa olevista transaktioista laskettu yksi tiiviste eli juuritiiviste (root hash) puun yläosassa. [6] Muodostunut juuritiiviste tallennetaan tulevan lohkon ylätunnisteeseen [1, s. 4].



Kuva 2.2. Merkle-puu [6]

Kuvassa 2.2 merkle puu on muodostettu neljästä transaktiosta, mutta todellisuudessa yhdessä lohkokossa voi olla tuhansittain transaktiota. Lohkoketjuissa Merkle-puu on hyödyllinen sen takia, että lohkon sisällöstä voidaan helposti ja nopeasti verifioida se, että tietty transaktio kuuluu siihen lataamatta koko lohkoketjua Simplified Payment Verification -menetelmän avulla [1, s. 5].

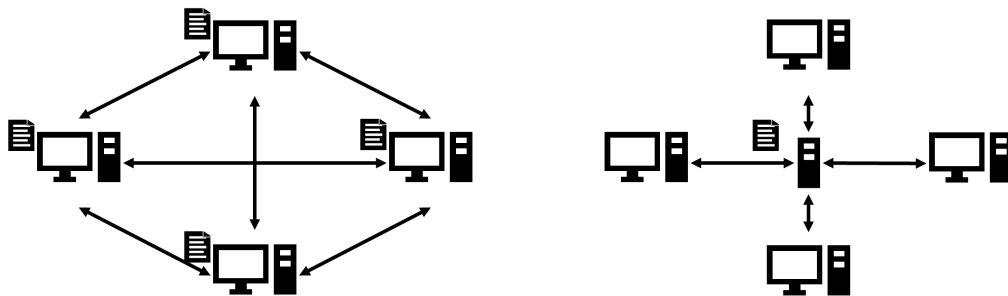
Bitcoinin lohkoketjurakenne on suhteellisen yksinkertainen verrattuna monissa energiajärjestelmien projekteissa käytettävän Ethereumin rakenteesta. Ethereumissa esimerkiksi muodostetaan kolme eri puurakennetta transaktioille, transaktioiden toimeenpanon vaikutuksille (receipt) ja käyttäjätilien tiloille (state) [7]. Ethereum sisältää oman kryptovaluutansa nimeltään Ether, mutta Ethereum itsessään on alusta, jonka avulla voidaan kehittää hajautettuja sovelluksia eli DApppeja [8].

2.3 Keskitetty ja hajautettu tietoverkko

Keskitetyssä maksujärjestelmässä käytetään luotettua kolmatta osapuolta varmistamaan lähettäjä, vastaanottaja ja transaktion kelpoisuus. Samalla estetään tilanne, jossa samalla rahalla tehtäisiin kaksi maksua. Sitä kutsutaan myös ”double-spending”-ongelmaksi. Perinteinen ratkaisu on käyttää keskusviranomaista, kuten pankkia, toimimaan tässä asemassa. Aina tätä ratkaisua ei kuitenkaan haluta syistä, että välittäjän käyttäminen nostattaa siirtohintoja ja tekee verkosta toimintakyvyttömän tapauksessa, jossa hyökkäys on kohdistettu tähän välittäjään. Yksi lohkoketjujen tärkeimmistä ominaisuuksista onkin tä-

män välikäden poistaminen. [2, s. 145]

Lohkoketju toimii tietoverkossa ja tiedonsiirtoa voidaan kuvata tiedon kopioimisella paikasta toiseen. Jokainen lohkoketjun käyttöön osallistuva laite pitää kopiota rekisteristä olemalla verkon solmukohta (node). Verkossa kaikki solmut ovat yhteydessä toisiinsa ja pitävät yllä jatkuvasti muuttuvaa lohkoketjua kommunikoimalla toisilleen. [2, s. 145] Tämän vuoksi julkisissa lohkoketjuissa, kuten Bitcoinissa tai Ethereumissa, käyttäjät voivat katsoa aiempien lohkojen tietoja [ks. 9]. Siten lohkoketjut tarjoavat avoimuutta ja läpinäkyvyyttä. Kuvassa 2.3 on hahmotus lohkoketjuverkon rakenteesta eli hajautetusta verkosta sekä vastakohtana olevasta keskitetystä verkosta, jossa yksi luotettu tahon hallitsee rekisteriä.



Kuva 2.3. Hajautettu ja keskitetty tietoverkko [2, s. 146]

Kuvassa hajautetun verkon tietokoneet osallistuvat verkon ylläpitämiseen eli ovat solmukohtia, ja keskitetyssä verkossa asiakkaat ovat yhteydessä keskitettyyn palvelimeen. Hajautettua verkkoa kutsutaan myös P2P-verkoksi eli vertaisverkoksi [10, s. 35]. Vertaisverkoissa ei ole kiinteitä palvelimia vaan jokainen verkkoon kytketty laite toimii sekä palvelimena että asiakkaana.

Lohkoketjuissa käytettävät solmut voidaan jakaa tyypeittäin niiden toimintojen perusteella. Täyssolmut (full node) ovat vastuussa koko lohkoketjun kopion ylläpitämisestä ja jakamisesta, mutta ne eivät voi luoda uusia lohkoja. Täyssolmut voivat myös varmentaa transaktioita minkä tahansa lohkon sisällöstä. [11] Esimerkiksi Bitcoinin lohkoketjun koko on kirjoitushetkellä 333.28 gigatavua, mikä on tallessa jokaisessa täyssolmussa [12].

Simplified Payment Verification -menetelmää hyödyntäviä solmuja kutsutaan kevyiksi solmuiksi (lightweight node). Kevyet solmut pitävät tallessa vain pientä osaa lohkoketjusta, ja lohkojen sisällöistä vain niiden ylätunnisteita, mutta ne tarvitsevat toimiakseen yhteyden täyssolmuihin. [11] Tämä solmu on pienen koonsa ansiosta sopiva pienitehoisten laitteiden lohkoketjutoiminnoissa.

Muita solmutyyppejä on esimerkiksi louhintasolmu (mining node), jossa tapahtuu uusien lohkojen luonti ja laskeminen Proof of Work lohkoketjuissa. Luontihetkellä uuden lohkon luonut solmu lähettävää ilmoituksen muille louhintasolmuille uudesta lohokosta, jotka pyytävät sen tiedot laskentaa varten. Louhintasolmut voivat olla täyssolmuja tai kevytsolmu-

ja. Samankaltaisesti Proof of Stake lohkoketjut käyttävät osakkuussolmua (staking node) uusien lohkojen luomista varten. [11] Konsensusmekanismit käydään tarkemmin läpi luvussa 2.5.

2.4 Julkisen avaimen järjestelmä

Lohkoketjuverkon turvallisuuden edistämiseksi aikaisemmin läpi käydyn kryptografisen tiivisteen lisäksi käytetään julkisen avaimen järjestelmää (Public Key Infrastructure). Vaikka molemmat kuuluvatkin kryptografisiin menetelmiin, ovat niiden käyttökohteet erilaiset. Kun tiivisteen avulla pidetään yllä ketjun järjestystä ja eheyttä, julkisen avaimen järjestelmää käytetään muun muassa käyttäjien autentikointiin ja datan salaukseen.

PKI:n toiminta perustuu julkisen ja yksityisen avaimen käyttöön. Avaimet liittyvät matemaattisesti toisiinsa siten, että avaimella salatun datan pystyy ainoastaan purkamaan sen vastakkaisella avaimella. Käyttäjän julkinen avain voi olla siis avoimesti jaossa verkossa, ja muut käyttäjät voivat hyödyntää sitä salattujen viestien lähettämiseen kyseiselle vastaanottajalle tietäen, että mahdollinen salakuuntelija ei saa viestien sisältöä auki. Siten yksityisen ja julkisen avaimen käytöllä turvataan lohkoketjuissa turvallisuus ja käyttäjien autentikointi sekä auktorisointi, joilla tarkoitetaan sitä, että transaktion lähettäjän identiteetti on varmennettu ja sen on tehnyt siihen valtuutettu henkilö. [2, s. 146]

2.5 Konsensusmekanismit

Kysymykseksi jää, kuinka saavutetaan yhteisymmärrys (konsensus) verkon tilasta, lohkoista ja niiden järjestyksestä kaikkien jäsenten kesken. Tämä konsensusongelma on hajautettujen järjestelmien yksi ydinhaasteista. Eri konsensusmekanismeja on olemassa monia erilaisiin tarkoituksiin omaten erilaiset hyötysuhteet energiankäytöstä. Yleisimpiä konsensustapoja ovat Proof of Work, Proof of Stake ja Proof of Authority. [13, s. 18–19]

Proof of Work perustuu suurimman laskentatehon luottamukseen. Sen mekanismi käyttää ongelmista laskettua tulosta todistaakseen datan oikeellisuuden. Kun verkossa oleva solmu luo lohkon, verkon solmut alkavat kilpailla sen validoinnista eli laskuongelman ratkaisemisesta. Bitcoin käyttää PoW:ta, ja motivoidakseen uusia solmuja tukemaan verkkoa, se jakaa palkintoja eli bitcoineja lohkon validoinnista. Mitä enemmän solmulla on laskentatehoa, sitä todennäköisempää on laskun nopein suoritus ja palkinnon saaminen. Validoimista kutsutaan myös louhimiseksi. [13, s. 19, 1]

Proof of Stake perustuu suurimpaan hallintaosuuteen eli solmu voi validoida rahaketta ainoastaan omistukseen rinnastetun määrän verran. Järjestelmässä voidaan myös olla asetettu esimerkiksi vaatimus, että jos käyttäjä haluaa toimia validaattorina, hänen täytyy antaa pantiksi jokin määrä lohkoketjun rahaketta. Uutta lohkoa luodessa, sen validaattorit valitaan satunnaisesti verkosta, mutta mitä enemmän käyttäjällä on lohkoketjun rahaketta,

sitä suurempi todennäköisyys on saada lohkon validointitehtävä. Näin työ saadaan jaetua kaikkien kesken tasaisesti riippuen omistetusta osuudesta. [14] Tällöin solmut eivät saa palkintoja samalla lailla kuin Proof of Workissa, vaan maksu perustuu aikaisemmin sovittuun määrään. PoS on paljon energiatehokkaampi kuin laskentatehoon perustuva PoW sen takia, että solmut eivät tee laskutoimituksia turhaan kilpailun vuoksi, jolloin lohkoketjun suoritustehoa saadaan nostettua huomattavasti. Riskinä on yhden solmun suuri valta varallisuuserojen ollessa suuria. [13, s. 19]

Kolmas yleinen konsensustapa on Proof of Authority, joka on mekanismeista läheisin keskitetyissä järjestelmissä käytettävästä kolmannen osapuolen toimintamallista. Siinä konsensuksen tekemisestä huolehtivat vain ennalta määrätyt solmut eli se on suosittu varsinkin yksityisien ja suljettujen lohkoketjujen kohdalla. [13, s. 19] Proof of Authorityta voidaan käyttää erikoistapauksissa, joissa tietoturva ja eheyttä ei voida vaarantaa. Tästä syystä lähestymistapa on nousussa energiasektorilla. [2, s. 150]

2.6 Julkinen ja yksityinen lohkoketju

Lohkoketjut voidaan jakaa julkiseen ja yksityiseen lohkoketjuun. Molempien perusperiaatteet ovat samoja: Ne toimivat hajautetussa vertaisverkossa, jossa käytetään solmuja verkon ylläpitämiseen. Molemmissa käytetään konsensusprotokollaa lohkojen validointiin ja molemmat tarjoavat tietyt takuut tiedon muuttumattomuudesta. [10, s. 75] Suurin ero näiden välillä on päätös siitä, että kuka voi liittyä verkkoon ja nähdä lohkoketjun dataa.

Julkisiin lohkoketjuihin voi liittyä kuka tahansa, lukea lohkoketjun dataa, tehdä siirtoja sekä osallistua konsensusprosessiin. Tällä taataan se, että yhdellä henkilöllä ei ole valtaa verkossa ja ettei dataa voida muuttaa jälkeenkäin. Toisaalta julkista lohkoketjua ei välttämättä haluta käyttää esimerkiksi terveydenhuollon tietojärjestelmissä tai yrityksen arkaluonteisen datan lähettämisessä huonomman yksityisyyden suojan vuoksi. [10, s. 75, 15, s. 34] Jos esimerkiksi käyttäjä saa jonkun henkilön virtuaalilompakon osoitteen selvitettyä julkisessa lohkoketjussa, hän voi tarkastella kaikkia tästä osoitteesta liikkuneita transaktioita.

Yksityisissä lohkoketjuissa on tietyt rajoitukset kuka saa liittyä verkkoon ja tarkastella sen dataa. Uusista osallistujista voi päättää esimerkiksi verkon nykyiset osallistujat, jokin viranomainen tai muu auktoriteetti. Se tarjoaa paremman yksityisyyden sekä mahdollisesti tehokkaamman prosessoinnin, koska louhintaa tekevät vain hallitsijan valitsevat luotetut solmut. Yksityisyys voi olla toteutettu esimerkiksi siten, että transaktioiden tietoja näkevät vain transaktion osapuolet. [15, s. 34] Riippuen käyttäjien pääsyoikeuksista, muuttumattomuutta ei voida välttämättä taata julkisin menetelmin ja järjestelmän muoto on lähellä keskittyä verkkoa etenkin tapauksessa, jossa verkolla on yksi haltija. Täten toteutuksessa menetetään julkinen läpinäkyvyys lohkoketjun tilasta, mutta saadaan lohkoketjujen muita hyötyjä. [15, s. 34] Yksityisistä lohkoketjuista voidaan vielä erottaa kolmas muoto, konsor-

tio (consortium) lohkoketju, joka voidaan asettaa rajoitusten osalta yksityisen ja julkisen lohkoketjun välimaastoon [2, s. 147]. Tässä tyypissä hallitsijoita on monia, mikä tekee verkosta hajautetumman kuin yksityisestä verkosta.

Suunniteltaessa lohkoketjuratkaisua, on oleellista miettiä, että halutaanko suosia läpinäkyvyyttä suorituskyvyn sijaan valitsemalla julkinen lohkoketju vai olisiko yksityinen lohkoketju hyödyllisempi ratkaisu paremman yksityisyyden ja mahdollisesti tehon nojalla. On myös olemassa näiden yhdistelmä, hybridi-lohkoketju. Hybriditoteutuksessa käytetään samanaikaisesti sekä yksityistä että julkista lohkoketjua. Lohkojen luominen sekä validointi tapahtuu tässä tapauksessa yksityisessä lohkoketjussa, ja sen jälkeen lohko julkaistaan julkisella puolella. Hybridimalli mahdollistaa parannetun yksityisyyden ja nopeuden sekä pienemmät kulut verrattuna julkiseen lohkoketjuun. [15, s. 41]

2.7 Lyhyt historiakatsaus

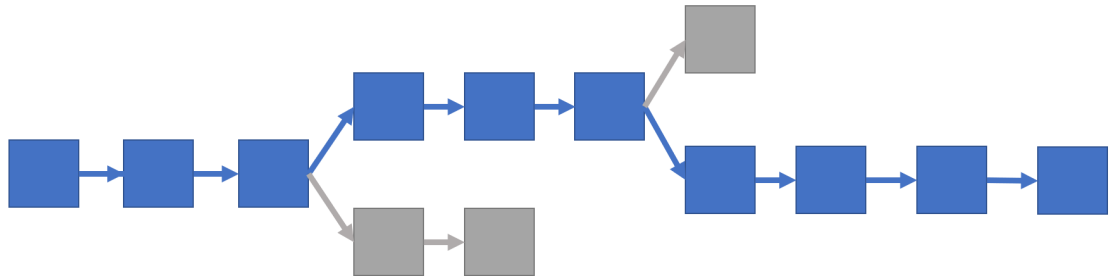
Kuten johdannossa jo olikin, ensimmäinen lohkoketjua hyödyntävä sovellus on vuonna 2008 ilmestynyt kryptovaluutta Bitcoin [1]. Bitcoin on kryptografiaan perustuva virtuaalivaluutta eli rahakkeet eivät ole keskuspankin tai viranomaisen liikkeeseen laskemia tai takaamia. Sen luojasta, Satoshi Nakamotosta, tiedetään hyvin vähän vielä nykypäivänäkin sillä ei ole varmaa onko kyseessä yksi henkilö vai ryhmittymä. Konseptina hän esitteli uuden maksujärjestelmän, jossa verkko toimii ilman keskitettyä hallitsijaa.

Bitcoinissa jokaisella käyttäjällä on oma virtuaalinen lompakko, jossa hänen Bitcoininsa sijaitsevat, sekä julkinen ja yksityinen avainpari. Siirto verkossa tapahtuu seuraavien askelten mukaisesti [2, s. 146]:

1. Ennen siirron tapahtumista, lähettäjän ja vastaanottajan täytyy tietää toistensa julkiset avaimet.
2. Transaktion luomisvaiheessa tarkastetaan, että lähettäjällä on tarpeeksi varoja sen tekemiseen. Luotu transaktio salataan käyttäen vastaanottajan julkista avainta sekä allekirjoitetaan digitaalisesti käyttämällä lähettäjän yksityistä avainta. Transaktio sisältää informaatiota lähetettyjen varojen määrästä sekä molempien osapuolten julkiset avaimet.
3. Transaktio lähetetään lohkoketjuverkkoon.
4. Tietyt solmut keräävät kaikki kymmenen minuutin aikana saapuneet transaktiot yhteen lohkoon.
5. Louhijat alkavat kilpailemaan muodostuneen lohkon validoinnista.
6. Kun lohko on vahvistettu, sen lisätään lohkoketjuun, vahvistuksen tehneet louhijat saavat palkkion ja vastaanottaja saa lähetetyt bitcoinit lompakkoonsa.

Vahvistuksia tehdään samanaikaisesti eri louhijoiden kesken, mikä voi johtaa siihen, et-

tä ketjuun lisätään useampi samaa dataa sisältävää lohko luoden uuden ketjun nykyisen ketjun rinnalle eli forkin kuvan 2.4 mukaisesti. Tässä tilanteessa pitempi lohkoketju valitaan osoittamaan lohkoketjun oikeaa tilaa. [2, s. 146]



Kuva 2.4. Lohkoketjun haarautuminen [2, s. 146].

Bitcoinin jälkeen markkinoille alkoi ilmestyä lukuisia muita kryptovaluuttoja kuten Litecoin vuonna 2011 [16]. Näiden altcoinien tarkoituksena on erota Bitcoinin toiminnasta käyttämällä erilaisia algoritmeja ja tekniikoita lohkoketjussa. Esimerkiksi Litecoin prosessoi yhden lohkon joka 2,5 minuutti verrattuna Bitcoinin 10 minuuttiin [17]. Vuosien kuluessa altcoineja on tullut markkinoille tuhansia erilaisia [18].

Bitcoinin jälkeen kehittäjät halusivat laajentaa lohkoketjujen käyttöä muihinkin tarkoituksiin kuin pelkästään maksujen tekoon rakentamalla yleiskäyttöisen kehitysalustan. Vuonna 2015 Vitalik Buterinin kehittämä alusta nimeltään Ethereum julkaistiin. Ethereumia kutsutaan myös toisen sukupolven lohkoketjuksi. Erona Bitcoiniin ja muihin kryptovaluuttoihin on laajeneminen vaihdannan välineestä kokonaiseen ekosysteemiin, jonka päälle voidaan rakentaa hajautettuja sovelluksia. Hajautetut sovellukset mahdollistavat älykkäiden sopimusten käytön, mitkä tekevät tapahtumia automaattisesti annettujen ehtojen täytyessä. Älykkäiden sopimusten toimintaan ja käyttöön syvennyttään luvussa 3.1. [8]

Lohkoketjutenkologian kehitysaskeleet eivät ole kuitenkaan tapahtuneet ongelmitta. Vuosi Ethereumin julkaisun jälkeen, alustalle luotiin hajautettu autonominen organisaatio nimeltään The DAO. Se toimi joukkorahoituspalveluna, joka perustui avoimeen lähdekoodiin ja täysin hajautettuna se toimi ilman keskitettyä palveluntarjoajaa. DAO:n tavoitteena oli eliminoida inhimilliset virheet ja varojen manipulointi asettamalla järjestelmä toimimaan täysin automaattisesti käyttäen älykkäitä sopimuksia. Suuren suosion saavuttaneena palvelu keräsi yli 150 miljoonaa dollaria rahoitusta ja julkaistiin huhtikuussa 2016. Palvelusta kuitenkin löytyi tietoturva-aukkoja, joita kyberhyökkääjät käyttivät hyväkseen ja ryöstivät kesäkuussa 2016 kymmenien miljoonien dollarien edestä Ethereumia. [19, s. 45] Tapahtuneen jälkeen yhteisö päätti palauttaa Ethereum-verkon aikaisempaan tilaan, jolloin varat saatiin palautettua omistajilleen. Kuitenkin osa käyttäjistä jatkoi vanhentuneen ja virheel-

lisen tiedon omaavan Ethereum-verkon käyttöä, mikä johti Ethereum-järjestelmän jakautumiseen kahtia eri lohkoketjuihin (Ethereum ja Ethereum Classic). [13, s. 33]

Nykyisin Ethereum on noussut suosituimmaksi hajautettuja sovelluksia mahdollistavaksi lohkoketjualustaksi keräten State of The DApps työkalun mukaan lähes 2800 sitä hyödyntävää hajautettua sovellusta [20]. Älykkäät sopimukset ovat olennainen osa automaatiosovelluksien toimintaa, mikä tekee Ethereumin kaltaisten alustojen käytöstä suosittua energiasektorilla.

Bitcoin on ollut julkaisustaan asti suosituin kryptovaluutta ja kirjoitushetkellä sen markkina-arvo on noussut noin 1000:een miljardiin euroon [18]. Tähän asti Bitcoinin ydinprotokollat ovat pysyneet murtamattomina eikä onnistuneita hyökkäysyrityksiä ole ollut. On kuitenkin tapauksia, jossa hakkerit ovat päässeet käsiksi yksilöiden lompakkoihin ja kryptovaluuttapörssiin, mitkä ovat johtuneet palveluiden puutteellisesta suojauksesta. Esimerkiksi helmikuussa 2014 pörssin MT Gox käyttäjiltä ja operaattoreilta varastettiin yhteensä noin 850 000 Bitcoinia, joiden sen hetkinen arvo oli noin 470 miljoonaa dollaria. Tuolloin MT Gox käsitteli jopa 70 % kaikista kryptovaluuttasiirroista. [21]

3. LOHKOKETJUTEKNOLOGIAN INTEGROIMINEN ENERGIAJÄRJESTELMIIN

Kuten jo aikaisemmin tuli ilmi, energiajärjestelmien rakenne on muuttumassa merkittävästi digitalisaation, hajautetun tuotannon sekä teknologioiden kehittymisen vuoksi [22, s. 6]. Lisäksi siirtyminen kohti hiilineutraaleja energialähteitä on johtanut uusiutuvien energialähteiden ja sähköajoneuvojen yleistymiseen. Vuonna 2019 uusiutuvat energialähteet kattoivat Suomessa 38 % energian kokonaiskulutuksesta, mikä on prosentin kasvu edellisvuoteen verrattuna. Samana vuonna fossiilisten polttoaineiden sekä turpeen kulutus väheni yhteensä 7 %. [23]

Tulevaisuuden energialähteiden kehityskohteisiin kuuluvat muun muassa hajautetut energialähteet, varastointiteknologiat, sähköajoneuvot ja niiden latausinfrastruktuuri sekä sähköverkkojen älyllistäminen. Näiden pohjalta sähköverkkojen laajentaminen tarjoaa loppukäyttäjille mahdollisuuden vaikuttaa yhä aktiivisemmin sähkömarkkinoilla kuluttajana olemisen lisäksi myös tuottajan sekä varastoijan asemassa. Nämä tekijät ovat alkaneet johtaa muutoksiin energia-alan liiketoimintamalleissa ja systeemiajattelussa. [22, s. 6]

Lohkoketjuteknologian hajautetut ominaisuudet tekevät siitä soveliaan käyttökohteen tulevaisuuden yhä joustavammille energialähteille. Lohkoketjut mahdollistavat automaattisen laskutuksen tarjoten mikromaksu- ja prepaid-mahdollisuuksia. Toiseksi mekanismien muutokset hajautettuihin ja automatisoituihin markkinoihin voisi johtaa itse tuotetun ja käytetyn sähkön kasvamiseen, kun loppukäyttäjät pystyvät toimimaan sähkömarkkinoilla yhä aktiivisemmin ja helpommin vähentämällä markkinoille pääsyn esteitä. [2, s. 151–152]

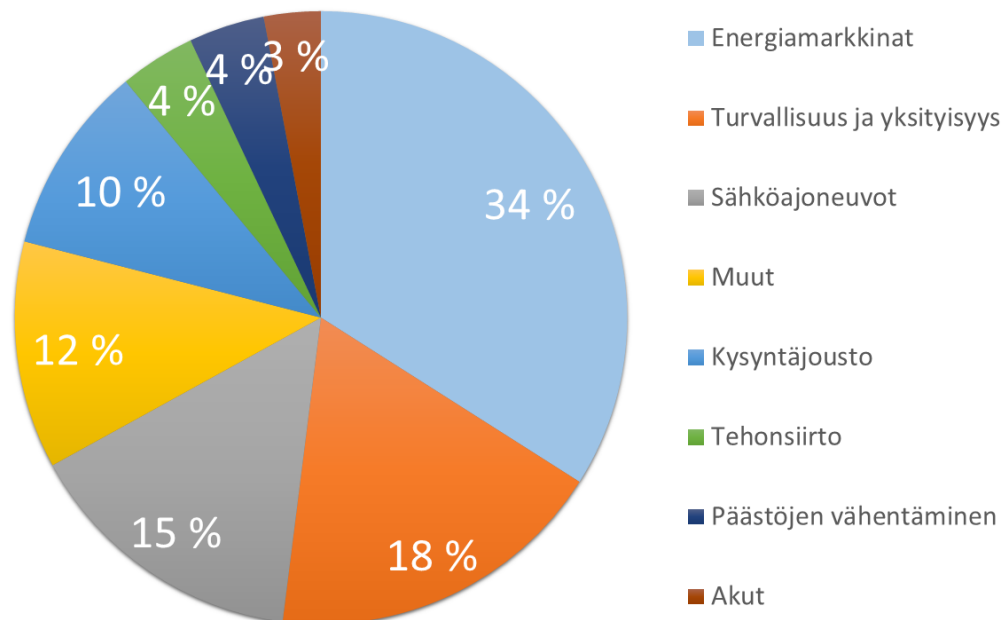
Älykkäissä verkoissa lohkokennuteknologiaa voidaan käyttää älylaitteiden kommunikoinnissa, tiedonsiirrossa ja tiedon varastoinnissa tuomalla lisää turvallisuutta ja viansietokykyä hajautetun ominaisuutensa takia [2, s. 151–152]. Lohkoketjuissa on kuitenkin vielä ongelmallista suurien datamäärien hallinnointi sen skaalautuvuusongelmien takia, mikä tekee siitä haasteellisen käyttöihin, joissa dataa tulee paljon ja nopeasti, kuten esimerkiksi Big Datassa. Tämä on lohkokennuteknologian luontainen rajoite täyssolmujen muodostaman tiedon redundanssin takia.

Teknologia voisi myös auttaa verkon hallinnoinnissa sekä sen optimoinnissa luomalla

joustavuuspalveluita, joissa pienen mittakaavan tuottajat yhdistettäisiin omaksi voimalakseen tasapainottamaan sähköverkkoja. Tällainen alusta voisi toimia nopeasti ja turvallisesti älykkäitä sopimuksia käyttäen.

Sähkön alkuperän varmentaminen tapahtuu tänä päivänä ainoastaan kaupallisella tasolla myymällä takuita eli sertifikaatteja, jotka takaavat, että asiakkaan maksu käytetään uusiutuvien energialähteiden tuotantoon. Järjestelmässä käytetyn sähkön alkuperä ei kuitenkaan ole jäljitettävissä. Lohkoketjun käytöllä sähkön alkuperä voidaan varmentaa fyysisellä tasolla yhdistämällä älykäs sopimus jokaiseen tuotettuun energiayksikköön luoden laitekohtaiset sertifikaatit. [24, s. 46]

Lisäksi verkon prosessien tietoturvaluutta ja yksityisyyttä voidaan saada parannettua kryptografisin menetelmin. [2, s. 151–152] Tällöin lohkoketju voisi suojata verkkoa kyberhyökkäyksiltä, tiedon häviämislä, tiedon muuttumiselta, luvattomilta yhteyksiltä sekä muilta tiedonsiirron tietoturvahaitoilta.



Kuva 3.1. Erilaisten lohkoketjuprojektien koostumus tutkimuksissa (1/2021) [25].

Kehitys on vielä alkuvaiheissa, mutta viime vuosina on ollut paljon etenemistä teknologian integroimisen suhteen eri hankkeiden ja tutkimusten kautta. Esimerkiksi kehitteillä on standardi P2418.5 [26], jonka tarkoitus on luoda viitekehysmalli hajautettujen tilikirjojen, kuten lohkoketjujen, käyttöön energiasektorilla. Aihetta on tutkittu paljon ja suosioon on noussut kuvan 3.1 mukaisesti energiamarkkinaratkaisut. Seuraavissa alaluvuissa käydään läpi näistä merkittävimpiä.

3.1 Älykkäät sopimukset

Yksi suosituimmista sovelluskohteista ovat älykkäät sopimukset (smart contract). Alun perin 1990-luvulla Nick Szabon kehittämän käsitteen merkitys on kasvanut 2010-luvulla keskeiseksi osaksi lohkoketjujen potentiaalia energiasektorilla [27]. Käsitteelle on syntynyt monia määritelmiä, mutta tässä työssä sillä tarkoitetaan lohkoketjuteknologiaan perustuvaa ohjelmaa.

Älykkäät sopimukset ovat suoritettavia tietokoneohjelmia, jotka tekevät toimenpiteitä käyttäjän määrittelemien asetuksien perusteella automaattisesti. Nämä sopimukset ovat puhtaasti koodille rakentuvia. Kaikkein yksinkertaisimmillaan katsottuna älykäs sopimus sisältää monia loogisia lauseita tekniikalla: kun tapahtuu X, tee Y. [28, s. 16] Tapahtumat voivat liittyä energiajärjestelmissä esimerkiksi sähkön hintaan tai säätilaan. Olisi siten mahdollista luoda täysin automatisoitu älykäs sopimus energian tuottajan ja kuluttajan välille ilman välittäjiä, mikä itsenäisesti säätelisi sekä energian toimitusta että maksua [29, s. 6]. Älykkäissä sopimuksissa olennaista on myös se, että ne voivat hallinnoida rahan lisäksi myös omaisuutta tai mitä tahansa asiaa, jolla on arvoa.

Älykkäät sopimukset ovat autonomisia eli ohjelman julkaisun jälkeen käyttäjän ei tarvitse olla yhteydessä siihen sen käynnissä olon aikana [28, s. 16]. Autonomisen luonteensa takia turvallisen älykkään sopimuksen suunnittelu voi olla sähkömarkkinoiden tilanteissa kuitenkin vaikeaa. Huomioon otettavia puolia on niin paljon, jonka takia täysin turvallisen älykkään sopimuksen suunnittelemisen on varsinkin kompleksisissa sopimuksissa lähes mahdotonta. Tämän perusteella ainoastaan yksinkertaisia osto- ja myyntitapahtumia tekevät sopimukset ovat työn tarkastelun kohteena.

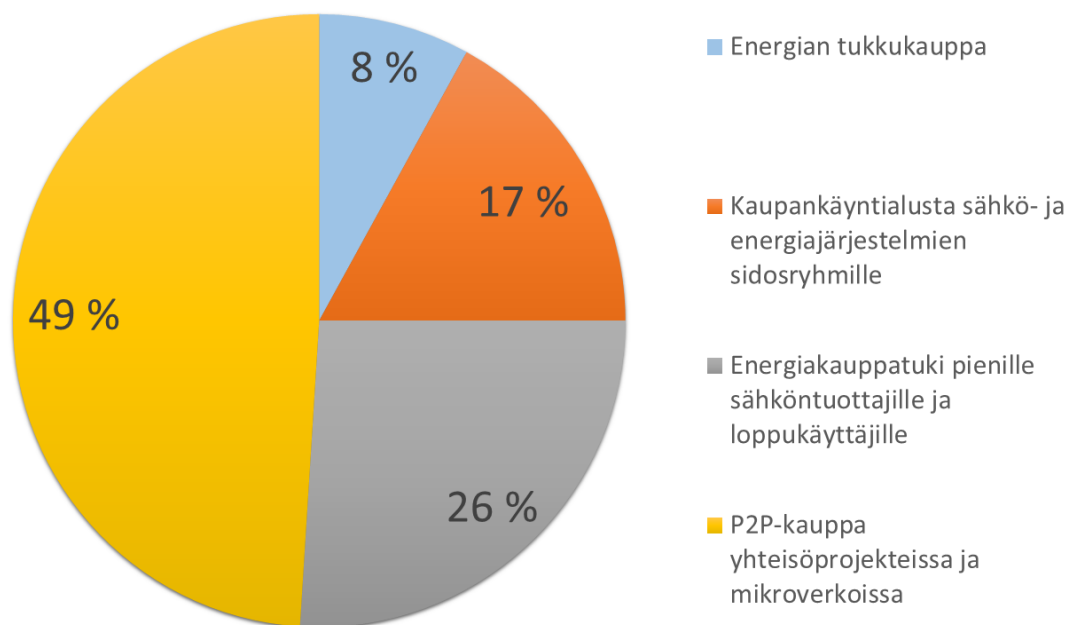
Lisäksi ero normaaleihin sopimuksiin on se, että älykkäät sopimukset ovat hajautettuna vertaisverkossa, jolloin koodin muuttaminen on tietoturvahyökkäystilanteessa erittäin haastavaa [28, s. 16]. Riski kuitenkin on siinä, että älykkään sopimuksen tietolähde voidaan estää, mikä estää myös itse sopimuksen toimimisen.

Näiden pohjalta älykkäät sopimukset tarjoavat omalta osaltaan turvallisuutta, vähentävät virheiden määrää suoritusaikana ja laskevat transaktiokustannuksia prosessien automatisoituessa, jos ne ovat suunniteltu hyvin [28, s. 16]. Suunnittelussa sopimusten turvallisuus on päätavoite, joka voi olla tilanteittain haastavaa varmistaa jokaiselta riskiltä ja skenaariorilta. Tulevaisuudessa kehittyneiden älykkäiden sopimusten tekemät lohkoketjutaapahtumat voivat mahdollisesti kuitenkin ylittää perinteisten sopimusten yksinkertaiset tapahtumat, ja niihin on voitu upottaa laajempia ohjeita. Ne voivat esimerkiksi kerätä ja prosessoida dataa eri lähteistä ja tehdä niiden pohjalta toimenpiteitä. [28, s. 16]

3.2 Energian kaupankäynti

Nykyinen energiakauppa Pohjoismaissa koostuu useista eri osista. Tukkumarkkinoilla kauppaa käyvät tuottajat sekä suurkuluttaja- ja välittäjäyhtiöt, kun taas vähittäismarkkinoilla kaupankäynti on välittäjien ja pienkuluttajien välillä [30]. Lohkoketjujen mahdollistama kaupankäynti vertaisverkossa luo uusia mahdollisuuksia nykyisen energiakaupan tilalle.

Energiamarkkinoilla lohkoketjuteknologia voisi yksinkertaistaa nykyistä monitasoista järjestelmää yhdistämällä tuottajat suoraan kuluttajiin edellyttäen, että pystymme muuttamaan nykyisten verkkojen hallinnointitapoja vastaamaan tekniikan vaatimuksia [29, s. 16]. Lisäksi lohkoketjujen käyttäminen voisi automatisoida kaupankäynnin maksuprosesseja ja tehdä niiden toimeenpanosta lähes välittömiä käyttämällä älykkäitä sopimuksia. Maksujen nopea toteutuminen tulee olemaan tulevaisuudessa yhä tärkeämpää, koska transaktioiden määrien odotetaan kasvavan, kun yhä useammat kotitaloudet pystyvät tuottamaan, kuluttamaan ja kauppaamaan sähköä. Kuva 3.2 esittää erilaisten lohkoketjualoitteiden koostumuksen hajautetussa energiakaupassa.



Kuva 3.2. Erilaisten lohkoketjuprojektien koostumus energiakaupassa (2020) [31].

IFPENin tutkimuksessa käytiin läpi 65 eri projektia ja ne kategorisoitiin energiakaupan tilanteessa yllä oleviin kategorioihin riippuen siitä, että keiden osapuolten vaihdantaan se liittyi. Maantieteellisesti näistä 60 % oli käynnissä Euroopassa, 14 % Pohjois-Amerikassa ja 14 % Aasiassa [31].

Älykkäät sopimukset ovat olennainen osa hajautetun energiakaupan toimintaa. Nämä sopimukset sisältävät kaikki ohjeet minkä perusteella automaattinen kauppa verkossa toimisi. Lohkoketjuissa kaupankäynnin välineenä käytetään poletteja eli rahakkeita edusta-

maan esimerkiksi tiettyä määrää energiaa. Eräs yksityiskohtainen toteutus olisi Di Silvestren et al. [5, s. 9] mukaan kolmiosainen:

1. tuottajan siirtäessä energiaa verkkoon, hän saa tietyn määrän poletteja itselleen
2. kuluttaja saa saman määrän energiapohjetteja lähettäessään maksun tuottajalle
3. energiapohjetit tuhotaan sitä mukaan kun kuluttaja käyttää energiaa.

Ensimmäistä vaihetta käytettäisiin siirron tarkastamiseen sekä jäljitykseen ja kokonaisuudessaan jokainen vaihe tuottaisi oman älykkään sopimuksensa eli yhteensä 3 kappaletta [5, s. 9]. Hajautettu verkko toimii kaksisuuntaisesti eli käyttäjät voivat vaihtaa kuluttajana ja tuottajana olemista, jos ylimääräenergiaa on myytäväksi. Ostaja pystyy myös myymään ostamiaan energiapohjetteja myös eteenpäin.

Pohjetteja voi olla käytössä samanaikaisesti eri tyyppejä. P2P-kaupankäynnissä mahdollisia ovat sähköverkkoon syötetyn energian määrää kuvaava pohjetti tai sen käyttöön oikeuttava pohjetti (tokenized electricity), transaktioiden arviointiin ja selvittelyyn käytettävä pohjetti (valuation token) ja yksityisen lohkoketjun tapauksessa pohjetti, joka oikeuttaa liittymään tai hakemaan dataa siitä (access token). Lisäksi käytössä voi olla palkkion lunnastukseen (reward token) tai datan kapselointiin (tokenized data) käytettävä pohjetti. [32, s. 2]

Nykyinen verkko on suunniteltu yksisuuntaiseksi, mutta muutos kaksisuuntaiseen järjestelmään on jo meneillään. Tälläkin hetkellä omakotitaloudet voivat myydä ylijäämäenergiaansa verkkoon, mutta pientuottajien täytyy hankkia itse ostaja ja tehdä tämän kanssa sopimus [33]. Ehdotettu vertaisjärjestelmä mahdollistaa prosessin automatisoinnin siten, että älykkäät sopimukset 'neuvottelisivat' ostajan jokaisena ajanhetkenä valittuihin parametreihin pohjautuen [2, s. 152]. Kaupan on siten mahdollista toimia lähes reaaliaikaisesti. Esimerkiksi Grid+ alustassa sähkökauppaa käydään varttituntiperusteisesti [5, s. 12]. Tällainen dynaaminen kokoonpano muuttaa sopimuksien rakennetta pitkistä määräaikaisista sopimuksista hyvin lyhytaikaisiin ja joustaviin sopimuksiin.

Mahdollisuus kolluusion syntymiselle nostaa riskejä kilpailun toteutumiseksi järjestelmässä, mutta varsinkin laajemmassa käytössä riski on pieni. Kolluusiolla tarkoitetaan kahden tai useamman osapuolen välistä sopimusta avoimen kilpailun rajoittamiseksi. Suljetuissa lohkoketjuissa tämä voisi toteutua esimerkiksi estämällä jonkun osapuolen liittymisen lohkoketjuun tai tuottajien vilpillinen sähköhintojen nostaminen.

Järjestelmässä taseen ylläpitäminen tuo kuitenkin omat haasteensa sen toimimiseen. Esimerkiksi miten tasetta pidetään yllä, kun tuotantoa on enemmän kuin kulutusta tai tuotantoa on liian vähän. Mahdollinen ratkaisu olisi esimerkiksi sähkövarastojen käyttäminen, joihin ylimääräenergia viettäisiin automaattisesti ja josta energiaa otettaisiin käyttöön tuotannon ollessa liian vähäistä, mutta tämäkään ei skaalaudu loputtomiin [29, s. 17]. Toisaalta kaupankäynnin siirtyessä reaaliaikaisempaan suuntaan, tasesähkön tarve voi

vähentyä. Kuitenkin taseen ylläpitäminen vaatii suurta koordinaatiota, johon lohkoketju yksinään ei pysty vaan tähän tarvitaan myös tarkkoja laitteistoja ja ohjelmistoja tekemään ennusteita. Tämänkin takia useimmat lohkoketjuprojektit keskittyvätkin ainoastaan yhteen sähkömarkkinan osa-alueeseen.

3.3 Mikroverkkoalustat

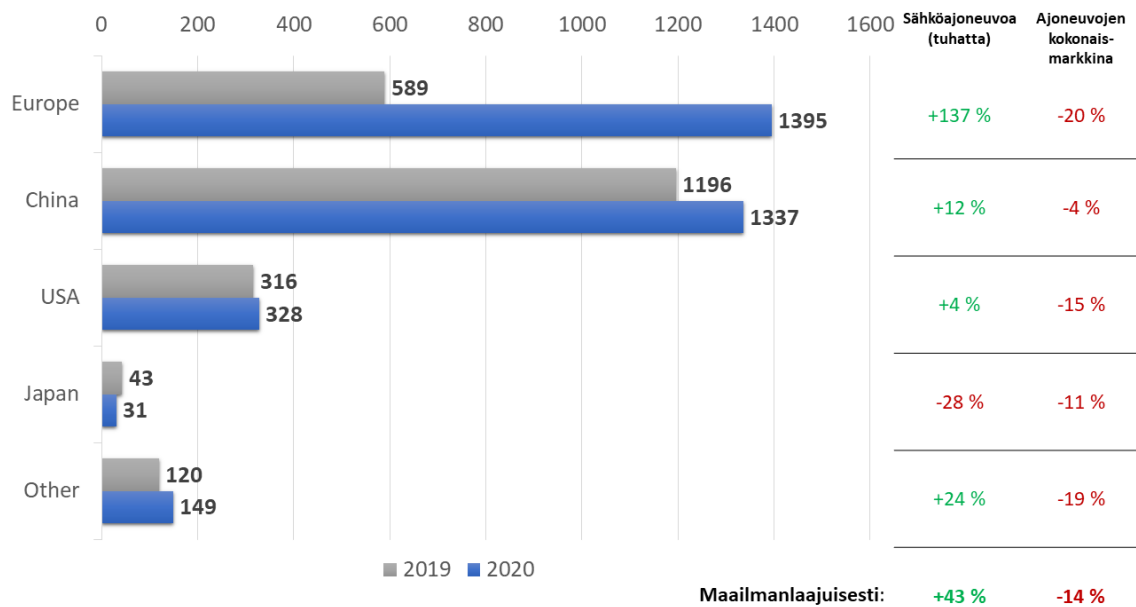
Aikaisemmassa luvussa käydyn vertaisten välisen energiakaupan toteuttaminen laajassa mittakaavassa sähkömarkkinoiden vakiintuneessa ja kontrolloidussa rakenteessa voi olla haastavaa toteuttaa, vaikka huomioon ei otettaisikaan teknologian tämänhetkisiä rajoitteita. Täten monet muut energiakauppasovellukset, jotka eivät ole luonteeltaan niin radikaaleja, saavat todennäköisemmin kaupallista vetovoimaa energiasektorilla. Pienemmässä mittakaavassa hajautetun sähkökaupan mahdollistaminen mikroverkoissa on ensimmäinen askel sen toteuttamisessa, ja teknologia myös vaikuttaisi sopivan kaikkein parhaiten tälle alueelle [2, s. 154]. Mikroverkoissa kauppaa voidaan käydä oman energiayhteisön alueella muun sähkömarkkinan pysyessä samanlaisena. Konseptin suosio huomataan myös kuvan 3.2 mikroverkkoprojektien määrästä.

Mikroverkoilla tarkoitetaan kuormien, hajautettujen energiaresurssien (esim. aurinkokennot, mikroturbiinit ja tuulivoima) ja energiavarastojen (esim. akkuvarastot) ryhmittymää, joiden avulla energiaa tuotetaan ja käytetään paikallisesti. Mikroverkoista on erilaisia muotoja: ne voivat olla fyysisiä ja yhdistettynä kantaverkkoon usein yhden liittymispisteen takana tai autonomisina ja eristettynä kantaverkosta. [34, s. 6153]. Lisäksi on virtuaalisia mikroverkkoja, jotka koostuvat monen liittymispisteen takana olevista resursseista. Saatuja hyötyjä ovat pienemmät sähköverkon häviöt, kun tuotanto on kulutuksen vieressä, sähköverkon joustavuuden parantuminen minimoimalla verkon epätasapainoa ja maksimoimalla siirtokykyä sekä käyttöikää [2, s. 154]. Lisäksi mikroverkoilla on potentiaalia tuoda ympäristöllisiä ja sosioekonomisia etuja [35]. Mikroverkkojen ja lohkoketjujen yhdistämisestä on lukuisia projekteja joko käynnissä tai testausvaiheessa, joista käydään muutama läpi luvussa 4.

3.4 Sähköajoneuvojen latausjärjestelmät

Sähköajoneuvoilla on suuri potentiaali siirtyä käyttämään lohkoketjuverkostoja sekä lataamisessa että energian varastoinnissa. Sähköajoneuvojen käytön jatkuva kasvu riippuu suurelta osin alhaisemmista kustannuksista, suuremmista latausnopeuksista, paremmasta saatavuudesta ja helppokäyttöisyydestä. Viime vuosina niiden käyttöönottoaste onkin kasvanut räjähdysmäisesti kuvan 3.3 mukaisesti: Vuonna 2020 täyssähkö- ja hybridiautojen myynti kasvoi maailmanlaajuisesti 43 % Euroopan ohittaessa Kiinan myyntiluvuissa ja kokonaisautomarkkinoiden laskiessa 20 %. Euroopassa sähköautojen myynti nousi jo-

pa 137 % edellisestä vuodesta kokonaismäärän ollessa lähes 1,4 miljoonaa autoa. [36] Tilastoista huomataan se, että siirtymä pois polttomoottoriautojen käytöstä sähköautoihin on jo merkittävää.



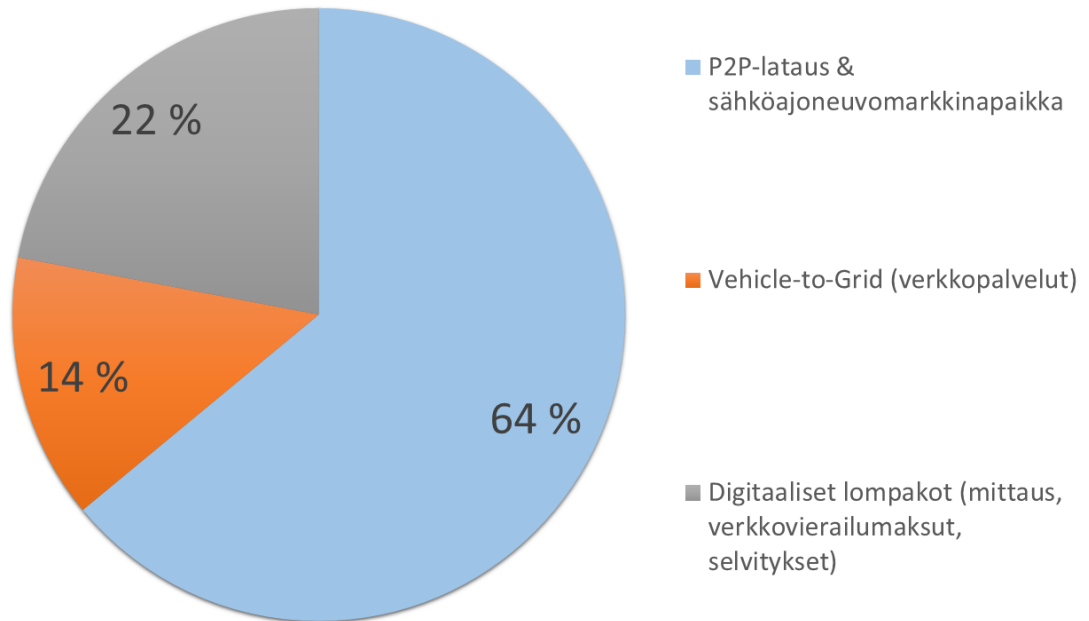
Kuva 3.3. Hybridi- ja täyssähköautojen myyntiluvut vuosilta 2019 ja 2020 [36].

Jatkuvan kasvun myötä vahvojen järjestelmien käyttöönotto sähköautojen latausta varten on tärkeä yhteiskunnan kehityksen kohde. Nykyistä latausinfrastruktuuria rajoittaa monimutkaiset maksujärjestelmät, latauspisteiden määrä sekä yleinen epävarmuus. Uusien teknologioiden ilmentyessä (P2P, Vehicle-to-Grid) lohkoketjujen käyttö voisi toimia oleellisenä ratkaisuna jo muutenkin hajautetulla liikenteen alalla.

Yksi tämän hetkinen ongelma on latauspisteiden rakennuttamiseen, ylläpitämiseen ja transaktioiden prosessoimiseen tarvittava pääoma [37, s. 12]. Tällä hetkellä eri latauspalveluita tuottavien yhtiöiden välillä on erilaiset maksujärjestelmät, mikä edelleen monimutkaistaa palvelun käyttöä. Haastetta laajentaa se, että Suomen hallituksen tavoitteena on päästä hiilineutraaliuteen vuoteen 2035 mennessä. Tämä tulee vaatimaan sähköautojen latauspaikkojen mittavaa laajentamista varmistamaan se, että autoilija pystyy lataamaan sähköautonsa kotona, työpaikalla ja pitkillä matkoilla.

Ympäristöministeriön ehdottaman lain [38] perusteella Suomessa rakennettaisiin vuoteen 2030 mennessä noin 73 000 – 97 000 uutta latauspistettä ja 560 000 – 620 000 latauspistevalmiutta. Kustannukset yhden latauspisteen rakennuttamisesta maksaa 1100 - 2300 euroa normaalitehoisen latauspisteen tapauksessa ja 25 000 - 50 000 euroa pikalatauspisteen kohdalla ilman arvonlisäveroa. Kuluihin vielä jää lisäksi latauspistevalmiuksien putkittamiset ja mahdollisesti tarvittavat muutokset sähköpääkeskuksissa. [38] Lohkoketjuteknologia voi vähentää latausinfrastruktuurin laajentamiskustannuksia mahdollistamalla yksityisomistuksessa olevien latauspisteiden liittämisen verkkoon ja julkiseen

käyttöön. Tämä kasvattaa julkisten latauspisteiden määrää ja tukee sähköautojen suurempaa käyttöönottoa. Lisäksi tulevaisuudessa latausmahdollisuudet voivat laajentua latausasemista mittavampaan järjestelmään. Esimerkiksi liikennevaloissa autot pystyisivät latautumaan langattomasti induktiolatauksen avulla odottamisen aikana. Lataustapahtumat toimisivat älykkäisiin sopimuksiin ja mikromaksuihin pohjautuen. [37, s. 12–13] Kuvassa 3.4 on IFPENin tekemän tutkimuksen suosituimpien lohkoketjusovellusten kategoriat sähköajoneuvo-markkinoilla [31].



Kuva 3.4. Erilaisten lohkoketjuprojektien koostumus sähköisen liikkuvuuden alueella (2020) [31].

Sähköautojen latauksen verkkovierailulla eli roamingilla tarkoitetaan sitä, että lataaja käyttää jonkin toisen energiajakelijan latauspisteitä ulkomailla tai kotimaan sisällä. Suomen julkisia latauspisteitä hallitsee kolme toimijaa: Virta 60 % markkinaosuudella, Fortum 25 % osuudella ja K-Lataus 15 % osuudella. [39] Pahimmillaan verkkovierailu toisen toimijan latauspisteellä nostaa kustannuksia moninkertaisesti, mikä tekee koko latausverkon käytöstä epäedullista ja monimutkaista [40]. Tilannetta voidaan verrata matkapuhelinten alkuaikoihin, jolloin verkkovierailuhinnat olivat hyvin korkeat.

Lohkoketjujen ratkaisu ongelmaan tarjoaa yhteisen alustan latausjärjestelmien yhdistämiseksi, mikä toimisi myös rajojen ylittävissä matkustamisessa ja parantaisi pitkien matkojen tekemistä sähköautoilla [2, s. 165]. Alustan sisällä julkiset ja julkisesti tarjolla olevat yksityiset latauspisteet olisivat käytössä kaikille verkon käyttäjille saman kanavan kautta. Hajautettu latausjärjestelmä parantaa vikasietoisuutta, tervettä kilpailua sekä yleistä ymmärrystä poistamalla monimutkaiset järjestelmät käytöstä.

Monissa tilanteissa lohkoketjuja voidaan hyödyntää, mutta useimmissa tapauksissa lohkoketjun käyttö ei kuitenkaan ole ainoa ratkaisu. Esimerkiksi roaming palvelu tai lataus

liikennevaloissa on myös mahdollista toteuttaa perinteisin ratkaisuin käyttämällä lähimaksua auton järjestelmään yhdistetyn luottokortin tai muun maksutavan kautta. Lohkoketju tarjoaakin vain yhden tavan toteuttaa kyseisiä järjestelmiä. Lohkoketjuteknologian suurimmat hyödyt tällä alueella on liikkuvan datan suurempi turvallisuus aikaisemmin läpikäytyjen ominaisuuksien takia. Tämä on sähköautojen ja sähkömarkkinoiden tilanteessa kriittinen osa niiden toimintaa, jota voitaisiin teknologian avulla parantaa. Hajautetun ominaisuuden takia keskitetysti hallitun latausjärjestelmän asema muuttuu avoimeksi ja suoraviivaisemmaksi, jolloin vaikkapa naapurin jaetun lataustolpan käyttäminen siirtää maksun suoraan hänelle. Keskitetyn toimijan palvelimet toimivat ns. single-point-of-failurena, joka kaatuessaan voi haitallisesti vaikuttaa koko verkon toimintaan [2, s. 145]. Toisaalta lohkoketju lisää järjestelmän kompleksisuutta, mikä tuo haasteita sen kehittämiseen.

3.5 Joustopalvelut

Sähköjärjestelmässä sähköä pitää tuottaa joka hetki yhtä paljon kuin sitä kulutetaan. Uusiutuvien energialähteiden käytön yleistymisen tuo verkko-operaattoreille uusia haasteita tämän toteuttamiseksi. Tuotantojärjestelmän keskitetty arkkitehtuuri ja suurissa laitoksissa tapahtuva tuotanto on muuttumassa hajautettuun ja pienemmissä yksiköissä tapahtuvaan tuotantoon kuluttajien aseman muuttuessa aktiiviseksi toimijaksi. Tuottajien määrän kasvaessa myös koordinaatiovaikeudet kasvavat [5, s. 13]. Teknisiä haasteita on esimerkiksi: tuotannon vaihtelevuus ja ennustaminen sekä tuotannon aikatauluttaminen.

Vertaistransaktio-konseptin lisäksi lohkoketjun käyttäminen tehotasapainon hallinnassa joustopalveluiden avulla on myös tutkimuksen kohteena. Oikeastaan nämä molemmat konseptit ovat hyvin samankaltaisia toiminnoiltaan, mutta joustopalveluiden tarkoituksena on vain tarjota tasapainotusratkaisuja. Tässäkin olennainen tekijä on älykkäät sopimukset, joihin voidaan ohjelmoida kannustimia sekä rangaistuksia, jolloin se toimii hajautettuna kontrollointimekanismina. Joustopalveluiden osa-alueella lohkoketjujen toiminta voidaan yhdistää erilaisiin aggregointisovelluksiin kuten virtuaalisiin voimalaitoksiin ja vehicle-to-grid teknologiaan. Virtuaalinen voimalaitos on hajautettu voimalaitos, joka yhdistää hajautettujen energialähteiden kapasiteetin sähköverkon tuotannon tehostamiseen ja säätämiseen [10, s. 193].

Energiavarastojen käyttö jakeluverkoissa on vielä harvinaista ja haasteellista suurten kulujen vuoksi. Viime vuosina akkujen hinnat ovat kuitenkin laskeneet tasaisesti, joten voidaan olettaa, että energiavarastojen käyttö tulee kasvamaan tulevaisuudessa [41]. Sähköajoneuvojen käyttö mobiileina akkuina laajentaa autojen käyttöä liikennevälineestä energijärjestelmien kanssa kommunikoivaksi energiavarastoksi. Kyseisen Vehicle-to-Grid tekniikan avulla voidaan tasapainottaa sähköverkkoa hallinnoimalla sähköautojen lataustehoa vastaamaan kysyntäkäyrää. Lisäksi sähköä voidaan myös myydä takaisin kaksisuuntaisen lataamisen avulla. Näin ollen kuljettajia voidaan kannustaa lataamaan

sähköautojaan ruuhka-aikojen ulkopuolella, kun kulut ovat pienempiä. Toisaalta ruuhka-aikoina sähköautojen omistajia kannustetaan myymään varastoitua energiaa takaisin sähköverkkoon tai muille sähköautoille. [42, s. 12] V2G:n ytimessä lohkoketjunkerros tarjoaa turvallisen ja luotettavan yhteisen tilikirjan, joka tehostaa sähköverkon toimintaa eri osapuolten välisten automatisoitujen tieto- ja energiasiirtojen avulla. Kaiken kaikkiaan varastoitua energiaa voidaan hyödyntää tuotannon ja kulutuksen ohjaamisessa, huippukapasiteetin leikkauksessa, sähkön säädössä ja sähkötaseen hallinnassa [22, s. 17].

Tutkimuksia akkuvarastojen hyödyistä P2P-energiamarkkinoilla on toteuttanut esimerkiksi Lüth et al. (2018) [43] suunnittelemalla energiankäytön optimointiin tarkoitetun vertaiskaupan käyttämällä Lontoon sähkömarkkinoiden dataa. Tutkimuksessa arvioitiin loppukäyttäjien saamia etuja markkinasuunnittelusta, jossa omakotitalouksilla olisi mahdollisuus käyttää yksityisiä akkuja tai yhteisön omistamia akkuja. Yhteisön omistamat akut eroavat yksityisomistuksessa olevien akkujen käytöstä siten, että yhteisön useampi jäsen käyttää samaa suurikapasiteettista akkua, jota he voivat ladata saadakseen korvauksen tai käyttää asetetun hintatason mukaisesti. Lopputuloksena yhteisön jäsenen saivat potentiaalisesti jopa 31 % säästöt sähkölaskusta 9 kuukauden ajalta, mistä noin 22 % oli P2P-vaihdannan tulosta ja 17 % akkujen käytöstä johtuvaa säästöä. [43, s. 1240]

3.6 Soveltuvuus energiasektorille

Energiajärjestelmät ovat kokeneet viime vuosien aikana suuria muutoksia tekniikan, talouden sekä politiikan näkökulmista. Energiamurroksessa teknologioiden, sääntelyiden ja toimintatapojen muutokset tuovat mahdollisuuksia uusien tekniikoiden hyödyntämiseksi. CIRE Din lohkoketjuteknologiaa tutkivassa raportissa [44, s. 4] analysoitiin kahdeksan muutosta, mitä energiajärjestelmät ovat kokeneet viime vuosina:

1. aurinkokennotekniikan laitteiden kustannusten pieneneminen
2. akkujen varastointikustannuksien pieneneminen
3. asiakkaiden osallistumista ja omatuotantoratkaisujen käyttöönottoa suosivan sääntelyn kehitys
4. älymittareiden käyttöönotto
5. edullisten anturien saatavuus rakennusten energiatehokkuuden seurantaan
6. internetin laaja saatavuus mobiililaitteissa
7. suurikapasiteettisten ja matalaviiveisten viestintäinfrastruktuurien kehittyminen
8. asiakkaiden kiinnostuksen nostaminen uusiin toimintatapoihin.

Näistä syistä uusien teknologioiden, kuten lohkoketjun, sovellukset tulevat kiinnostavaksi mahdollisuudeksi.

Aurinkosähkön hinta on halventunut merkittävästi viime vuosikymmenen aikana. IEA:n julkaiseman raportin mukaan nykypäivän sähköntuotanto aurinkosähköllä on halvinta sähköä mitä on koskaan tuotettu, ja suuressa osassa maista aurinkosähkөөn investoiminen on jo halvempaa kuin hiili- ja kaasuvoimaloihin. [45, s. 18] Samankaltaisesti akkujen hintataso on laskenut 87 % vuodesta 2010 vuoteen 2019, ja lisäksi akkujen energiatiheys on kasvanut vuosittain 4 - 5 % [41]. Molemmat tekijät vahvistavat hajautetun tuotannon käyttöä, jonka sovellusalueelle lohkoketjuteknologia vaikuttaisi sopivan hyvin. Tällä alueella lohkoketjun hyödyntämismahdollisuudet liittyvät uusiutuvien energialähteiden tuotannon sertifiointiin, jäljitykseen, verkon hallintaan, hajautettujen resurssien koordinointiin, järjestelmän suojaamiseen ja markkinaratkaisuihin. [5, s. 5].

Uusien teknologioiden hyödyntämisessä on oleellista tutkia, onko sen käyttöönottamisesta saadut hyödyt suurempia kuin kustannukset ja mahdollisesti tulevat haitat. Vaikkakin lohkoketjuissa on tiettyjä hyötyjä, on samankaltaisten sovellusten toteuttaminen on usein mahdollista ilman lohkoketjuja. Esimerkiksi monet käyttökohteet energiasektorilla edellyttävät keskitettyä järjestelmää mukailevia yksityisiä lohkoketjuja turvallisuuden ja paremman skaalautuvuuden sekä tehokkuuden takaamiseksi. Tällöin jos lohkoketjujen muita ominaisuuksia ei tarvita, on sen käyttöä vaikea suositella kyseiseen järjestelmään tänä päivänä. Yksi syy tähän on se, että perinteisten tietokantojen operoiminen on halvempaa, koska lohkoketjut käyttävät nykyisillä menetelmillä huomattavasti enemmän energiaa. Luvussa 5.2 on energiankulutuksesta tarkemmin.

Lohkoketjuja hyödyntääkseen mikroverkot tulevat tarvitsemaan sekä ohjelmistoja että laitteistoja huolehtimaan siitä, että verkko toimii tasapainossa ja vuorovaikutuksessa muiden verkkojen kanssa. Verkkojen ylläpitäminen tulee vaatimaan tarkkoja mittareita ja antureita mittaamaan tuotantoa, kulutusta ja tekemään vaativia laskutoimituksia reaaliaikaisten hintojen määrittämiseksi sekä lähettämään ja vastaanottamaan dataa [37, s. 11]. Kehittyneet mittarit tulevat mahdollisesti tarvitsemaan toiminnoissaan jopa kymmenen kertaa suurempaa kaistanleveyttä P2P-markkinoilla, mikä nostaa vaatimuksia tiedonsiirtoteknologioiden käyttämisestä [46]. Suomessa on hyvä tilanne siihen nähden, että älymittareita ja etäluentaa on käytetty jo suhteellisen pitkään, joten jonkinlainen järjestelmä on jo kehittämisen tukena.

On myös huomioitava se, että P2P-energiakaupassa kaupankäynnin turvaamiseksi ja mahdollistamiseksi on vaatimuksia muun muassa yhteyksien kapasiteetista ja sääntelystä. Reaaliaikaisilla markkinoilla myös laitteistojen kommunikaation luotettavuus on välttämätön osa sen toimintaa. Useimmiten tämänkaltaiset tapaukset tarvitsevat verkonhaltijoiden toimimista hallinnoivana tahona, joka pitää huolen verkon oikeanlaisesta toiminnasta. Tämän takia yksityiset lohkoketjut voivat olla sopivampia erityisesti sähköjärjestelmissä, joissa tarvitaan jonkinlaista keskitettyä hallitsijaa. Edelleen markkinat saattavat edellyttää voimakasta valvontaa tapahtumien toteuttamisen aikana, koska mahdollisia teknisiä ongelmia voi olla haastavaa korjata. [5, s. 7]

4. TÄMÄNHETKISIÄ HANKKEITA

Lohkoketjun kehitys on vielä alkuvaiheissa, mutta energiasektori on soveltamisen kärkipäässä yksi edistyneimmistä sektoreista vain finanssialan ollessa edellä [31]. Yleisellä tasolla Suomessa on toteutettu hankkeita monipuolisesti logistiikassa, verotuksessa, sosiaali- ja terveydenhuollossa sekä osakekaupassa [13, s. 55–56]. EU Blockchain Observatory & Forumin julkaisemassa raportissa [47] identifioitiin yli 150 Suomalaista lohkoketju startupia. Yksi ensimmäisistä ja tunnetuimmista on vuonna 2012 julkaistu *Local- Bitcoins*, jossa eri maiden käyttäjät voivat tehdä vaihtokauppaa Bitcoineista. Suomen julkinen ja yksityinen sektori on ollut kiinnostunut lohkoketjun sovellutuksista, ja startupit ovat keränneet noin 4,6 miljoonan euron edestä rahoitusta projekteihinsa. [47, s. 54–57] Tällä hetkellä elämme lanseerausvaiheen loppupäätä hiljalleen siirtyen kohti kasvuvaihetta yhä useampien projektien käynnistyessä ja tullessa julkisuuteen.

4.1 LO3 Energy -mikroverkko

Yksi ensimmäisistä energiasektorin projekteista on vuonna 2015 *LO3 Energy*n lanseeraama mikroverkossa toimiva vertaisten välinen sähkökauppa. New Yorkin Brooklynissa toimivan mikrosähköverkon tavoitteena on yhdistää Brooklynin asukkaat omavaraiseen mikroverkkoon, jossa sähköntuotanto toimii kantaverkosta irrallisena osana. Tällainen mikroverkko parantaisi Brooklynin asukkaiden sähköntoimituksen sietokykyä esimerkiksi luonnonkatastrofeilta, jolloin voisi tapahtua sähkökatkoja. Toiseksi kuluttajia kannustetaan rakentamaan aurinkopaneeleita, jolloin saadaan vähennettyä kasvihuonekaasuja. Projektissa lohkoketjualustaa kehitetään hajautettujen energialähteiden tehokkaaseen hyödyntämiseen vertaiskaupan avulla. [37, s. 14]

Yksityinen lohkoketjuverkko muodostettiin aluksi käyttämällä Ethereum-pohjaisia älykkäitä sopimuksia, mutta skaalausongelmien takia LO3 Energy on kehittänyt oman luvallisen lohkoketjualustan (permissioned data platform) Exergy. Lohkoketjussa siirretään tuotantoja kulutuslukujen lisäksi yleistietoa mikroverkosta, kuten jännite- ja loistehotietoja, joita voidaan käyttää muihin tarkoituksiin. [48].

Projektin tila tänä päivänä on kaukana tavoitteellisesta toiminnasta. Alueella ei ole käytännössä toimivaa mikroverkkoa, vaan kuluttajat ja pientuottajat ovat olleet yksinkertaisesti liitettynä jakeluverkkoon. Tällöin itse vaihdantakin on liittynyt ainoastaan uusiutuvan ener-

giantuotannon sertifikaatteihin. Iso ongelma projektin etenemiselle on ollut lainsäädännön puolelta, koska voimassa olevan valtion lainsäädännön mukaan vain sähkölaitokset ja hyväksytyt vähittäismyyntipalvelut saavat myydä energiaa [37, s. 14]. Projekti kuitenkin sai vuonna 2020 luvan toteuttaa 12 kuukauden pilotin energianvaihdannasta, mihin osallistuu 200 kuluttajaa ja 40 pientuottajaa. Pilotin tarkoituksena on selvittää vertaisten välisen energiankaupankäynnin toimivuutta. [49]

4.2 Power Ledger -kaupankäyntialusta

Australialainen yritys *Power Ledger* kehittää lohkoketjunalustaa, joka laajentaa sovelluksia perinteisistä energiakaupoista myös sähköautoihin, IoT/älylaitteisiin, automaatioon, verkon hallintaan ja päästökauppaan liittyviin sovelluksiin. Power Ledgerin alusta käyttää kahden poletin järjestelmää, mitkä toimivat kahdella eri lohkoketjunkerroksella. Sparkz poleteilla käydään energiakauppaa ja ne edustavat tiettyä energian määrää, kun taas POWR poletin avulla saa oikeuden tehdä kauppa alustassa (access token). Teknisesti Power Ledger käyttää hybridimallia, jossa mukana toimii sekä julkinen Ethereum että yksityinen 'EcoChain' lohkoketju minimoidakseen verkon energiakuluja, koska käytössä on PoW:n sijasta PoS konsensusmekanismi. [50, s. 12–13, 16–17, 22–24]

Power Ledgerin kauppapaikalla pientuottajat hyötyvät suuremmista tuloista sähköyhtiölle myymisen sijasta. Lisäksi lohkoketjua käytetään reaaliaikaiseen uusiutuvan energian kaupankäyntiin, varmistukseen, jäljitykseen ja välittäjien poistamiseen. [50, s. 12] Alustavissa kokeissa saatujen tulosten nojalla suuremman kulutuksen (>11 kWh/päivä) omaavat asiakkaat hyötyivät halvemmista sähkökuluista, kun taas pienemmän kulutuksen (<11 kWh/päivä) omaavien asiakkaiden sähkölaskut olivat kalliimmat testin aikana. Tähän syytä oli alustan käytön perusmaksun suuruus, joka ei riipu kulutetun energian suuruudesta. Testissä tuotannon ollessa suurempaa kuin kulutus, tuotettu energia myytiin takaisin vähittäismyyjälle, ja tuotannon ollessa pienempää, kuluttajat ostivat sähkönsä vähittäismyyjiltä. [51, s. 13]

Power Ledgerin kaltaisia hankkeita on maailmalla paljon, kuten Isosta-Britanniasta peräisin oleva *Electron*, joka kehittää ElectronConnect nimellä olevaa markkina-alustaa energiasektorin käyttöön [52]. Amerikassa *Grid+* luo ohjelmisto- ja laitteistopinoa, joka automaattisesti prosessoi maksuja ja tekee sähkökauppoja [53]. Saksassa *Lition* on lisensoitu energiantoimittaja, joka käyttää lohkoketjuihin perustuvaa hajautettua kauppapaikkaa. Litionin palvelu on toiminnassa jo yli tuhannessa kaupungissa ympäri Saksaa. [54]

4.3 Share&Charge -sähköautojen latausjärjestelmä

Saksalainen *Share&Charge*-hanke pyrkii hajauttamaan sähköautojen latausinfrastruktuuria lohkoketjuteknologiaan rakentuvan verkoston käyttöön otolla. Ethereumiin ja älykkäi-

siin sopimukseen perustuva P2P-verkko yhdistää sähköautojen käyttäjät suoraan yksityisiin ja julkisiin latauspisteoperaattoreihin siten, että operaattorit vuokraavat latauspisteitä AirBnB tyyllisesti. Siten lataushinnaston verkossa määrittelevät latauspisteoperaattorit itse. Latausprosessi toimii siten, että käyttäjä etsii alueensa operaattorilistan ja saa samalla niiden hinnoittelun sekä muut tiedot sovelluksen kautta. Maksu tapahtuu myös sovelluksessa virtuaalisella lompakolla. Kuka tahansa verkon jäsen voi monitoroida kaikkia transaktioita lohkoketjun läpinäkyvyyden avulla, mutta vaihdannan identiteetit ovat salatut. Share&Chargen malli mahdollistaa latausinfrastruktuurin laajentumisen entistä paremmin tukien yhä enemmän kasvavaa sähköajoneuvo-markkinaa, koska alusta kannustaa rakentamaan myös yksityisomistuksessa olevia latauspisteitä julkiseen käyttöön. Alusta myös tekee latauspisteiden toiminnan yhteensopivaksi toistensa kanssa yhden kanavan kautta. [55, s. 25]

Vuoden 2018 alussa MotionWerkin kehittämän Share&Chargen liiketoimintamalli muuttui Share&Charge palvelun ja sovelluksen ylläpitämisestä kokonaan itsenäiseksi ja voittoa tavoittelemattomaksi organisaatioksi. Tähän mennessä palvelu oli kerännyt lähes 1500 yksityistä ja julkista latausasemaa sekä tuhansia rekisteröityneitä käyttäjiä Saksassa. [56] Palvelun käynnissä oloaikana konseptia maiden rajojen ylittävistä sähköisen liikkuvuuden latausjärjestelmästä tehtiin eri kokeiluja, kuten Oslo2Rome nimisessä testissä, jossa testattiin onnistuneesti matkustamista kuuden eri maan läpi käyttäen ainoastaan lohkoketjuverkon latauspisteitä. Kyseisessä testissä oli mukana myös Suomen energiayhtiö Fortum. [57] Muutoksessa sähköautojen latausjärjestelmän ohjelmistorunko (Open Charging Network) muutettiin avoimen lähdekoodin mukaiseksi eli kaikille vapaaseen käyttöön tukeakseen tulevaisuuden latausinfrastruktuuria. [56]

4.4 Horisontti-ohjelmat Euroopassa

EU on ajanut tutkimusta lohkoketjuteknologian hyödyntämiseksi energiasektorilla osana massiivista Horisontti 2020 (Horizon 2020) tutkimus- ja innovaatio-ohjelmaa, jonka kautta myönnettiin yli 200 miljoonaa euroa rahoitusta vuosina 2014 - 2020 lohkoketjuinnovaatioihin. Horisontti 2020 ohjelmaa jatkaa Horisontti Eurooppa (Horizon Europe) ohjelma, joka aikoo panostaa vielä enemmän keinoäly- ja lohkoketjuteknologioihin arvioiden ensimmäisen vaiheen investointien olevan 500 – 700 miljoonaa euroa. [58]

4.4.1 INTERFACE-hanke

Ohjelmassa mukana on esimerkiksi vuonna 2019 syntynyt *INTERFACE*-hanke, johon osallistuu Suomesta Tampereen Yliopisto, Fingrid, Elenia sekä Enerim [59]. Nelivuotisen hankkeen tavoitteena on kehittää yhteinen arkkitehtuuri, joka yhdistää eri markkina-alueet saumattoman yleiseurooppalaisen sähköpörssin luomiseksi. Uusiutuvien energianlähteiden

den ja paikallisten energia-aloitteiden kasvun johdosta siirtoverkonhaltijoille (Transmission System Operator) ja jakeluverkonhaltijoille (Distribution System Operator) tulee kehittämään uusia koordinaatiohaasteita, joita INTERRFACE aikoo ratkaista. [60]

Projektissa lohkoketjujen avulla luodaan joustopalveluna toimiva alusta, jossa verkkooperaattorit ja joustopalveluiden tarjoajat pystyvät käymään kauppaa ylimääräenergialla. Lohkoketjun tarkoitus on mahdollistaa turvallisien, luotettavien ja avoimien joustavuussopimuksien muodostamisen verkon tasapainotustarkoituksiin. [61]

Projektista saatujen tulosten nojalla INTERRFACEn rinnalle on kehitetty uusi *OneNet*-hanke, jossa Fingrid jatkaa INTERRFACEssa aloitettujen joustoratkaisujen, pääasiassa siirtojen hallinnan ja tasehallinnan, kehittämistä. Pilotointijakson odotetaan alkavan vuosina 2022 – 2023, jolloin testataan kehitettyjen ratkaisujen toimivuutta. [62]

4.4.2 SOFIE-hanke

Aalto Yliopiston koordinoima *SOFIE* (Secure Open Federation for Internet Everywhere) on toinen hanke Horisontti 2020 ohjelmassa, missä keskitytään esineiden internetin-liittoarkkitehtuurin ja sen kehityksen kehittämiseen. Käytettävä teknologia perustuu hajautettujen tilikirjojen (lohkoketju) käyttämiseen rakentamaan hajautettuja liiketoimintaratkaisuja. [63, s. 3] SOFIE-hanke on suhteellisen laaja sillä pilotit kohdistuvat kolmelle eri sektorille: ruokaketju, mobiilipelaaminen ja energia. Energiasektorilla on käynnissä pilotit Decentralized Energy Data Exchange ja Decentralized Energy Flexibility Marketplace, jotka vastaavat kahteen eri ongelmaan, mitkä rajoittavat seuraavan sukupolven energiaa [63].

DEDE:n tavoitteena on kehittää järjestelmä, joka mahdollistaa käyttäjien pääsyn sähkönkäyttöön liittyviin ydintietoihin yhdessä hajautetussa tiedonvaihdon yksikössä. Tämä yksikkö toimii eri tietokantoja ja järjestelmiä yhdistävänä hallitsijana, joka käsittelee niihin tulevia pyyntöjä. Pääasiakkaina ovat siirtoverkon ja jakeluverkon haltijat, jotka hallitsevat sähködataa jo olemassa olevien järjestelmien, kuten datahubien, kautta. DEDE:n toteuttamiseen käytetään SOFIE:n kehittämiä omia adaptoreita, jotka yhdistetään käyttäjien älymittareihin. Linkityksen seurauksena luodaan yhteys käyttäjien kulutus- ja tuotantotietojen sekä palveluntarjoajien välille. [63, s. 8].

Maissa, joissa valtakunnallista datahub-ratkaisua ei ole toteutettu, sähköön vähittäismarkkinoiden data sijaitsee hajautetusti eri yhtiöiden järjestelmissä monimutkaistaen ja hidastaen toimintanopeutta. SOFIE:n tiedonvaihtojärjestelmä nopeuttaa ja yksinkertaistaa asiakkaiden sopimustapahtumia, lisää palvelun virheettömyyttä ja asiakkaan mahdollisuuksia, vähentää integraatiokustannuksia tiedonhallintamekanismeille, varmistaa datan virheettömyyden ilman keskitettyä hallitsijaa sekä takaa muuttamattomat energiakulutuksen lukemat [63, s. 11].

Toisaalta maissa, joissa valtakunnallinen keskitetty datahub on jo käynnissä tai rakentamisvaiheessa, SOFIE:n DEDE-alusta ei luultavasti tule saamaan kiinnostusta, koska sille ei ole tarvetta [63, s. 9]. Pohjoismaissa, mukaan lukien Suomessa, on jo tehty investointeja keskitetyn datahubin rakentamiselle [64, s. 14]. Vastuu keskitetyn datahubin kehittämisestä on Suomessa Fingridillä ja sen on tarkoitus tulla käyttöön vuoden 2022 alussa yhdistäen kokonaisuudessaan 3,7 miljoonaa sähkökäyttöpaikkaa [65]. Tässä tilanteessa pilotin toinen liiketoimintamalli on tarjota jo nykyiselle järjestelmälle joustavuutta ja kustannuksien pienenemistä sekä tietoturvan paranemista yhdistämällä ratkaisut toisiinsa [63, s. 9].

DEDE-adapterien hinnoittelumalli perustuu vuosittaiseen lisenssimaksuun jokaisesta adapterien muodostaman älykkään verkon kautta tehdystä sähkönsiirrosta sekä tarjotuista tietoturvaominaisuuksista. Alustan käyttöönottoaminen vaatii DEDE-adapterin asennusta jokaiseen sähkökäyttöpaikkaan [63, s. 12].

SOFIE-projektin toinen pilotti DEFM tarjoaa hajautetun markkina-alustan sähkökaupankäyntiin jakeluverkonhaltijoille. Alustan avulla voidaan tasapainottaa paikallisia energiaverkkoja luomalla älymittareista toimitettujen tietojen pohjalta joustopyyntöjä kauppapaikalle. Niin sanotun kulutuksen aikasiirron (consumption time-shift) avulla järjestelmä arvioi tulevaa energiantarvetta ja siirtää loppukäyttäjien kulutusta ruuhkatunneilta ohjaamalla sähköautojen latausta. [63, s. 13–14]

Pääasiakkaina toimivat jakeluverkonhaltijat, sähköautokaluston haltijat (electric vehicle fleet manager), sähköautojen omistajat ja energian 'prosumerit' [63, s. 14]. Prosumer käsitteellä tarkoitetaan käyttäjiä, jotka toimivat sekä kuluttajina että tuottajina (consumer, producer). Käytännössä, kun tuotantoa on verkossa liikaa, verkonhaltija laittaa joustopyynnön markkinapaikalle pyytämällä tietyn määrän energiaa kulutettavaksi alueella. Sopivat kandidaatit saavat ilmoituksen pyynnöstä, jonka täyttäessään he saavat palkkion. Ehdossa kerrotaan kuinka paljon sähköautoa pitää ladata, missä aikavälissä ja millä alueella. Lataustapahtuma tallennetaan lohkoketjuun ja älykkään sopimuksen ehtojen täytyessä käyttäjä saa palkkionsa automaattisesti. [66, s. 97]

5. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT JA HAASTEET

Reilussa vuosikymmenessä lohkoketjuteknologia on ilmestynyt nopeasti julkisuuteen, ja voimme olettaa, että tulevaisuudessa tulemme näkemään sen käyttöä yhä enemmän. Teknologialla on kuitenkin paljon vielä kehittämisen varaa teknilliseltä ja yhteiskunnalliselta osin. Ongelmia ovat esimerkiksi heikko skaalautuvuus, sääntelyn ja lakien puute, suuri energiankulutus ja välttävä suorituskyky. Lohkoketjuihin usein liitetään niin sanottu skaalautuvuuden trilemma, jossa hyvän turvallisuuden, hajautettavuuden ja skaalautuvuuden väliltä voidaan valita vain kaksi.

Kokonaisuudessaan energian-alan sovellukset koostuvat vielä suurimmaksi osaksi pienimuotoisista kokeiluista, joten teknologialla on vielä osoitettava tekninen ja ekonominen toimivuus isommassa mittakaavassa. Tekniseltä osalta kaiken kattavaa ratkaisua ei ole vielä kehitetty. Useimmiten joudutaankin tekemään kompromisseja joiltain teknisiltä osialueilta esimerkiksi energiankulutukselta. Lohkoketju on myös paljon kompleksisempi järjestelmä verrattuna nykyisiin energiajärjestelmiin, mikä vaikeuttaa sen käytettävyyttä. Varsinkin alussa tämä luultavasti lisää virheiden määrää, koska täysin turvallisen lohkoketjun muodostaminen on haastavaa. Lainsäädäntö lohkoketjujen ympärillä on vielä sekava, ja älykkäiden sopimusten kohdalla yhteensopivan lainsäädännön luominen on tärkeä kehityskohde. Teknologian tulevaisuuden menestyminen tulee pitkälti riippumaan jatkokehityksestä ja onnistuneista käytännön projekteista. Luvussa käydään läpi tämänhetkisiä haasteita ja mahdollisia ratkaisuja niihin.

5.1 Skaalautuvuus

Lohkoketjujen yksi isoimmista ongelmista on ollut skaalautuvuuden mahdollistaminen laajoihin käyttöihin. Hyvällä skaalautuvuudella tarkoitetaan sitä, että järjestelmä toimii luotettavasti ja tehokkaasti käyttäjien, transaktioiden ja lohkojen määrien kasvaessa. Vaikka teoriassa prosessit nopeutuvat välittäjien poistuessa, lohkoketjut eivät kuitenkaan nykypäivänä pärjää tehokkuudessa keskitetyille järjestelmille. Yksi tähän vaikuttavista tekijöistä on valitun konsensusmekanismin tehokkuus. Proof of Workin omaavat järjestelmät tukevat tietojen avoimuutta ja läpinäkyvyyttä, mutta se ei ole soveltuva välittömiä tapahtumia vaativiin prosesseihin. [2, s. 148] Vastakohtana esimerkiksi Proof of Stake tyyppiset mekanismit hajauttavat vaadittavaa prosessointitehoa ja ovat nopeampia kuin PoW, mutta

myös sillä on joitakin heikkouksia. Yhtenä ongelmana pidetään nothing-at-stake tyyppistä heikkoutta, missä vahvistussolmut voivat yrittää validoida väärennettyjä tapahtumia menettämättä mitään. [2, s. 149] Tämä on kuitenkin helposti estettävissä vaatimalla pantti vahvistussolmuna olemisesta.

Bitcoin pystyy prosessoimaan noin 7 transaktiota sekunnissa ja yhden lohkon joka kymmenes minuutti. Lisäksi varmistukseen menee noin tunti riippuen verkon aktiivisuudesta. PoW:ta käyttävä Ethereum 1.0 on hieman nopeampi Bitcoinin verrattuna nostaen prosessoinnin noin 20:een transaktioon sekunnissa. Rinnastettuna Visan 1700 transaktioon sekunnissa, ovat PoW-toteutukset paljon hitaampia sekä huomattavasti enemmän energiaa kuluttavia. [2, s. 149] Ratkaisuja PoW:n skaalautuvuuden parantamiseksi on tutkittu esimerkiksi hajauttamalla lohkoketju moneen osaan (sharding), jotka prosessoivat toisistaan erillisiä transaktioita [67, s. 125247]. Lohkojen koon suurentamista on myös tutkittu, jolloin transaktioiden määrää lohkoissa saataisiin korotettua [67, s. 125252]. Lisäksi sivuketjujen (sidechain) käyttäminen mikromaksujen prosessointiin on mahdollista [67, s. 125255].

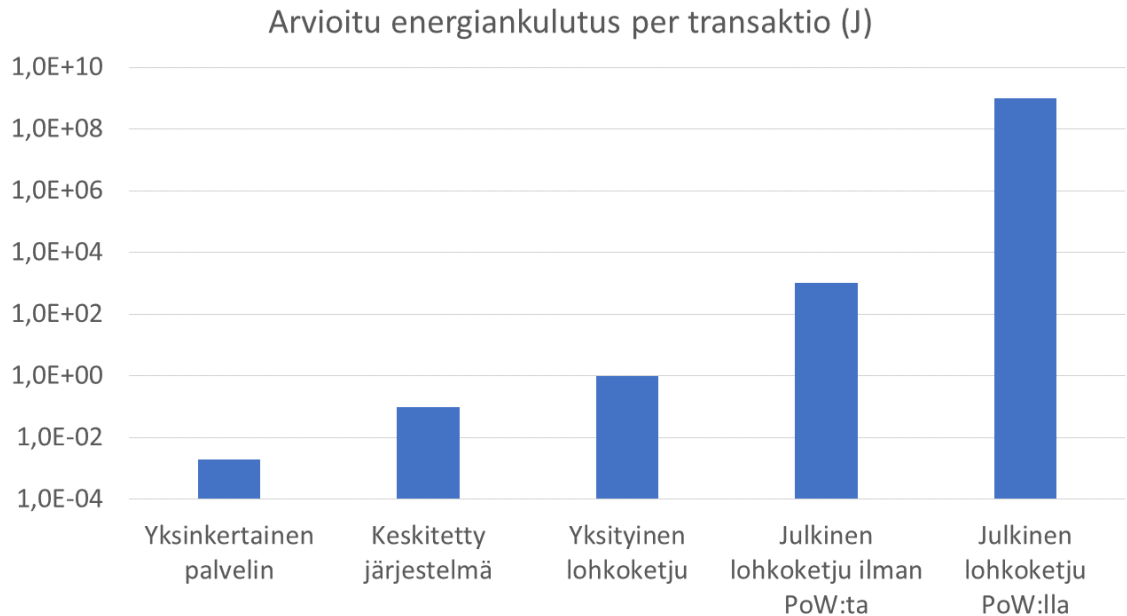
PoW-konsensus on tällä hetkellä suosituin eri toteutuksista, mutta sen käytöllä ei tulla pääsemään samoihin prosessointilukuihin kuin perinteisillä keskitetyillä maksujärjestelmillä [68, s. 5]. Parempaan tehoon ja nopeampiin tapahtumiin tähtääville prosesseille Proof of Staken, Proof of Authorityn tai niistä jatkokehitettyjen muotojen käyttö voi olla suotavampaa. Älykkäitä sopimuksia tukeva Stellar pystyy prosessoimaan tuhansia transaktiota sekunnissa, mikä tekee siitä satoja kertoja nopeamman kuin Bitcoin-verkon. Stellar käyttää itse kehittämää protokollaa nimeltään Stellar Consensus Protocol, joka hyödyntää ennalta määrättyjä, mutta vaihtuvia validaattoreita lohkojen tarkistamiseen. [69, s. 30–31]

5.2 Energiankulutus

PoW:ta käyttäviä kryptovaluuttoja on kritisoitu laajasti niiden korkean sähkönkulutuksen vuoksi. Bitcoin-verkko kulutti yksinään arvioiden mukaan vuonna 2020 noin 77 TWh sähköä, mikä on suurempi kuin joidenkin valtioiden vuotuinen sähkönkulutus. Suuren käytön lisäksi huolestuttavaa on se, että sähkönkulutus on keskimääräisesti nousussa. Cambridgen yliopiston tekemän seurantatyökalun mukaan keskimääräinen vuosikulutus on kasvanut 130 TWh:iin vuoden 2021 alusta, mikä on 0,59 % maailman sähkönkulutuksesta. [70] Verrattuna Suomen sähkönkulutukseen, mikä oli vuonna 2019 noin 86 TWh, [23] tai Ruotsin kulutukseen, mikä on noin 132 TWh vuodessa [70], on Bitcoinin kulutus merkittävä.

Ylivoimaisesti eniten Bitcoinin louhimista tehdään Kiinassa yli 65 % osuudella Yhdysvaltojen ollessa toisella sijalla noin 7 % osuudella [70]. Tähän syynä on Kiinan halvat sähköt, mikä on tehnyt kryptovaluuttojen louhimisesta hyvin tuottoisaa [68, s. 4–5]. Kiinan fossiilisten polttoaineiden voimakas käyttö on nostattanut keskusteluita louhimisen ai-

heuttamasta suuresta hiilijalanjäljestä. Energiankulutusongelmaa saataisiin parannettua käyttämällä modernimpia konsensusalgoritmeja, mutta Bitcoinin ollessa suurin kryptovaluutta ja energiankuluttaja, ei muutosta tulla luultavasti näkemään kokonaiskulutuksessa lähiaikoina.



Kuva 5.1. Energiankulutusten vertailua järjestelmätyypeittäin [71, s. 606].

Kuvan 5.1 mukaisesti lohkoketjutransaktioiden tämän hetkiset toteutustavat häviävät keskitetyille järjestelmille yleisellä tasolla. Tässä myös huomataan PoW ratkaisujen huomattava ero muihin toteutuksiin energiankulutuksen ollessa luokkaa 10⁹ joulea per transaktio ja esimerkiksi keskitetyn järjestelmän ollessa luokkaa 0,1 joulea per transaktio. Yksityisten lohkoketjujen tämänhetkiset mekanismit kuitenkin pääsevät aika lähelle keskitettyä järjestelmää. Luvut kuitenkin vaihtelevat aika paljon riippuen järjestelmien sisäisistä toteutuksista, laitteistoista ja turvatoimista. [71, s. 606] Konsensusmekanismit kuitenkin kehittyvät kokoajan ja kehitysaskelia onkin jo näkyvässä, sillä esimerkiksi seuraavan sukupolven Ethereum alusta tulee käyttämään energiatehokkaampaa Proof of Stakea nykyisen Proof of Workin tilalla, mikä nostaa myös suoritettavien transaktioiden määrän kymmenistä tuhansiin sekunneissa [72].

5.3 Laki ja sääntely

Lohkoketjuteknologia uutena ilmiönä on kehittynyt nopeasti ja on tullut jäädäkseen, mutta lainsäädännön reagointi on ollut vuosia jäljessä. Hajautettujen digitaalisten toimintaympäristöjen yksi yhteiskunnallinen haaste on oikeanlaisen sääntelyn toteuttaminen siten, että se ei rajoita lohkoketjujen kehittämistä. Suomessa verohallinta on määritellyt virtuaalivaluuttojen verotuksen, mutta virtuaalivaluutoista ei ole muuta virallista sääntelyä [73]. Varsinaista lohkoketjuteknologiaa säänteleviä lakeja ei ole myöskään asetettu. On myös

epäselvää, voiko lohkoketjusovellukset täyttää EU:n tietosuojasetuksen ohjeet. Kyseisessä GDPR-asetuksessa on määritetty yhtenäinen lainsäädäntö henkilötietojen käsittelystä. Esimerkiksi GDPR:n mukainen oikeus unohtetuksi tulemisesta on lohkoketjuissa vielä mysteeri, koska lohkoissa olevaa tietoa on yleisesti mahdotonta muokata jälkeenpäin. [74, s. 20]

Kysymyksiä verkon ja siellä olevan datan omistajuudesta herää esiin eli kuka on vastuussa tietoturvasta ja eheydestä. Tällöin on esimerkiksi haastavaa valita korvausvelvollinen tilanteessa, jossa älykäs sopimus toimii virheellisesti toteuttaen haluamattomia tapahtumia tai jättämällä toteuttamatta niitä. Älykkäiden sopimusten kohdalla sääntelyn luominen on sitä hankalampaa mitä älykkäämpiä ne ovat [74, s. 24]. On mahdollista, että tulevaisuudessa älykkäät sopimukset voivat tehdä itse tiedonhankintaa ja sen perusteella toimintoja autonomisesti. Kiivasta keskustelua on myös käyty sovelluskehittäjien vastuuvollisuudesta, kun heidän tekemiään lohkoketjuratkaisuja on käytetty laittomaan toimintaan [74, s. 17].

Anonymiteetti tekee verkon käyttäjien seurannan haasteelliseksi, mikä voi vaikeuttaa lakien rikkomisesta aiheutuvien rangaistusten toteuttamista. Anonymiteetti-”ongelma” ei ole kuitenkaan niin laaja tällä hetkellä, koska teoista jää aina muuttamattomat jäljet lohkoihin ja identiteetti saadaan usein selvitettyä varsinkin suurimmassa osassa julkisista lohkoketjuista. On kuitenkin olemassa myös täysin anonyymeja kryptovaluuttoja kuten Monero, joka voisi nostaa riskiä, jos tämänkaltaisten lohkoketjujen käyttö lisääntyy tulevaisuudessa [74, s. 14].

Julkisesti avoimissa lohkoketjuissa verkon solmut voivat olla toiminnassa ympäri maailmaa. Silloin eri solmupisteet voivat olla erilaisten oikeudellisten vaatimusten alaisena. Esimerkiksi haastava tilanne voi olla, kun käsitellään finanssitapahtumia rahanpesulaisessa määriteltyjen KYC ja AML sääntelyiden mukaisesti. Näiden syiden takia yhteneväisen sääntelyn luominen on tärkeää. Yksityisissä lohkoketjuissa nämä ongelmat eivät ole niin esillä, koska osallistujat voidaan rajata sijainnin perusteella ja yleensä laillinen taho hallitsee muun muassa osallistujien identifioimista. [74, s. 13]

6. YHTEENVETO

Energia-alalla mielenkiinnon lohkoketjuteknologiasta osoittavat lukuisat projektit ympäri maailmaa. On kuitenkin vielä liian aikaista sanoa, miten lohkoketju tulee toimimaan suuren mittakaavan asteella verrattuna nykyisiin keskitettyihin järjestelmiin, koska tämänkaltaisia kokeiluja ei ole vielä ollut. Ongelmia on vielä monialaisesti skaalautuvuuden, energiankulutuksen ja sääntelyiden kohdalla, mitkä johtuvat etenkin teknologian varhaisesta kypsyyssasteesta.

Energiasektorilla kuluttajat ja pientuottajat saavat mahdollisuuden vaikuttaa yhä enemmän sähkömarkkinoilla liiketoimintamallien muuttuessa. Hajautetun ja uusiutuvan tuotannon yleistyessä sekä digitalisaation vaikutuksesta kuluttajien toiminta alkaa muuttua myös tuottajan ja varastoijan asemaan. Samalla sähköverkkojen kompleksisuus ja vaatimukset toiminnoista kasvavat. Ratkaisuna lohkoketjujen ominaisuudet vaikuttaisivat sopivan hyvin energiasektorille tukien älykkäämpiä verkkoja.

Lohkoketju tarjoaa turvallisuutta ja läpinäkyvyyttä verkon käyttäjien välille muuttumatonta ja hajautettua tietokantaa käyttäen. Hajautettavuuden ja konsensusmekanismien avulla kolmannen osapuolen käyttäminen ei ole enää tarpeellista, jolloin saadaan vähennettyä riippuvuutta ulkoisiin toimijoihin ja pienennettyä transaktiokustannuksia välikäsien poistuessa. Sähköverkoissa kustannuksien alenemisen lisäksi älykkäiden sopimusten avulla kaupankäynti saadaan automatisoitua, verkon tehokkuutta parannettua ja sähköverkon moniasteinen järjestelmä saadaan yksinkertaistettua yhdistämällä tuottajat suoraan kuluttajiin.

Teknologian odotukset ovat korkealla, mutta ratkaistavia asioita on vielä paljon. Täten on epätodennäköistä, että lähitulevaisuudessa nykyiset keskitetyt energijärjestelmät korvataisiin kokonaisuudessaan käyttämään lohkoketjua. Pienemmässä mittakaavassa energijärjestelmien osittainen yhdistäminen lohkoketjuja hyödyntäviin ratkaisuihin on kuitenkin mahdollista. Tällä alueella projekteja onkin nähty esimerkiksi sähköautojen latausjärjestelmien, energiayhteisöissä toimivien P2P-sähkökauppojen ja tiedonsiirtojärjestelmien kannalta.

LÄHTEET

- [1] Nakamoto, S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System (2008), s. 2–5. URL: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (viitattu 09.02.2021).
- [2] Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P. ja Peacock, A. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 100 (2019), s. 1, 145–146, 149–155, 165. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184> (viitattu 09.02.2021).
- [3] Linturi, R. ja Kuusi, O. Suomen sata uutta mahdollisuutta 2018–2037: Yhteiskunnan toimintamallit uudistava radikaali teknologia (2018), s. 19. URL: https://www.eduskunta.fi/FI/naineduskuntatoimii/julkaisut/Documents/tuvj_1+2018.pdf (viitattu 11.02.2021).
- [4] Mattila, J., Seppälä, T., Naucler, C., Stahl, R., Tikkanen, M., Bådenlid, A. ja Seppälä, J. Industrial Blockchain Platforms: An Exercise in Use Case Development in the Energy Industry (2016), s. 2. URL: <https://www.etla.fi/julkaisut/industrial-blockchain-platforms-an-exercise-in-use-case-development-in-the-energy-industry/> (viitattu 12.02.2021).
- [5] Di Silvestre, M. L., Gallo, P., Guerrero, J. M., Musca, R., Riva Sanseverino, E., Sciumè, G., Vásquez, J. C. ja Zizzo, G. Blockchain for power systems: Current trends and future applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 119 (2020), s. 2, 9, 7, 14–15. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109585>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119307932> (viitattu 24.02.2021).
- [6] *Mastering Bitcoin: Chapter 7. The Blockchain*. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/mastering-bitcoin/9781491902639/ch07.html> (viitattu 17.03.2021).
- [7] Buterin, V. *Merkling in Ethereum*. 2015. URL: <https://blog.ethereum.org/2015/11/15/merkle-in-ethereum/> (viitattu 18.04.2021).
- [8] *Mikä on Ethereum?* URL: <https://www.northcrypto.com/fi/about/ethereum> (viitattu 27.03.2021).
- [9] *Blockchain.com Explorer: BTC: ETH: BCH*. URL: <https://www.blockchain.com/explorer> (viitattu 15.03.2021).
- [10] Johansson, P. E. *Lohkoketju: tiekartta päättäjille*. Helsinki: Alma Talent Oy, 2019, s. 35, 75, 193. ISBN: 978-952-14-3616-1. (Viitattu 14.02.2021).

- [11] *Blockchain Nodes: An In-Depth Guide*. URL: <https://nodes.com/> (viitattu 19.05.2021).
- [12] URL: https://ycharts.com/indicators/bitcoin_blockchain_size (viitattu 11.03.2021).
- [13] Rahkola, M. Katsaus lohkoketjuteknologioiden hyödyntämiseen Suomessa (2019), s. 18–19, 55–56. URL: https://www.eduskunta.fi/FI/naineduskuntatoimii/julkaisut/Documents/NETTI_TUVJ_1_2019_Lohkoketjuteknologiat.pdf (viitattu 16.02.2021).
- [14] Ogino, O. *Proof-of-stake (PoS)*. URL: <https://ethereum.org/en/developers/docs/consensus-mechanisms/pos/> (viitattu 01.05.2021).
- [15] Desai, H., Kantarcioglu, M. ja Kagal, L. A Hybrid Blockchain Architecture for Privacy-Enabled and Accountable Auctions. *2019 IEEE International Conference on Blockchain (Blockchain)*. 2019, s. 34, 41. DOI: 10.1109/Blockchain.2019.00014. (Viitattu 17.02.2021).
- [16] Kenton, W. *What Is Litecoin (LTC)?* URL: <https://www.investopedia.com/terms/l/litecoin.asp> (viitattu 26.03.2021).
- [17] *Bitcoin, Litecoin Block Time Chart*. URL: <https://bitinfocharts.com/comparison/confirmationtime-btc-ltc.html>.
- [18] *Cryptocurrency Prices, Portfolio, Forum, Rankings*. URL: <https://www.cryptocompare.com/> (viitattu 19.03.2021).
- [19] Mattila, J., Seppälä, T., Hukkinen, T., Laikari, A., Markkanen, K., Koulu, R. ja Jia, K. Lohkoketjuteknologian hyödyntämismahdollisuudet palkkatulojen verotuksessa (), s. 45. URL: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161543/30_Lohkoketjuteknologian%20hyodyntamismahdollisuudet%20palkkatulojen%20verotuksessa_.pdf (viitattu 22.04.2021).
- [20] *State of the DApps - Ranking the Best Ethereum DApps*. URL: <https://www.stateofthedapps.com/rankings/platform/ethereum> (viitattu 26.03.2021).
- [21] Tsihitas, T. *The Biggest Cryptocurrency Heists of All Time*. Marraskuu 2019. URL: <https://www.comparitech.com/crypto/biggest-cryptocurrency-heists/> (viitattu 20.04.2021).
- [22] Salokoski, P. Tulevaisuuden energia 2030...2050 (2017), s. 6, 17. URL: https://www.businessfinland.fi/globalassets/julkaisut/tulevaisuuden-energia_2030_2050_332_2017.pdf (viitattu 20.02.2021).
- [23] Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus. *Energian kokonaiskulutus väheni ja uusiutuvan energian kulutus kasvoi prosentoin vuonna 2019*. 2019. URL: https://www.stat.fi/til/ehk/2019/ehk_2019_2020-12-21_tie_001_fi.html (viitattu 20.02.2021).
- [24] Burger, C., Weinmann, J., Kuhlmann, A. ja Richard, P. Blockchain in the energy transition. A survey among decision-makers in the German energy industry (), s. 29, 46–47. URL: https://www.dena.de/fileadmin/user_upload/dena-Studie_Blockchain_Integrierte_Energiewende_EN.pdf.

- [25] Foti, M. ja Vavalis, M. What blockchain can do for power grids? *Blockchain: Research and Applications* (2021), s. 13, 23–32. ISSN: 2096-7209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcra.2021.100008>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096720921000038> (viitattu 11.03.2021).
- [26] *P2418.5 - Standard for Blockchain in Energy*. Standard. IEEE Standards Association, 2020.
- [27] Szabo, N. Formalizing and Securing Relationships on Public Networks. *First Monday* 2.9 (1997). DOI: 10.5210/fm.v2i9.548. URL: <https://journals.uic.edu/ojs/index.php/fm/article/view/548> (viitattu 22.02.2021).
- [28] Swan, M. *Blockchain: Blueprint for a new economy*. "O'Reilly Media, Inc.", 2015, s. 16.
- [29] Blockchain – an opportunity for energy producers and consumers? (), s. 6, 16. URL: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/assets/pwc-blockchain-opportunity-for-energy-producers-and-consumers.pdf> (viitattu 23.02.2021).
- [30] Ollikka, K. Miten sähkömarkkinat toimivat? (2017). URL: <http://smartenergytransition.fi/fi/miten-sahkomarkkinat-toimivat/> (viitattu 24.02.2021).
- [31] Rao, A. Economic outlook: Accelerating energy transition with blockchain technology (). URL: <https://www.ifpenergiesnouvelles.com/article/accelerating-energy-transition-blockchain-technology> (viitattu 03.03.2021).
- [32] Johanning, S. ja Bruckner, T. Blockchain-based Peer-to-Peer Energy Trade: A Critical Review of Disruptive Potential. *2019 16th International Conference on the European Energy Market (EEM)*. 2019, s. 2. DOI: 10.1109/EEM.2019.8916268. (Viitattu 05.03.2021).
- [33] *Ylijäämä sähköön myynti*. 2020. URL: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/ylijaamasahkon_myynti (viitattu 25.02.2021).
- [34] Goranović, A., Meisel, M., Fotiadis, L., Wilker, S., Treytl, A. ja Sauter, T. Blockchain applications in microgrids an overview of current projects and concepts. *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2017, s. 6153. DOI: 10.1109/IECON.2017.8217069. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8217069> (viitattu 27.02.2021).
- [35] Berka, A. L. ja Creamer, E. Taking stock of the local impacts of community owned renewable energy: A review and research agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018), s. 3400. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.050>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117314247> (viitattu 27.02.2021).
- [36] Irle, R. Global Plug-in Vehicle Sales Reached over 3,2 Million in 2020 (). URL: <http://www.ev-volumes.com/> (viitattu 03.03.2021).
- [37] Livingston, D., Sivaram, V., Freeman, M. ja Fiege, M. *Applying Blockchain Technology to Electric Power Systems*. Tekninen raportti. Council on Foreign Relations,

- 2018, s. 12–13. URL: <http://www.jstor.org/stable/resrep21340> (viitattu 06.03.2021).
- [38] Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin toimeenpano: kysymyksiä ja vastauksia (). URL: <https://ym.fi/kysymyksiä-ja-vastauksia-rakennusten-energiatehokkuusdirektiivin-toimeenpanosta> (viitattu 06.03.2021).
- [39] ”Heitämme nyt pallon Fortumille” – Kohtuuhintainen sähköautojen lataus-roaming välttämätöntä sähköisen liikkuvuuden valtavirtaistumiselle (2020). URL: <https://www.virta.global/fi/uutiset/heitamme-nyt-pallon-fortumille-kohtuuhintainen-sahkoautojen-lataus-roaming-valttamatonta> (viitattu 02.03.2021).
- [40] Lempinen, T. Sähköauton lataaminen Suomessa on jo paikoin kalliimpaa kuin bensalla tai dieselillä ajaminen (2020). URL: <https://www.is.fi/autot/art-2000006640262.html> (viitattu 02.03.2021).
- [41] Electric Vehicle Outlook 2020 (). URL: <https://about.newenergyfinance.com/electric-vehicle-outlook/> (viitattu 03.07.2021).
- [42] Hasankhani, A., Mehdi Hakimi, S., Shafie-khah, M. ja Asadolahi, H. Blockchain technology in the future smart grids: A comprehensive review and frameworks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 129 (2021), s. 12–13. ISSN: 0142-0615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106811>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014206152100051X> (viitattu 04.03.2021).
- [43] Lüth, A., Zepter, J. M., Crespo del Granado, P. ja Egging, R. Local electricity market designs for peer-to-peer trading: The role of battery flexibility. *Applied Energy* 229 (2018), s. 1240–1242. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.004>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918311590> (viitattu 12.03.2021).
- [44] *Blockchain, Transactive Energy and P2P Trading*. CIRED International Conference on Electricity Distribution, 2020, s. 4. URL: <http://cired.net/cired-working-groups/blockchain-wg-2018-6> (viitattu 03.07.2021).
- [45] World Energy Outlook 2020: summary (), s. 18. URL: <https://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2020> (viitattu 03.07.2021).
- [46] Meeuw, A., Schopfer, S. ja Wortmann, F. Experimental bandwidth benchmarking for P2P markets in blockchain managed microgrids. *Energy Procedia* 159 (2019). Renewable Energy Integration with Mini/Microgrid. ISSN: 1876-6102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.12.074>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218313699> (viitattu 18.03.2021).
- [47] Giaglis, G., Dionysopoulos, L., Avedissian, N. D., Charalambous, M., Kostopoulos, N., Vlachos, I., Damvakerak, T., Noszek, Z., Krasnov, H., Chykhradze, K., Oshkhneli, S., Strukov, D., Papoutsoglou, I. ja Votis, K. EU Blockchain Ecosystem Develop-

- ments (marraskuu 2020), s. 54–57. URL: https://www.eublockchainforum.eu/sites/default/files/reports/EU%20Blockchain%20Ecosystem%20Report_final_0.pdf (viitattu 12.03.2021).
- [48] Besnainou, J. ja Orsini, L. *From the Brooklyn Microgrid to EXERGY – A Conversation with Lawrence Orsini, CEO of LO3 Energy*. 2018. URL: <https://www.cleantech.com/from-the-brooklyn-microgrid-to-exergy-a-conversation-with-lawrence-orsini-ceo-of-lo3-energy/> (viitattu 09.03.2021).
- [49] *Brooklyn Microgrid Gets Approval for Blockchain-based Energy Trading*. URL: <https://www.districtenergy.org/blogs/microgrid-resources-coalition/2020/01/06/brooklyn-microgrid-gets-approval-for-blockchain-ba> (viitattu 16.05.2021).
- [50] Power Ledger Pty Ltd. POWER LEDGER WHITE PAPER (2019). URL: <https://www.powerledger.io/wp-content/uploads/2019/11/power-ledger-whitepaper.pdf> (viitattu 09.03.2021).
- [51] Green, J., Newman, P. ja Forse, N. RENEW Nexus: Enabling resilient, low cost & localised electricity markets through blockchain P2P & VPP trading (2020). URL: <https://uploads-ssl.webflow.com/5fc9b61246966c23f17d2601/607e724f8dfb1a2d5renew-nexus-project-report.pdf> (viitattu 17.05.2021).
- [52] *Empowering Distributed Energy Markets*. URL: <https://electron.net/> (viitattu 12.03.2021).
- [53] URL: <https://gridplus.io/> (viitattu 12.03.2021).
- [54] Lition. *Lition - The Blockchain Standard for Business*. URL: <https://lition.io/about> (viitattu 12.03.2021).
- [55] Vanrykel, F., Ernst, D. ja Bourgeois, M. Fostering Share&Charge through proper regulation. *Competition and Regulation in Network Industries* 19.1-2 (2018), s. 25. DOI: 10.1177/1783591718809576. eprint: <https://doi.org/10.1177/1783591718809576>. URL: <https://doi.org/10.1177/1783591718809576> (viitattu 02.03.2021).
- [56] Garcia, H. The next Share&Charge. *Medium* (2018). URL: <https://medium.com/share-charge/the-next-share-charge-bc5f6807ddd6> (viitattu 11.03.2021).
- [57] *Oslo2Rome Initiative*. 2020. URL: <https://shareandcharge.com/oslo-2-rome/> (viitattu 11.03.2021).
- [58] Shaping Europe's digital future - European Commission (2021). URL: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/european-blockchain-strategy-brochure> (viitattu 13.03.2021).
- [59] INTERRFACE. *Consortium*. URL: <http://www.interrface.eu/consortium> (viitattu 13.03.2021).
- [60] INTERRFACE. *The project*. URL: <http://www.interrface.eu/The-project> (viitattu 13.03.2021).

- [61] *Blockchain-based TSO-DSO flexibility*. URL: <http://interrface.eu/content/blockchain-based-tso-dso-flexibility> (viitattu 17.05.2021).
- [62] Leiskamo, T. Jatkamme joustoratkaisujen kehitystyötä OneNet-hankkeessa (). URL: <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2020/fingrid-jatkaa-joustoratkaisujen-kehitystyota-onenet-joustomarkkinahankke> (viitattu 13.03.2021).
- [63] Livin, L., Anton, P., Raveduto, G., Jaatinen, M., Oikonomidis, Y., Samarin, M., Polyzos, G. C., Pittaras, I. ja Lagutin, D. SOFIE - Secure Open Federation for Internet Everywhere 779984 DELIVERABLE D6.10 Business planning (2020), s. 3, 8–16. URL: https://media.voog.com/0000/0042/0957/files/SOFIE_D6.10-Business_Planning.pdf (viitattu 16.03.2021).
- [64] HE 144/2018 vp. Hallituksen esitys eduskunnalle laiksi sähkömarkkinalain muuttamisesta ja eräiksi siihen liittyviksi laeiksi (2018), s. 21. URL: https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/HallituksenEsitys/Documents/HE_144+2018.pdf (viitattu 16.03.2021).
- [65] Fingrid. Datahub (). URL: <https://palvelut.datahub.fi/fi/datahub/general-info#kayttoonottoinfo> (viitattu 16.03.2021).
- [66] Siris, V. A., Voulgaris, S., Nikos Fotiou, D. D., Pittaras, I., Thomas, Y., Tsenos, M., (AUEB-RC), G. C. P., Elo, T., Arzoglou, E., Veria Hoseini, D. L. ja Vimini, F. SOFIE - Secure Open Federation for Internet Everywhere 779984 DELIVERABLE D4.4 Second Architecture and System Evaluation Report (), s. 97. URL: https://media.voog.com/0000/0042/0957/files/SOFIE_D4.4-Second_Architecture_and_System_Evaluation_Report-v1.0.pdf (viitattu 17.05.2021).
- [67] Hafid, A., Hafid, A. S. ja Samih, M. Scaling Blockchains: A Comprehensive Survey. *IEEE Access* 8 (2020), s. 125247–125262. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3007251. (Viitattu 17.03.2021).
- [68] Schinckus, C. The good, the bad and the ugly: An overview of the sustainability of blockchain technology. *Energy Research & Social Science* 69 (2020), s. 5–6. ISSN: 2214-6296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101614>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629620301894> (viitattu 17.03.2021).
- [69] Galen, D., Abdualiyev, A., Chong, W., Iyer, S., Kim, R., Ma, J., Mann, D., Owen, E., PARK, J., Portelance, G., Seideman, O. ja Thakur, N. BLOCKCHAINFOR SOCIAL IMPACT 2019 (), s. 30–31. URL: <https://www.cnbs.gob.hn/wp-content/uploads/2019/11/Blockchain-for-Social-Impact.pdf> (viitattu 17.03.2021).
- [70] *Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI)*. URL: <https://cbeci.org/> (viitattu 18.03.2021).
- [71] Sedlmeir, J., Buhl, H., Fridgen, G. ja Keller, R. The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth. *Business & Information Systems Engineering* (2020), s. 606. DOI: 10.1007/s12599-020-00656-x. (Viitattu 29.04.2021).

- [72] *ETH2: The Beacon Chain*. URL: <https://ethereum.org/en/eth2/beacon-chain/> (viitattu 19.03.2021).
- [73] Valtuutussäännös: Laki Verohallinnosta (503/2010) 2 § 2 mom. Virtuaalivaluuttojen verotus (2020). URL: <https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-hakusivu/48411/virtuaalivaluuttojen-verotus3/>.
- [74] Lyons, T., Courcelas, L. ja Timsit, K. Legal and regulatory framework of blockchains and smart contracts (2019). URL: https://www.eublockchainforum.eu/sites/default/files/reports/report_legal_v1.0.pdf (viitattu 20.03.2021).