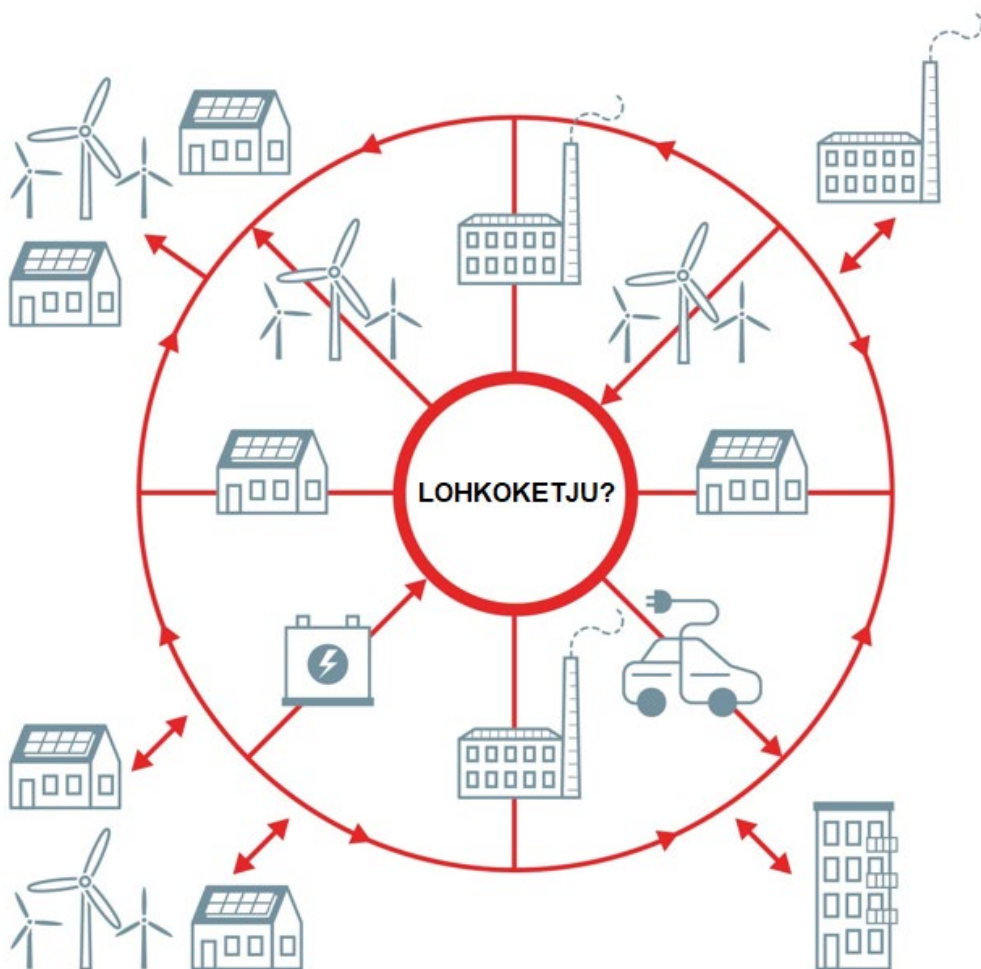


LOHKOKETJUTEKNOLOGIA OSANA ÄLYKÄSTÄ SÄHKÖJÄRJESTELMÄÄ



Lohkoketjuteknologia osana älykästä sähköjärjestelmää

Laatijat	Petteri Vääränkivi, työ- ja elinkeinoministeriö, energiaosasto Taneli Leiskamo, Fingrid Oyj, markkinaratkaisut
Päivämäärä	17.8.2018
Avainsanat	lohkoketju, energiamurros, älykäs sähköjärjestelmä

Tiivistelmä

Lohkoketjuteknologia on kokoelma käytäntöjä ja tekniikkaa jolla osapuolet voivat luoda ja ylläpitää hajautettuja ja jaettuja tietokantoja luotettavasti. Kryptovaluuttojen nousun myötä paljon huomiota saaneen teknologian nähdään muuttavan tietokantojen hallintaa vaativia prosesseja yhteiskunnan eri osa-alueilla. Lohkoketjuun perustuvilla järjestelmillä voidaan ylläpitää tietoon liittyvää kyberturvallisuutta, koskemattomuutta ja läpinäkyvyyttä ilman keskitettyä hallintaa.

Lohkoketjuteknologian visioidaan vähentävän energia-alaan liittyviä transaktiokustannuksia, parantavan olemassa olevien energiaressurssien käyttöastetta sekä mahdollistavan älykkään, puhtaan ja asiakaskeskeisen sähköjärjestelmän. Kehittyneillä sähkömarkkinoilla lohkoketjusovellukset voidaan rakentaa esimerkiksi olemassa olevien etäluettavien sähkömittareiden datan ja sektorin toimijoiden käytäntöjen päälle, mikä alentaa pilotoinnin kustannuksia sekä mahdollistaa uusien käyttötapojen kehittymistä kustannustehokkaasti. Selvitystyön perusteella tunnistetut sovelluskohteet ovat jaoteltu kuuteen eri kokonaisuuteen seuraavasti: älykkään sähköverkkojärjestelmän tietoturva, vertaisverkossa toimivat älykkäät laitteet, kaupankäynti vertaisverkossa, sähkömarkkinoiden kaupankäynti, tehotasapainon hallinta ja uusiutuvien energialähteiden käytön edistäminen.

Selvitystyö esittää katsauksen lohkoketjuteknologian periaatteisiin ja eri energia-alan sovelluskohteisiin. Energiasektorin yritykset ovat selvästi kiinnostuneita teknologian lupaamista mahdollisuuksista, mutta mahdolliset todentamattomat riskit, osaamisen puute ja tekniset rajoitteet nähdään suurimpina haasteina teknologian hyödyntämisessä. Myös alan toimijoiden kehityshankkeet ovat niin alussa, että lohkoketjun tuomat kustannussäästöt tai prosessien virtaviivaistuminen ovat vielä toistaiseksi pitkälti todentamatta tai salassapidon piirissä.

Yhteyshenkilö: Tatu Pahkala +358 29 506 4217 (TEM), Risto Lindroos +358 30 395 5139 (Fingrid)

Blockchain technology in smart grids

Authors

Petteri Vääränkivi, Ministry of Economic Affairs and Employment, Energy Department
Taneli Leiskamo, Fingrid Oyj, Market Solutions

Date

17.8.2018

Keywords

blockchain, energy transition, smart grid

Abstract

Blockchain technology is a collection of practices and techniques that enable parties to create and manage distributed and shared databases reliably. In a general sense, blockchain technology could transform society's understanding of database management and knowledge-based operations. Blockchain technology can maintain cyber security, integrity, and transparency in information without centralized management.

In the context of energy, blockchain technology is envisioned to reduce transaction costs, improve the utilization rate of existing energy resources, and to enable a smart, clean and customer-centric power system. In a developed electricity market blockchain technology can be built on, for example the existing smart meter data and the practices of sector operators, which reduces the cost of piloting and enables cost-effective development of new use-cases. Based on market analysis on blockchains in the electricity sector, six broader business models can be identified as follows: smart grid cybersecurity, peer-to-peer intelligent devices, peer-to-peer trading, power market trading, power balance management and supporting usage of renewable energy sources.

The study provides an overview of the principles of blockchain technology and applicability of the technology in the energy sector. Companies in the energy sector are clearly interested in the opportunities promised by technology, but potential risks and challenges in implementation are not yet fully known. Development projects in businesses are still in early stage and benefits of applying blockchain technology remain unverified or unpublished in the electricity sector.

Contact persons: Tatu Pahkala +358 29 506 4217, Risto Lindroos +358 30 395 5139 (Fingrid)

Sisällysluettelo

Johdanto	5
Termistö	7
1 Mitä lohkoketjuteknologia on?	9
2 Lohkoketjuteknologian soveltaminen älykkäässä sähköjärjestelmässä.....	14
Älykkäiden sähköjärjestelmien tietoturva	15
Vertaisverkossa toimivat älykkäät laitteet.....	16
Kaupankäynti vertaisverkossa.....	17
Sähkömarkkinoiden kaupankäynti	18
Tehotasapainon hallinta.....	20
Uusiutuvien energialähteiden käytön edistäminen.....	21
3 Käynnissä olevat lohkoketjuhankkeet energiasektorilla.....	23
4 Mitä lohkoketjuteknologian hyödyntäminen edellyttää?.....	25
Teknologiset vaatimukset – esimerkki älymittauksesta	25
Lohkoketjujen skaalautuvuus	27
Lohkoketjuteknologia nykyisessä sääntely-ympäristössä.....	28
Taloudellinen näkökulma	29
Lohkoketjujen vaikutusanalyysi.....	31
Yhteenveto	32

Johdanto

Yhteiskunnallinen halu siirtyä kohti tehokasta ja hiilineutraalia energiajärjestelmää on johtanut teknologiseen murrokseen globaalilla mittakaavalla. Erityisesti tämä näkyy energia-alan investointeina uudenlaisiin energiaratkaisuihin sääntelyn ja tukipolitiikan muutosten sekä teknologiakustannusten laskun myötä. Keskeisessä asemassa murroksessa ovat uusiutuvien energialähteiden käyttöönotto, energiatehokkuus ja toimitusvarmuuden ylläpito. Järjestelmissä tapahtuvat muutokset ilmenevät esimerkiksi uusiutuvan energian käyttöönoton myötä sähköntuotannon huippujen sijoittumisena tuuliin ja aurinkoisein päiviin sekä pientuotannon yleistymisenä. Samalla energiajärjestelmä muuttuu uudenlaisten ratkaisujen ja tarpeiden myötä keskitetystä entistä hajautetummaksi kokonaisuudeksi. Toisaalta sektorien entistä tiiviimpi kytkeytyminen toisiinsa on seurausta sektorirajat ylittävien teknologioiden, kuten lämpöpumppujen ja sähköautojen, yleistymisestä. Entistä hajautetumpi ja vaihtelevat tuotanto sekä sektorien integraatio asettavatkin uudenlaisia vaatimuksia tulevaisuuden sähköjärjestelmille.

Yksi viime vuosina nopeasti kehittynyt ja monikäyttöinen teknologia on lohkoketju (blockchain). Julkisuudessa lohkoketju on ollut erityisesti kryptovaluuttojen, kuten bitcoinin yhteydessä. Terminä lohkoketjuteknologia on ollut erityisesti kryptovaluuttojen, kuten bitcoinin yhteydessä. Terminä lohkoketjuteknologia on tietotekniikkaan liittyvässä keskustelussa yläkäsite, jonka alle sijoittuu erilaisia hajautetusti ylläpidettyjä, ketjumaisen rakenteen omaavia tietokantateknologioita. Lohkoketjuteknologian visioidaan vähentävän energia-alaan liittyviä transaktiokustannuksia, parantavan olemassa olevien energiaressurssien käyttöastetta sekä mahdollistavan älykkään, puhtaan ja asiakaskeksisen sähköjärjestelmän uudenlaisia toimintoja.

Lohkoketjun suorat vaikutukset energiasektorille näkyvät esimerkiksi Brooklyn Microgrid –pilottihankkeessa, jossa lohkoketjuteknologiaan pohjautuva alusta toimii pienen yhteisön energian kaupapaikkana¹. Lohkoketjuilla nähdään olevan mahdollisuus toteuttaa energia-alalla sähkökaupan lisäksi monenlaisia toimintoja, aina alkuperätakuista taseselvitykseen. Toissijaisia vaikutuksia energia-alalle voivat tuoda esimerkiksi kryptovaluuttojen käyttöönoton aiheuttamat muutokset finanssimarkkinoilla tai bitcoinin ylläpidon korkea sähkönkulutus. Esimerkiksi japanilainen Remixpoint Inc. on ilmoittanut lisäävänsä bitcoinilla maksamisen mahdollisuuden energialaskutukseensa².

Erityisesti kryptovaluuttojen saama huomio on nostanut lohkoketjuteknologian näkyvyyttä, mikä näkyy myös Euroopan unionin myöntämässä rahoituksessa. Eri EU:n rahoitusmekanismien kautta lohkoketjuhankkeille on myönnetty tukea 83 miljoonaa euroa, sekä lisärahoitusta on mahdollista myöntää 340 miljoonaa euroa vuosien 2018–2020 aikana³. Energia-ala mainitaan usein yhtenä varteenotettavana lohkoketjujen sovellusalana ja myös energiasektorin toimijat ovat kiinnostuneita käyttämään resursseja teknologian tutkimiseen ja kehittämiseen.

Lohkoketjuteknologian soveltaminen energia-alalla on vasta alkutekijöissään. Ennakoitu disruptiivinen vaikutus ja kehityshankkeiden keskeneräisyys lisäävät selvitystyöhön liittyvää epävarmuutta. Tämän analyysi keskittyy ennen kaikkea kuvaamaan lohkoketjuteknologian mahdollisia käyttökohteita energiasektorilla. Selvitystyö toteutettiin työ- ja elinkeinoministeriön ja Fingrid Oyj:n yhteistyönä. Selvitystyö sisältää kirjallisuuskatsauksen lohkoketjuteknologioiden vaikutuksista ja mahdollisuuksista energiasektorin murrokseen liittyen. Työssä pohditaan myös lohkoketjuteknologian hyö-

¹ www.brooklynmicrogrid.com/

² <https://news.bitcoin.com/japanese-energy-supplier-bitcoin-payments/>

³ <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/blockchain-technologies>

dyntämisen edellytyksiä energia-alalla, erityisesti älykään sähköjärjestelmän kontekstissa. Aiheeseen liittyvä teknologia ja terminologia on selitetty lyhyesti. Kirjallisuuskatsauksen lisäksi selvitystä on täydennetty sidosryhmähaastattelujen avulla.

Selvitystyö sisältää laatijoiden henkilökohtaista pohdintaa kehitysasteella olevaan aiheeseen liittyen, eikä täten edusta työ- ja elinkeinoministeriön eikä Fingrid Oyj:n virallista kantaa aiheeseen liittyen.

Termistö

Lohkoketjuteknologiaan liittyvä termistö on usein englanninkielistä ja suomenkieliset termit epävirallisia. Yleisesti ottaen aiheen terminologia ei ole täysin vakiintunutta. Alla on esitetty tässä selvityksessä käytetyt keskeisimmät termit.

Termi	Selite
Hajautetun tietokannan teknologia / distributed ledger technologies (DLT)	Käytäntö jonka avulla toisilleen tuntemattomat tahot voivat yhteisesti tuottaa ja ylläpitää monenlaisia tietokantoja hajautetusti ja luotettavasti. Usein hajautetun tietokannan teknologioihin viitataan myös lohkoketju-käsitteellä. Tietokanta voi olla esimerkiksi transaktioista koostuva tilikirja (engl. ledger).
Lohkoketju	Hajautetun tietokannan teknologian alakäsite, jossa transaktioita kirjataan tietokantaan tietyin väliajoin pysyvästi yhteen niputettuina paketteina eli lohkoina. Nämä lohkot kytkeytyvät toisiinsa tiivistearvojen avulla, muodostaen ketjun.
Epäsymmetrinen salausmenetelmä	Menetelmä, jossa tieto salataan eri salaustavalla eli avaimella kuin se puretaan. Menetelmä käyttää kahta toisistaan riippuvaa avainta, joista toinen on julkinen ja toinen on salainen. Yksityistä avainta käytetään transaktioiden allekirjoittamiseen eli ainoastaan avaimenhaltijalla on tämä avain. Julkista avainta käytetään allekirjoitusten todentamiseen ja käyttäjän yksilöllisenä tunnisteena.
Kryptovaluutta	Virtuaalivaluutta, jonka suojaus ja ylläpito tapahtuvat esimerkiksi lohkoketjun avulla salatusti vertaisverkossa.
Vertaisverkko (Peer-to-peer network, P2P)	Verkko jossa kytketty taho toimii sekä palvelimena että asiakkaana verkon muille jäsenille.
Konsensusmenettely	Mekanismi, jolla hyväksytään transaktion oikeellisuus ja tapahtumarekisterin sisältö ennen tietokantaan kirjaamista.
Proof-of-Work (PoW)	Konsensusmenettely, jossa validoimisen ohella ratkaistaan haastava matemaattinen ongelma. Esimerkiksi bitcoin kryptovaluuttassa tiivistettävään lohkoon lisätään muuttuja, Nonce (number used once), jota vaihtamalla tiivistefunktion ratkaisu saadaan reunaehtojen mukaiseksi. Ratkaisija hyväksyy lohkon ja saa määritellyn palkkion.
Proof-of-Stake (PoS)	Konsensusmenettely, jossa esimerkiksi omaisuuden määrästä riippuen deterministisesti valittu hyväksyjä takaa omalla osuudellaan transaktioiden oikeudenmukaisuuden. Tällöin omistuksien määrä vaikuttaa suoraan mahdollisuuksiin osallistua ylläpitoon.
Proof-of-Authority	Luotetut, ennalta määritetyt ja luvan saaneet solmut saavat validoida ja lisätä lohkoja ketjussa. Voi myös olla solmuja, joilla on oikeus tehdä transaktioita, mutta ei validoida lohkoja.

Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT)	Konsensusmenettely, jossa päätöksenteko muodostetaan ketjutetun kommunikaation ja riittävän enemmistöpäätöksen perusteella.
Solmu (Node)	Lohkoketjun käyttöön osallistuva tietokone tai palvelin toimii solmuna, ja jokaisessa solmussa voi olla kokonainen tai osittainen kopio jaetusta tietokannasta.
Validointisolmu (Miner, validator)	Solmu joka osallistuu verkon suojaamiseen ja uusien transaktioiden oikeellisuuden vahvistamiseen käytössä olevan konsensusprotokollan mukaisesti. Validoimista kutsutaan PoW-konsensusmenettelyssä myös louhimiseksi (mining).
Tiivistefunktio (Hash function)	Yksisuuntainen laskuoperaatio, joka tuottaa määrämittaisen tiivistearvon tietosarjan sisällöstä, esimerkiksi tilikirjan transaktiosta. Esimerkki funktiosarja SHA-256 on käytössä useissa kryptovaluutoissa.
Tiivistearvo (Hash)	Valitun tiivistefunktion tuottama arvo alkuperäisestä tietosarjasta. Tiivistearvo ei ole käännettävissä takaisin alkuperäiseksi tiedostoksi.
Tiivistearvo-osoittimet (Hash Pointers)	Tietosarjan sisään voidaan sisällyttää jonkun toisen tiedon tiivistearvo. Tyypillisesti tämä on ajallisesti edellisen lohkon tiivistearvo. Ketjuttamalla lohkot toisiinsa tiivistearvo-osoittimilla edellisiä tietoja ei voi enää muokata muuttamatta ketjun seuraavia tiivistearvoja.
Rahake (Token)	Edustavat lohkoketjuista puhuttaessa tiettyä digitaalista vaihdannallista omaisuutta tai hyödykettä, jolla voidaan tehdä transaktioita. Rahakkeita luodaan yleensä lohkoketjujen konsensusprotokollan varmuuden yhteydessä. Rahake voi edustaa esimerkiksi yhtä kryptovaluuttaa, äänioikeutta vaaleissa tai sähkön alkuperätakuun sertifikaattia.
Älykäs sopimus (Smart contract)	Tietokoneohjelma, joka toteuttaa itsensä tiettyjen ehtojen täytyessä. Voidaan toteuttaa esimerkiksi hajautettuna ohjelmana (decentralized application, DApp) lohkoketjun osana.
Initial coin offering (ICO)	Rahoitustapa, jossa lohkoketjun parissa työskentelevät yritykset luovuttavat sijoituksia vastaan omia esilouhittuja virtuaalivaluuttojaan.

1 Mitä lohkoketjuteknologia on?

Lohkoketjuteknologia on kokoelma käytäntöjä ja tekniikkaa, jonka avulla osapuolet voivat luoda ja ylläpitää hajautettuja ja jaettuja tietokantoja luotettavasti. Yleisesti ottaen erilaiset informaatioverkot voidaan jakaa kolmeen luokkaan: keskitettyihin, hajautettuihin ja täysin hajautettuihin verkotopologioihin.⁴ Yksinkertaisin näistä on keskitetty malli, jossa tietokantaa ylläpitää verkossa yksi keskitetty taho. Hajautetussa verkossa tieto on sijoitettu useammalle samaa tietokantaa ylläpitävälle keskuspalvelimille. Täysin hajautetussa tietokannassa sama tieto sijaitsee tallennettuna jokaisella verkon taholla. Tarve luoda hajautettuja tietokantoja esiintyy järjestelmissä, joissa tietoa halutaan tarkastella ja muokata etäältä luotettavasti. Lisäksi hajautetun mallin tavoitellut hyödyt liittyvät käyttökohteesta riippuen esimerkiksi luotettavuuteen, kyberturvallisuuteen, kustannussäästöihin tai tiedonvaihdon nopeuteen.

Siirryttäessä keskitetystä mallista kohti hajautettua ratkaisua käyttäjien täytyy olla varmoja, että käytettävissä oleva tieto on ajan tasalla ja käyttäjät ovat luotettavia. Tyypillinen esimerkki kuvaamaan hajautettuun tietoon perustuvan päätöksenteon haasteita on 1980-luvulla esitetty, niin kutsuttu bysanttilaisen kenraalin ongelma (The Byzantine Generals' Problem)⁵:

”Joukko omia divisiooniaan johtavia kenraaleja on tilanteessa, jossa Bysanttilainen armeija piirittää vihollisen kaupunkia. Kenraalien tulee päästä yhteisymmärrykseen äänestämällä taistelusuunnitelmasta käyttäen lähettejä viestinviejinä, koska joukot ovat hajaantuneet kaupungin ympärille. Lisäksi kenraalien tulee viestiä päätös oman divisioonansa luutnanteille. Kaikilla osapuolilla tulisi olla mahdollisimman ajantasainen tieto viestien sekä päätöksenteon kulusta. Kuitenkin lähettien, kenraalien ja luutnanttien joukossa on pettureita, jotka saattavat sabotoida suunnitelmaa välittämällä väärän viestin tai toimimalla yhteisen suunnitelman vastaisesti. Mikäli kaikki joukot eivät hyökkää tai peräänny samanaikaisesti, johtaa se tappioon taistelussa.”

Bysanttilaisen kenraalin ongelmaan on tarjottu erilaisia ratkaisuja sen esittämisestä lähtien. Yhtenä merkillepantavana edistysaskeleena pidetään vuonna 1999 esitettyä Practical Byzantine Fault Tolerance –algoritmia (pBFT)⁶, jonka toiminta ei vaarannu järjestelmässä toimivien pettureiden määrän pysyessä alle kolmasosassa kokonaisuudesta. Hajautetun tiedon luotettavuuden ongelmaan pureutuvat myös erilaiset lohkoketjuratkaisut, joista tunnetuin ja ensimmäinen sovellus on vuonna 2008 julkaistu kryptovaluutta bitcoin. Pseudonyymiä Satoshi Nakamoto käyttäneen tahon julkaisema konseptipaperi kuvasi uudenlaisen, luotettavuuden varmistavan konsensusmenetelmän ja ketjumaisen tietokantarakenteen muodostaman kokonaisuuden, joka mahdollisti hajautetun internetpohjaisen bitcoin valuutan luonnin ilman keskitettyä auktoriteettia.⁷ Bitcoinin julkaisemisen jälkeen erilaisia lohkoketjuihin perustuvia kryptovaluuttoja alettiin kehittää nopealla tahdilla, joka johti erilaisten lohkoketjurakenteiden kehitykseen. Viime vuosien aikana teknologiaan ovat perehtyneet myös muiden alojen toimijat ja lohkoketjujen käyttömahdollisuuksien on nähty ulottuvan aina vaalien luotettavuuden varmistamisesta sähköjärjestelmän ylläpitoon.

Useasti lohkoketjuteknologia-termillä viitataan kaikkiin hajautetun tietokannan teknologiaratkaisuihin. Myös tässä selvitystyössä käytetään lohkoketju-termiä melko vapaasti, koska aiheeseen liittyvä

⁴ http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80667/LVM_12_2017_Lohkoketjuteknologian%20soveltaminen.pdf?sequence=1&isAllowed=y

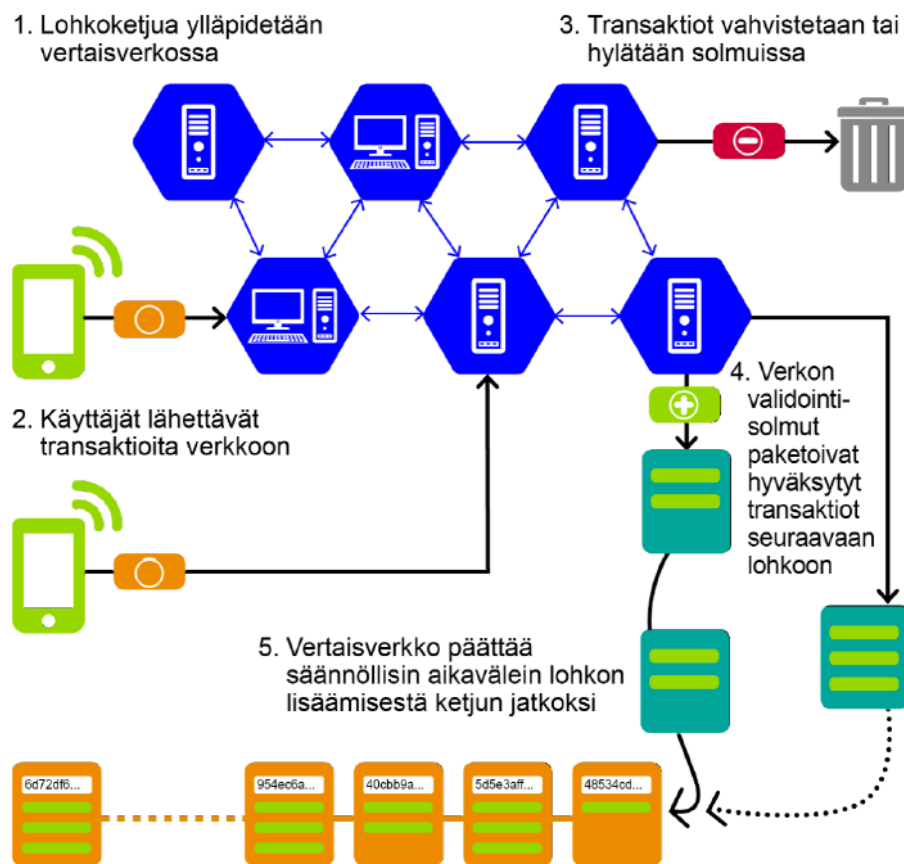
⁵ <https://people.eecs.berkeley.edu/~luca/cs174/byzantine.pdf>

⁶ <http://pmg.csail.mit.edu/papers/osdi99.pdf>

⁷ <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>

termistö on vielä kehitysvaiheessa. Kuitenkaan kaikki hajautetut tietokantaratkaisut eivät ole avoimesti jaettuina tai lohkoketjuteknologialla toteutettuja.

Käytännössä lohkoketjuihin voidaan tallentaa mitä vain tietoa, jota halutaan ylläpitää hajautetusti vertaisverkossa. Yksi yleinen käyttökohde on erilaiset transaktiot vertaisverkon toimijoiden välillä. Nämä transaktiot voidaan toteuttaa kahden tuntemattoman osapuolen välillä luotettavasti ilman välittäjänä toimivaa vakituista kolmatta osapuolta lohkoketjun avulla. Tämä on mahdollista siten, että jokainen transaktio kirjataan lohkoketjuun. Transaktioista koostuva lohko hyväksytään kussakin lohkoketjujärjestelmässä erikseen määritellyn konsensusmenettelyn mukaisesti. Hyväksymisen jälkeen lohko lisätään ketjuun tietyin väliajoin ja päivitetty ketju tallennetaan jokaisen ketjun osapuolen laitteelle. Seuraavassa kuviossa on esitettyä periaate, jolla yksittäiset transaktiot muodostavat lohkoketju⁸.



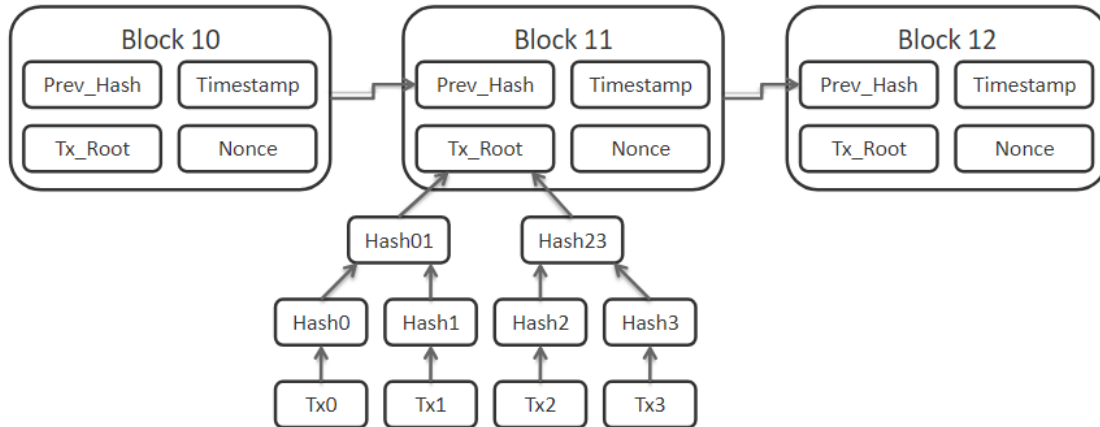
Kuva 1 Lohkoketjun muodostuminen yksittäisistä transaktioista⁸

Lohkoketjun idea perustuu siihen, että lohko voidaan tunnistaa yksilöllisellä, lohkon tiedoista tiivistefunktion tuottamalla tiivistearvolla, joka liitetään aina seuraavan lohkon alkuun. Tiivistefunktio on yksisuuntainen laskuoperaatio, joka tuottaa lohkon sisältämästä tiedosta määrämittaisen tiivistearvon. Lohkojen alussa sijaitsevat tiivistearvo-osoittimet, eli edellisen funktion tiivistearvot linkittävät lohkot toisiinsa. Tiivistefunktioiden käyttäminen ketjun luomisessa muodostaa lohkoketjulle rakenteen, jossa yhden lohkon tietojen muuttaminen johtaa kaikkien sitä seuraavien lohkojen tiivistearvojen muuttamiseen. Muutos tiivistearvoissa paljastaa näin tietojen manipuloinnin. Mikäli lohkoketju

⁸ http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80667/LVM_12_2017_Lohkoketjuteknologian%20soveltaminen.pdf?sequence=1&isAllowed=y

haarautuu (engl. fork) vertaisverkossa erillisiksi ketjuiksi, valitaan näistä se, jonka mahdollinen vääräntäminen olisi vaikeampaa. Useimmissa lohkoketjuissa tämä tarkoittaa pisintä haaraa.

Lisättävien lohkojen oikeellisuuden varmistamiseen voidaan käyttää erilaisia konsensusmenetelmiä. Pelkästään kryptovaluutoissa menetelmiä on useita satoja erilaisia, joskin osa näistä eroaa toisistaan vain vähän. Yleisimpänä voidaan pitää niin sanottua Proof-of-Work –konsensusmenetelmää, jossa validoija ratkaisee raskaan matemaattisen ongelman saadakseen luvan liittää uuden lohkon ketjuun.



Kuva 2 Bitcoinin lohkoketjun yksinkertaistettu rakenne⁹

Yllä kuvatun bitcoinin tapauksessa Proof-of-Work on toteutettu jokaisessa lohkoketjussa olevan uniikin Nonce (number used once) –muuttujan etsimisellä. Validoijat etsivät eli louhivat sopivaa Nonce-muuttujaa, jolla tiivistefunktion ratkaisu saadaan ennalta määrätty ehdot täyttäväksi. Ehdot täyttävän Nonce-muuttujan löytänyt validoija saa tekemästään työstään palkkion bitcoineina. Bitcoinin järjestelmässä validointiin voi osallistua kuka tahansa. Lisäksi lohkoketjut sisältävät edellisen lohkon tiivistearvon (Prev_Hash), epäsymmetrisellä avaimella salatut transaktiot (Tx_Root) ja aikaleiman (Timestamp).⁹

Toinen yleisesti käytetty konsensusmenetelmä on Proof-of-Stake, jota hyödyntävässä lohkoketjussa validoija valitaan panosta indikoivan ominaisuuden, kuten omistussuuden ja omistuksen keston, mukaisesti. Ajatuksena on, että Proof-of-Work –menetelmää hyödyntävän lohkoketjun manipuloiminen vaatisi yli puolet laskentaan käytettävästä pääomasta ja vastaavasti Proof-of-Stake –protokollan tilanteessa validoijan tarvitsisi omistaa yli puolet kryptovaluutasta kyettäkseen manipulointiin. Lohkoketjun suojaus perustuu näin molemmissa menetelmissä laskentatehon tai omistussuuden hankinnan kalliiseen hintaan.¹⁰ On esitetty, että bitcoinin kokonaisenergiankulutus olisi jopa kymmeniä terawattitunteja vuodessa louhimiseen käytettävän laskentatehon myötä.¹¹ Tämän perusteella voidaankin nähdä, että laskennan hintaan perustuissa kryptovaluutoissa yleinen Proof-of-Work –konsensusprotokolla ei ole tämän hetkiselällä teknologialla järkevä ratkaisu energiatehokkuuden kannalta.

Lohkoketjun sovellustarkoitus määrittelee, millainen järjestelmä on järkevää kehittää. Erilaisten lohkoketjujen muuttuvia ominaisuuksia ovat muun muassa tiedon läpinäkyvyys, yksityisyys, varmuuskopiointi, julkisen tarkastamisen mahdollisuus ja keskitetyn auktoriteetin olemassaolo. Karkea jako lohkoketjujen välillä voidaan tehdä tarkastelu-oikeuksiltaan julkisiin ja yksityisiin, sekä muok-

⁹ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bitcoin_Block_Data.svg

¹⁰ <https://bitfury.com/content/downloads/pos-vs-pow-1.0.2.pdf>, © 2015 Bitfury Group Limited

¹¹ <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>

kausoikeuksiltaan avoimiin ja rajattuihin alaluokkiin. Bitcoin on esimerkki täysin julkisesta ja avoimesta lohkoketjusta, jossa kuka tahansa voi lukea lohkoketjun sisältämää tietoa, luoda uusia transaktioita ja osallistua validointiprosessiin. Vastaavasti yksityisessä lohkoketjussa transaktioiden tarkastelu- ja muokkausoikeuden antaa jokin keskitetty taho, joka myös päättää validointiin osallistuvista osapuolista (esim. Proof-of-Authority).¹² Esimerkiksi suuret yritykset saattaisivat hyötyä tämänkaltaisen yrityksen sisäisen, yksityisen lohkoketjun käytöstä esimerkiksi toimitusketjujen hallinnassa¹³. Myös pankkien välisessä toiminnassa olisi mahdollista hyödyntää transaktioiden kirjaimiseen yksityistä lohkoketjua.¹⁴

Myös sovelluskohteiden tekniset ominaisuudet ohjaavat lohkoketjun valintaa. Esimerkiksi internetiin kytkettyjen esineiden ja laitteiden (Internet of Things, IoT) hyödyntämien lohkoketjujen tulee olla ominaisuuksiltaan kevyitä, mahdollistaen samalla sekä suuren laitemäärän liittämisen järjestelmään että rahamäärällisesti pienin transaktioiden tekemisen. Toisaalta taas finanssimarkkinoilla transaktioiden vahvistamisnopeus on monissa tapauksissa tärkeässä asemassa. Soveltaessa lohkoketjuteknologiaa esimerkiksi digitaalisen äänestämisen alustana on äänioikeuden kaksinkertaisen käytön estäminen ja tietojen kyberturvallisuus ensisijaisen tärkeää.

Valintaa ei kuitenkaan tehdä vain erilaisten lohkoketjujen välillä, vaan tulee pohtia, onko toteuttavan tietokantasovelluksen kannalta järkevää käyttää lohkoketjua normaalin keskitetyn tietokannan sijaan. Lohkoketjut eivät mahdollista luonteeltaan uudenlaisen tiedon tallentamista tietokantaan tai uudenlaisia transaktioita toimijoiden välillä. Lohkoketjun etuina normaaliin keskitettyyn tietokantaan nähden voidaankin erityisesti pitää välikädetömyyttä ja peukaloimattomuutta.¹⁵ Toisaalta lohkoketjujen peukaloimattomuus tuo myös mukanaan rajoitteita. Esimerkiksi mahdollinen virheellinen transaktio korjataan tekemällä uusi vastamerkinen transaktio. Tällöin molemmista tapahtumista jää merkintä ketjuun. Seuraava taulukko sisältää vertailun erityyppisten ratkaisujen eroista.

Taulukko 1 Tietokantaratkaisujen vertailu. Mukailtu lähteestä¹⁶:

	Avoin ja julkinen lohkoketju	Rajattu lohkoketju tai jaettu tietokanta	Keskitetty tietokanta
Tietokannan koko	Pieni	Suuri	Todella suuri
Nopeus	Hidas	Keskinopea	Nopea
Lukijoiden määrä	Suuri	Suuri	Suuri
Kirjoittajien määrä	Suuri	Matala	Suuri
Epäluotettavien kirjoittajien sietokyky	Suuri	Matala	Ei ole
Konsensusmenettely	POW, POS	POS, PBFT	-
Keskitetty hallinta	Ei	Kyllä	Kyllä

Kuvan 3 vuokaavio sisältää peruseriaatteen lohkoketjuteknologian käyttöönoton arviointiin. Mikäli vain yksi tai useampi luotettava osapuoli käyttää tietokantaa, lohkoketjuteknologiaa tehokkaampia vaihtoehtoja on saatavilla. Jos kaikkien tahojen mielestä hyväksyttävä kolmas osapuoli on saatavilla, ei tällöinkään lähtökohtaisesti ole kannattavaa siirtyä lohkoketjuteknologiaan. Muokkausoi-keudeltaan rajattu lohkoketju voidaan jakaa lukuoi-keudeltaan julkiseksi esimerkiksi, jos julkishallinnollinen taho haluaa lisätä toimintansa läpinäkyvyyttä.

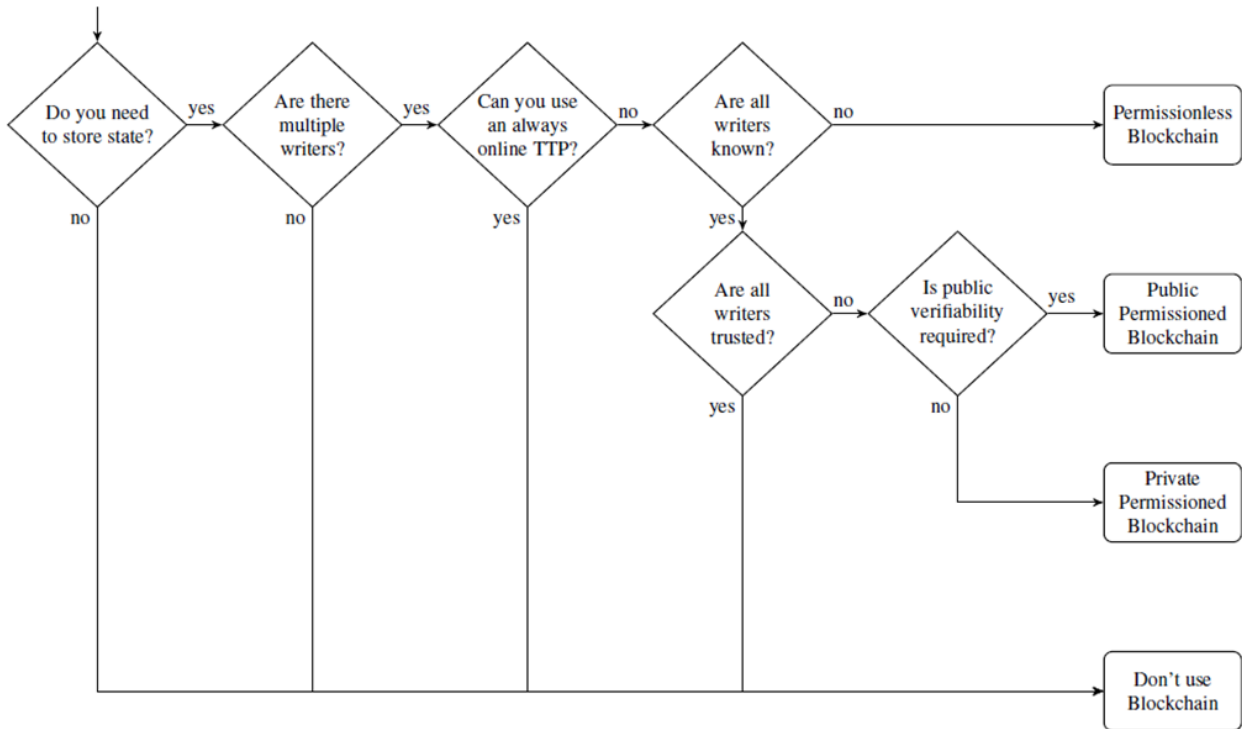
¹² <https://eprint.iacr.org/2017/375.pdf>

¹³ <https://blockchainatberkeley.blog/a-snapshot-of-blockchain-in-enterprise-d140a511e5fd>

¹⁴ <https://eprint.iacr.org/2017/375.pdf>

¹⁵ <https://www.multichain.com/blog/2016/03/blockchains-vs-centralized-databases/>

¹⁶ <https://pdfs.semanticscholar.org/48b7/5b9d1d612b1d6889d2b4749c1019e14429a6.pdf>



Kuva 3 Lohkoketjuteknologian käyttöönoton vuokaavio¹⁷

Lohkoketjuteknologia yhdistelee vanhoja teknologioita, kuten epäsymmetristä salausta, kryptografiaa ja vertaisverkkojen tiedonvaihtoa tai kaupankäyntiä. Lohkoketjujen toimintaan voidaan liittää myös uudenlaisia transaktioita helpottavia ominaisuuksia, kuten älykkäitä sopimuksia. Älykkäällä sopimuksella tarkoitetaan tietokoneohjelmia, jotka toteuttavat itsensä tiettyjen ehtojen täytyessä. Energiajärjestelmän tapauksessa nämä ehdot voivat liittyä esimerkiksi sähkään, lämpötilaan tai esimerkiksi sähköjärjestelmän tehotasapainoon. Älykkään sopimuksen sopimusehdot ovat kirjattuna ohjelmakoodin muodossa ja ne voivat sisältää myös automatisoituja sopimusrangaistuksia. Sopimukset kirjataan lohkoketjuun, josta ne ovat pysyvästi todennettavissa. Älykkäiden sopimusten suorittamista voi olla mahdotonta pysäyttää (Unstoppable Decentralized Web Application) vertaisverkossa, joten niiden ehdot tulee määritellä hyvin. Älykkäiden sopimusten voidaan nähdä automatisoivan kaupankäyntiä sekä laskevan kaupankäynnin kustannuksia.¹⁸

¹⁷ <https://pdfs.semanticscholar.org/48b7/5b9d1d612b1d6889d2b4749c1019e14429a6.pdf>

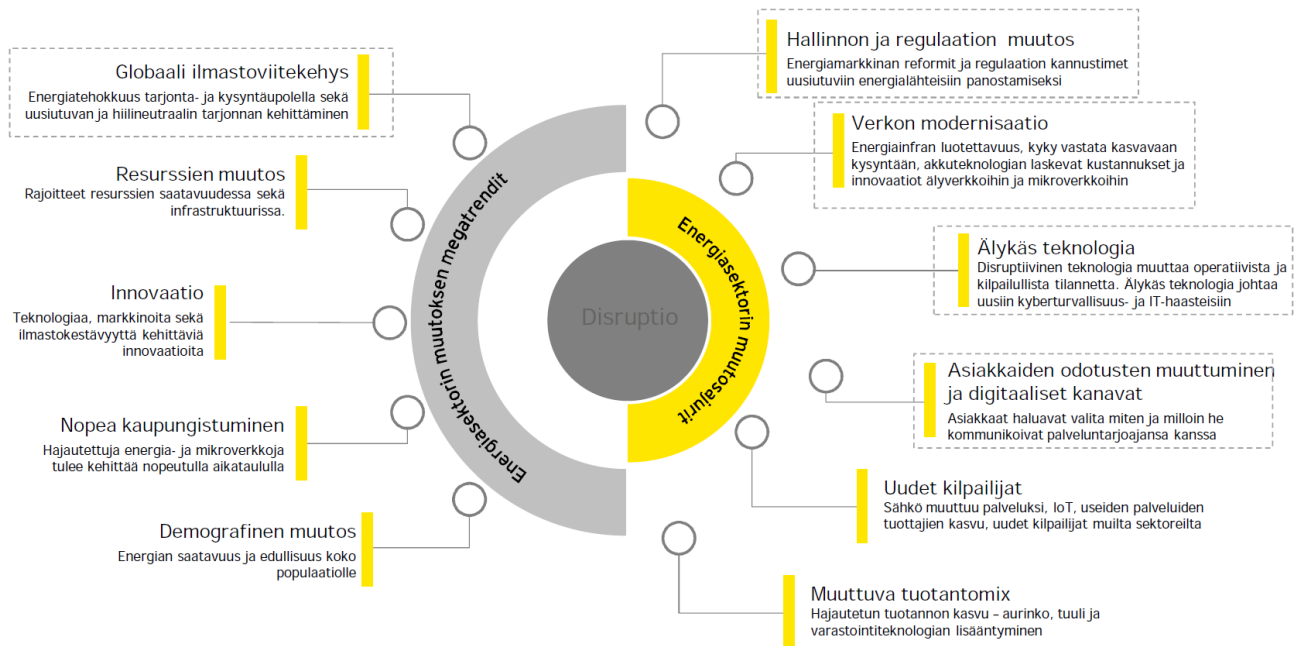
¹⁸ https://www.trafi.fi/trafitalks/artikkelit/21/alysopimukset_ja_lohkoketjut_valtaavat_tilaa_-_kuihtuvatko_lakimiehet

2 Lohkoketjuteknologian soveltaminen älykkäässä sähköjärjestelmässä

Energia-ala nähdään ominaisuuksiltaan potentiaalisena lohkaketjuteknologian hyödyntäjänä. Kuitenkin teknologian varhaisen kehitysasteen myötä varsinaisia käytännön sovelluksia on markkinoilla rajallisesti. Tämän selvityksen tarkoituksena on antaa yleinen kuva potentiaalisista sovelluskohteista, jonka vuoksi teknistaloudellisten reunaehto- jen tarkka analyysi on jätetty selvityksen ulkopuolelle. Havaitut lohkaketjuteknologian älykkäisiin sähköjärjestelmiin liittyvät sovelluskohteet on jaettu kuuteen laajempaan kokonaisuuteen:

- Älykkäiden sähköverkkojärjestelmien tietoturva
- Vertaisverkossa toimivat älykkäät laitteet
- Kaupankäynti vertaisverkossa
- Sähkömarkkinoiden kaupankäynti
- Tehotasapainon hallinta
- Uusiutuvien energialähteiden käytön edistäminen

Edellä mainitut kokonaisuudet kattavat energia-alan osapuolia aina pienistä loppukuluttajista isoihin valtiollisiin sekä kansainvälisiin toimijoihin asti. Lisäksi lohkaketjuteknologialla voidaan toteuttaa energijärjestelmien tunnistautumispalveluja, jolloin toimijat todentavat digitaalisen identifikaation, kuten esimerkiksi pankkien sähköisen tunnistautumisen ratkaisuilla nykyään. Kuva 4 sisältää katsauksen koko energiasektoriin liittyviin muutoksiin eli energiamurrokseen. Lohkoketjuteknologia liittyy useisiin kuvan 4 muutosvoimista, esimerkiksi älykkääseen teknologiaan.



Kuva 4 Lohkoketjuteknologiaan liittyvä sovellusympäristö¹⁹

¹⁹ <https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/Kysyntäjoustoa+tukevat+kv+valvontamenetelmät+loppuraportti.pdf/3baf0cb9-3d9d-44f9-bcf1-51e11e9ba7b5>

Älykkäiden sähköjärjestelmien tietoturva

Vertauskuvallisesti ulkoisella tietoturvalla suojattu keskitetty tietokanta on kuin aidattu puutarha. Tietoturvan murto mahdollistaa pääsyn koko tietokannan tietoihin ja antaa mahdollisuuden muokata näitä haluamallaan tavalla. Hajautetuissa lohkoketjuissa ei lähtökohtaisesti ole yhtä tällaista pistettä, jonka toiminnan estyminen vaarantaa lohkoketjun toiminnan. Tämän inhimillisen tekijän ongelman poistavan ominaisuuden vuoksi moni näkee lohkoketjujen tuovan uusia mahdollisuuksia tietosuojan toteuttamiseen useilla eri aloilla. Vaikka esimerkiksi Viron terveystietorekisterin suojauksessa sovelletaan osittain lohkoketjuteknologiaa²⁰, liittyy teknologian käyttöön tietoturvan kannalta myös monia kysymyksiä ja ratkaisemattomia ongelmia.

Yksi käytössä olevien julkisten lohkoketjujen tärkeistä tietoturvaominaisuuksista on käyttäjien tunnistamiseen käytettävät avaimet. Esimerkiksi tehdäkseen transaktioita bitcoinilla, osapuolen tulee tunnistaa itsenä salaisella yksityisellä avaimella. Yksityisestä avaimesta voidaan johtaa julkinen avain, joka toimii käyttäjän julkisena identiteettinä järjestelmässä. Transaktiot ohjautuvat oikeille käyttäjille ja kirjataan lohkoketjuun näiden julkisten avainten perusteella. Myös älyverkkoihin voitaisiin soveltaa tällaista järjestelmää liittämällä esimerkiksi älymittarit tällaisen avainjärjestelmän piiriin. Mittareihin tallennettaisiin yksityiset avaimet, joita ei voida lukea tai poistaa laitteesta. Mittarit tunnistettaisiin julkisten avainten perusteella, joihin myös olisi mahdollista lisätä tietoa esimerkiksi sähkönkulutuksesta. Mittari voisi kirjata lohkoketjuun esimerkiksi sähkönkulutuksensa ja todentaa sen yksityisellä avaimella, jolloin tieto ei ole voinut tulla muualta kuin kyseisestä mittarista.²¹

Kuitenkin avainten säilyttäminen turvallisesti on vielä osittain ratkaisematon ongelma. Vaikka itse lohkoketju olisi turvallinen tietoturvahyökkäyksiltä, esimerkiksi yksityisten avainten säilyttämiseen tarkoitettuihin virtuaalilompakoihin on suoritettu useita onnistuneita hyökkäyksiä. Julkisessa lohkoketjussa varastettujen avainten ja varojen palauttaminen on hyvin vaikeaa tai jopa mahdotonta tehtyjen transaktioiden peruuttamattoman luonteen vuoksi. Yksityinen lohkoketju on mahdollista luoda siten, että transaktiot voidaan lohkoketjun haltijan määrittelemien ehdoin palauttaa.²² Kuitenkin turvalliseen avainten hallintaan on ehdotettu ja kehitetty erilaisia ratkaisuja, kuten esimerkiksi aieman kappaleen mittariesimerkissä tarkoitettu erillinen avainten tallennukseen tarkoitettu laitekomponentti²³ tai laitteen ja lohkoketjun välillä keskusteleva turvaohjelmisto²⁴. Vaikka julkiset lohkoketjut ovat nykyisen tiedon mukaan hyvin suojattuja hyökkäyksiltä, on myös huomattava, että lohkoketjujen yleistyessä lohkoketjuihin kohdistuvien hyökkäyksien kehittäminen muodostuu kannattavammaksi.²⁵

Transaktioiden läpinäkyvyydestä johtuen anonyymien osapuolten kauppaa on mahdollista seurata lohkoketjussa. Tämä voisi tuottaa ongelmia esimerkiksi sähkön tukkukaupapaikalla, jossa kaikki kaupat kirjataan samaan lohkoketjuun aina samalla toimijan julkisella avaimella. Tällöin esimerkiksi kilpailijoiden voisi olla mahdollista seurata muiden markkinaosapuolten toimia ja hyötyä

²⁰ <https://e-estonia.com/solutions/healthcare/e-health-record/>

²¹ https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9236_Vulnerabilities_in_smart_meter_infrastructure_-_can_blockchain_provide_a_solution.pdf

²² <https://hbr.org/2017/03/how-safe-are-blockchains-it-depends>

²³ <https://newsroom.accenture.com/news/accenture-debuts-hardware-based-security-solution-to-simplify-and-enable-blockchain-security-for-large-scale-enterprise-it-use.htm>

²⁴ https://www.researchgate.net/publication/314282164_Enhancing_IoT_Security_and_Privacy_with_Distributed_Ledgers_-_A_Position_Paper

²⁵ https://cdn.eurelectric.org/media/3114/paper2_blockchain_eurelectric-h-CD3AAA18.pdf

tästä.²⁶ Seuranta voitaisiin estää esimerkiksi käyttämällä useita eritasoisia lohkoketjuja²⁶ tai lohkoketjun päälle luotavilla rajapinnoilla.²⁷

Lohkoketjuteknologioiden käyttöönotto on vasta alkuvaiheessa ja edellä mainitun kaltaisia ongelmia voidaan ratkaista tuottamalla käyttötarkoitukseen kehitettyjä teknologioita. Kuitenkin uudenlaisia ongelmia ilmenee myös teknologian kehityksen ja käyttöönoton myötä. Tästä esimerkkinä on älysopimusten perusteella toiminut The DAO-rahoitusjärjestelmä (The Decentralized Autonomous Organization), jonka tarkoituksena oli tarjota joukkorahoitusta. Kuitenkin järjestelmän älysopimuksia ohjelmoitaessa oli tapahtunut virhe, joka mahdollisti hyökkäyksen, jossa sijoittajien varoja vietiin yli 50 miljoonan dollarin arvosta. Käytetty Ethereum-lohkoketju ei itsessään ollut haavoittuvuuden syy, vaan ongelmana oli virheellisesti ohjelmoidut älykkäät sopimukset, joita ei voitu pysäyttää. Varojen palauttamiseksi suoritettiin ristiriitainen Ethereum-lohkoketjun jako (engl. hard fork) Ethereumiin ja Ethereum classiciin.²⁸ Lohkoketjua hyödyntävien järjestelmien kehityksessä onkin vielä paljon epävarmuutta. Kehityshankkeisiin tulee varata riittävästi aikaa ja resursseja simulaatiota sekä testausta varten. Tämä pätee erityisesti lohkoketjuteknologiasta puhuttaessa, koska vertaisverkoissa suoritettavat komennot voivat olla mahdotonta keskeyttää ja koska lohkoketjut ovat aiheena alalle tuore. Lohkoketjua käyttöönotettaessa tulisikin varmistaa käyttöönotettavan lohkoketjun soveltuvuus, sekä prosessin lohkoketjun ulkopuolisten osien ja lohkoketjurajapintojen tietoturva.

Vertaisverkossa toimivat älykkäät laitteet

Vertaisverkossa toimivat älykkäät laitteet (Internet of Things, IoT) voivat olla tulevaisuudessa yksi älykkäiden sopimusten käyttökohde. Älykkäät sopimukset mahdollistavat moniaskelisten prosessien muodostamisen lohkoketjussa yksittäisten transaktioiden sijaan. Yksinkertainen esimerkki on sopimus, jossa määrätään, että kun käyttäjä A lähettää käyttäjälle B kaksi yksikköä X:ä, sopimus vastaa tähän lähettämällä automaattisesti yhden yksikön Y:tä käyttäjälle A. Kun sopimus saa viestin sopimusehdot täyttävästä transaktiosta, se toteuttaa itsensä. Sopimuksen toteuttamat transaktiot kirjataan uusina transaktioina lohkoketjuun. Älysopimukset voivat olla hyvinkin monimutkaisia, ja ne voivat olla ohjelmoitu muuttamaan toimintaansa käyttäjäien toiminnan ja ulkoisten olosuhteiden mukaan.²⁶

IoT-laitteiden toimintaa voitaisiin ohjata älykkäin sopimuksin. Tällöin esimerkiksi kryptovaluuttaa hyödyntävät lohkoketjusysteemit voisivat toimia laitteiden välisenä kauppapaikkana tai laitevalmistajat suorittaisivat älykkäiden laitteiden ohjelmistopäivitykset lohkoketjun kautta.²⁹ Kuitenkin laitteiden itsenäinen kaupankäynti koostuisi erittäin suuresta määrästä mikrotransaktioita, joita nykyiset luottokortteihin perustuvat maksujärjestelmät eivät toistaiseksi kykene käsittelemään kustannustehokkaasti. Lohkoketjuteknologian kehityksen myötä ne voisivat mahdollistaa asiakkaan joustomahdollisuuksia parantavan laitteiden välisen kaupan ilman keskitettyä toimijaa.³⁰ Transaktiokustannusten lisäksi lohkoketjussa suuria määriä yksiköitä sisältävän tietokannan ylläpidon kustannukset ovat hajautettu lohkoketjun toimijoiden kesken.

²⁶ <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7467408>

²⁷ <https://ieeexplore.ieee.org/document/6956581/>

²⁸ <https://medium.com/swlh/the-story-of-the-dao-its-history-and-consequences-71e6a8a551ee>

²⁹ https://ecal.berkeley.edu/pubs/CCTA17_Blockchain.pdf

³⁰ <https://ieeexplore.ieee.org/document/8016254/>

Sähköautojen lataus on jo nykyisin teknisesti mahdollista suorittaa lohkoketjuun perustuvalla makseteknologialla. Käyttäjä vaihtaa ensin tietyn määrän euroja virtuaalilompakkoonsa mobiilisovelluksen avulla. Kiinnittäessään auton lataukseen, käyttäjän lompakosta veloitetaan sähkön kulutuksen mukaan turvallisesti maksu, joka kirjautuu suoraan lohkoketjuun. Järjestelmässä, jonka tavoitteena on mahdollistaa latausaseman käyttö ja maksunvälitys vertaisten kesken, latauspisteitä voivat ylläpitää myös yksityishenkilöt. Järjestelmää tarjoava taho voisi taas muodostaa liikevaihtonsa esimerkiksi älypistokkeen vuokrasta ja mikrotransaktioista. Lohkoketjuun perustuvan ratkaisun helppous ja vertaislatauksen mahdollisuus voisivat toimia kannustimena tällaisten järjestelmien yleistymiseen. Älykkäiden sopimusten ja digitaalisen tunnistamisen kehitys ovat tärkeässä asemassa tällaisten älykkäiden palveluiden kehittymisen näkökulmasta.³¹ Erilaiset vertaiskaupankäynnin muodot ja alustatalouden suosion kasvu esimerkiksi majoitus- ja kuljetuspalveluissa voivat ennakoida erilaisten vertaispalveluiden toimintamahdollisuuksia myös energia-alalla.

Kaupankäynti vertaisverkossa

Uusien teknologioiden murtautuminen nähdään usein haastavampana aloilla, joilla on käytössä vakiintuneet käytännöt ja instituutiot. Tämän vuoksi lohkoketjuteknologian hyödyntämisessä voidaan nähdä enemmän mahdollisuuksia uusilla sähkömarkkinoiden osa-alueilla, kuten energiayhteisöissä ja loppukuluttajien välisessä kaupassa (peer-to-peer, P2P). Viime vuosina tällaiset uudet, hajautettuihin ja uusiutuviin energiaresursseihin perustuvat toimintatavat ovat jo jossakin määrin tulleet markkinoille keskitetyn sähkömarkkinamallin rinnalle. Erityisesti energiayhteisöillä ja P2P-kaupalla on lohkoketjujen perusajatuksen kanssa yhteistä vertaisverkko ja toiminnan hajautettu luonne.³² Lohkoketjujen ominaisuudet, kuten läpinäkyvyyden, transaktioiden peukaloimattomuus ja älysopimusten käyttömahdollisuus voisivat tukea sen käyttöä tällaisessa toimintaympäristössä.³³ Monet lohkoketjuteknologian pilottihankkeet ovatkin kohdistuneet energiayhteisöihin ja P2P-kauppaan.³²

P2P-kaupassa käyttöön otetut tai pilotoidut lohkoketjuteknologiat ovat keskittyneet pääosin rajattuihin paikallisiin markkinapaikkoihin. Kuitenkin lohkoketjuteknologian avulla on pyritty myös kehittämään paikallisen ja globaalin tason yhdistäviä markkinoita. Pienien ratkaisujen laajentaminen isoiksi alustoiksi luo omanlaisia haasteita, kun lohkoketjuteknologian tulisi huomioida eri alueiden taloudellisia, lakisääteisiä ja jopa kulttuurisia erityispiirteitä. Lohkoketjuteknologiat toimijat voivat tarjota markkinapaikan suoraan tuottaja-kuluttajille tai toisaalta yrityksille, jotka tarjoavat lohkoketjualustan kuluttajille osana omaa tuotevalikoimaansa³⁴.

Yksinkertaisessa esimerkkimallissa lohkoketjualustalla toimii kryptovaluutta, jonka rahakkeen fyysinen arvo on sidottu kilowattituntiin sähköä. Yhden yksikön valuuttaa saa tuottamalla kilowattituntin sähköä järjestelmään sekä vastaavasti valuuttaa käytetään sähkön kulutukseen. Yli- ja alijäämäiset taloudet käyvät kauppaa rahakkeilla lohkoketjuun perustuvalla alustalla, jossa rahakkeen euroääräinen arvo muodostuu kysynnän ja tarjonnan mukaisesti. Kaupankäynti voisi tapahtua mahdollisesti älymittareiden välillä automaattisesti älysopimuksia hyödyntäen. Järjestelmässä erilaisen kulutus-, tuotanto- ja varastointimahdollisuudet omaavat toimijat voisivat näin optimoida oman hyötynsä lohkoketjuun perustuvalla teknologialla. Energiayhteisöissä tapahtuva sisäinen taseselvitys

³¹ http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80667/LVM_12_2017_Lohkoketjuteknologian%20soveltaaminen.pdf?sequence=1&isAllowed=y

³² https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9165_Blockchain_in_der_Energiewende_englisch.pdf

³³ https://ecal.berkeley.edu/pubs/CCTA17_Blockchain.pdf

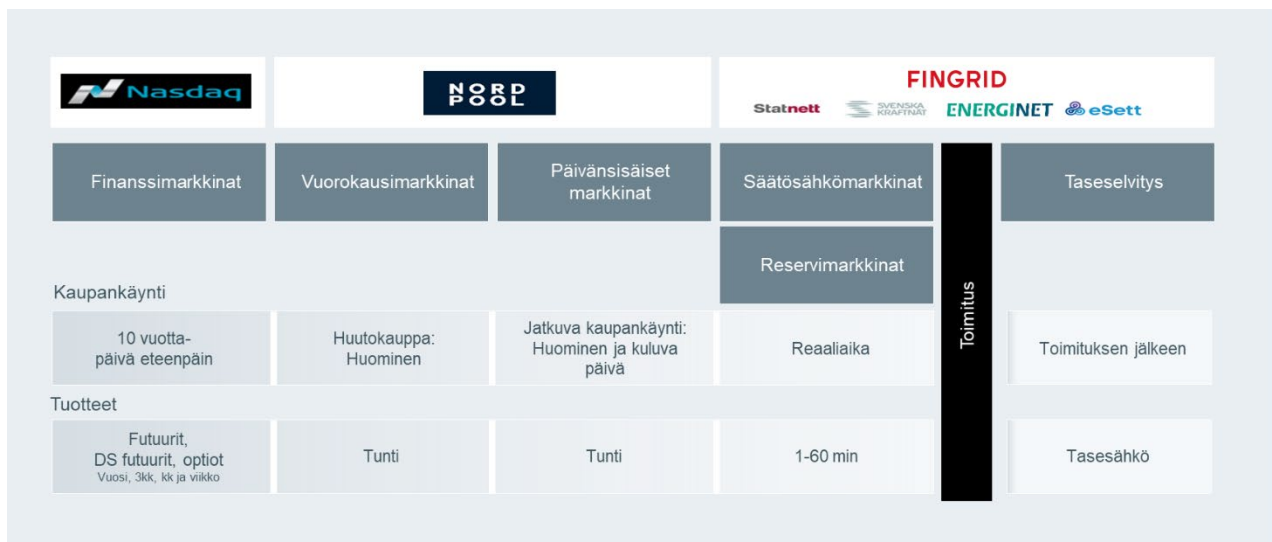
³⁴ <https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2486421/masterthesis.PDF?sequence=1&isAllowed=y>

voi olla mahdollista takamittaroinnin ja esimerkiksi lohkoketjuteknologian avulla. Lisäksi tietyt konseptit ovat ei-maantieteellisesti sidonnaisia energiayhteisöjä, joskin tällöin sähkön fyysinen siirto ei noudata yhteisön rajoja.

Edellä esitetyn kaltaisia lohkoketjuun perustuvia järjestelmiä on pilotoitu pienissä energiayhteisöissä esimerkiksi Yhdysvalloissa ja Saksassa. Tulevaisuudessa nämä energiayhteisöt voisivat mahdollisesti käydä kauppaa myös tukkumarkkinoilla.³⁵ Sähkön vähittäismarkkinoiden keskitetty tiedonvaihtojärjestelmä Datahub tulee virtaviivaistamaan sähkönmyyjän vaihtoa pitkissä sopimuksissa. Lohkoketjuteknologian tapauksessa kehitys tarkoittaa tilanteita, joissa sähkönmyyjä voi vaihtua vielä nopeammin, jopa useita kertoja päivässä. Tal.Markt-markkinapaikka voi mahdollistaa tulevaisuudessa sähkön ostamisen suoraan useilta voimalaitoksilta, esimerkiksi käyttäjän valitsemilta alueellisilta aurinkovoimaloilta ja tuulipuistoista³⁶. Energiayhteisön tuottaja-kuluttajalle tuomien tehokkuushyötyjen ja automatisoidun kaupankäynnin lisäksi kokonaisvaltainen lohkoketju ekosysteemi voisi tuoda kuluttajille muita uusia toiminnollisuuksia, kuten esimerkiksi sähköautojen lataukseen liittyvät tai uusiutuvan energian käyttöön kannustavat kryptovaluutat.³⁷

Sähkömarkkinoiden kaupankäynti

Sähkö on yleinen kaupankäynnin kohteena oleva hyödyke ja suuri osa eurooppalaisista kotitalouksista on sähkönmyyjien laskutuksen piirissä. Eri maiden kantaverkkojen väliset rajajohdot yhdistävät yhä laajempia maantieteellisiä alueita samoille energiemarkkinoille. Vaihtelevan tuotannon ja verkkoon kytketyn tehoelektronikan määrän kasvu järjestelmässä luo haasteita markkinatoimijoille ja järjestelmävastaaville, sillä loppujen lopuksi tuotannon ja kulutuksen tulee joka hetki vastata toisiaan. Sähkön ominaispiirre hyödykkeenä on haasteet sen varastoinnissa.



Kuva 5 Sähkömarkkinoiden nykytila

³⁵ <https://www.engerati.com/energy-retail/article/microgrids/blockchain-microgrids-%E2%80%93-enabler-community-energy-opportunity>

³⁶ <https://www.wsw-talmarkt.de/#/home>

³⁷ <https://exergy.energy/wp-content/uploads/2017/12/Exergy-Whitepaper-v8.pdf>

Kuva 5 sähkömarkkinoiden nykytilasta havainnollistaa sähkön kaupankäynnin useilla eri markkina- paikoilla: pitkän aikavälin suojaussopimuksilla, päivää edeltävillä ja erilaisilla päivänsisäisillä markkinoilla sekä reservimarkkinoilla. Lisäksi sähkön toimituksen jälkeen varmistetaan taseselvi- tyksellä, että markkinatoimijat osallistuvat markkinoille tarjouksiensa mukaan. Eurooppalainen säh- kökauppa ja taseselvitys ovat siirtymässä tunnin aikaikkunasta 15 minuutin tarkkuuteen 2025 men- nessä³⁸. Eri tahot puhuvat lohkoketjun mahdollisuuksista edellä kuvattujen muutoksien vauhditta- misessa, tärkeimpinä vahvuuksina mainitaan usein sähköjärjestelmän reaaliaikaisuus ja osapuolien karsiminen.

Lohkoketjuteknologiakehittäjien konsepteissa markkinatoimijat voivat käydä kauppaa erilaisilla vir- tuaalisilla rahakkeilla eli tokeneilla. Tällöin toimijat voivat lopettaa perinteisten vaihdannan välinei- den käytön tai vain tietyn aikavälein siirtää varoja keskuspankkien takaamassa valuutassa. Rahak- keiden käytön eli vaihdannan tokenisaation tarkoituksena on lisätä markkinapaikan läpinäkyvyyttä ja suoraa vaihdantaa osapuolten välillä. Finanssimarkkinoiden tavoin energiasektori voi hyötyä loh- koketjujen käyttöönotosta transaktiokustannusten laskun myötä.³⁹ Energiasektorin transaktiokus- tannukset muodostuvat fyysisten järjestelmien ylläpidosta ja rahaliikenteen laskuttajien sekä pank- kien vaatimista provisioista. Valuutariskit, takaukset ja liiketoiminnan vaatima vakavaraisuus ovat olennaisimpia kysymyksiä, mikäli esimerkiksi provisioita halutaan minimoida lohkoketjuteknolo- gian avulla. Kokonaisvaltaisemmin nähtynä lohkoketjuilla voitaisiin hallita transaktioiden koko elinkaarta aina hinnanmuodostuksesta selvitykseen ja lopulta maksamiseen asti⁴⁰. Mikäli transak- tiokustannukset vähenevät ja kaupankäynti siirtyy lähemmäksi kulutushetkeä, voidaan muun mu- assa tasesähkön merkityksen nähdä vähenevän. Lohkoketjuteknologiasta huolimatta kaupankäynnin voidaan odottaa lähenevän kulutushetkeä vaihtelevamman tuotannon myötä.

Kaupankäynti vertaisverkossa -kappaleessa esiteltyjen lohkoketjupohjaisten energiayhteisöjen osal- listuminen sähkömarkkinoille voi muuttaa markkinadynamiikkaa ja kuluttajakäyttäytymistä. Ener- giayhteisöillä saattaa olla myös totutusta poikkeavia intressejä. Tällainen intressi voi olla esimer- kiksi kulutetun sähkön tuotanto lähialueella todennetusti. Energiasektorin muutos palveluorientoitu- neemmaksi kauppapaikaksi on toinen trendi, joka muuttaa kaupankäyntiä. Älykkäät laitteet ja ener- gian hankinta kokonaispalveluna voivat muuttaa perinteisten käyttäjien kulutusprofiilia esimerkiksi enemmän tuotannon markkinatilannetta noudattavaksi.

Monet Euroopan suuret energiakauppaa käyvät yhtiöt ovat mukana yhteisiä lohkoketjuteknologialle perustuvia kauppapaikkoja muodostavissa hankkeissa. Esimerkiksi Enerchain-alustalla osapuolet voivat käydä sähkö- ja kaasukauppaa toistensa kanssa mahdollisesti pienemmin kustannuksin. Hankkeessa hyödynnetään nopean transaktion vahvistuksen mahdollistavaa lohkoketjualustaa, joka mahdollistaa kaupankäynnin lähes reaaliaikaisesti.⁴¹ Markkinalla voitaisiin tulevaisuudessa käydä kauppaa myös esimerkiksi futuureilla, vihreillä sertifikaateilla ja alkuperätodistuksilla.⁴² Lohkoket- jualustojen toimittajien lupaamat edut lohkoketjujen käyttöönotosta sähkön vähittäismarkkinoilla voidaan saada muun muassa transaktioiden kokonaiskustannusten laskusta, kustannusten läpinäky- vyyden sekä laskutuksen reaaliaikaisuuden paranemisesta ja kuluttajien toimittajasopimusten valin- nanvapauden kasvusta.⁴³

³⁸ <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/39af0e7c-d408-11e7-a5b9-01aa75ed71a1/language-en>

³⁹ https://cdn.eurelectric.org/media/3114/paper2_blockchain_eurelectric-h-CD3AAA18.pdf

⁴⁰ <https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-overview-of-blockchain-for-energy-and-commodity-trading/%24FILE/ey-overview-of-blockchain-for-energy-and-commodity-trading.pdf>

⁴¹ https://ponton.de/downloads/enerchain/EnerchainKeyInsights_2018-03-29_final.pdf

⁴² <https://www.montelnews.com/en/story/nordic-energy-blockchain-platform-edges-close-to-launch/871745>

⁴³ <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7467408>

Myös Energy Web Foundation luo hyvin vastaavia ratkaisuja omalle lohkoketjunalustalleen. Kolmantena esimerkkinä Elering ja WePower ovat aloittaneet lohkoketjuteknologian pilotointiprojektin energiamarkkinan uudistamiseksi⁴⁴. Lisäksi tärkeää on eri alustojen välinen kommunikaatio sekä näille alustoille rakennettavat liiketoiminnan työkalut. Olennaista on myös arvioida: luodaanko nyt vain erilaisia alustoja, mutta ei toimintoja näiden päälle? Energiemarkkinoiden ominaispiirteet luovat lohkoketjuteknologian soveltamiseen rajoitteita, joita esimerkiksi kryptovaluutoiden transaktioissa ei esiinny. Energiemarkkinan kaupan toteutumisen saattaa estää esimerkiksi siirtokapasiteetissa oleva pullonkaula tai tehotasapainosta syntyvä rajoite. Sähkön fysikaalinen luonne tulee säilymään energiamarkkinoilla, vaikka ne toimisivat lohkoketjuteknologialla.

Tehotasapainon hallinta

Sähkömarkkinoiden kaupankäynti -kappaleessa kuvattu sähköjärjestelmän tasapainottaminen tulee tulevaisuudessa vaatimaan sähkön tuottajilta, käyttäjiltä ja siirtäjiltä entistä enemmän joustavuutta. Lohkoketjuteknologian voidaan nähdä mahdollistavan jousto- ja reservimarkkinoiden toiminnan tehostamista. Erimerkkinä tästä on jo älykkäiden laitteiden kohdalla kuvattu lohkoketjupohjainen joustoa mahdollistava automaattinen kaupankäynti. Suomessa lyhyen aikavälin tehotasapainoa ylläpidetään kantaverkkoyhtiö Fingridin ylläpitämällä markkinapaikoilla⁴⁵. Säätosähkömarkkinat ovat siirtymässä yhä nopeampaan reaktioaikaan ja markkinoille voi osallistua yhä pienempien kuormien ja tuotantolaitosten avulla. Erilaiset aggregointihankkeet sekä virtuaalivoimalat alkavat olla arkipäivää markkinoilla. Säätosähkömarkkinoiden joustavien resurssien arvo saattaa myös nousta, mikäli tuotanto on yhä säästä riippuvampaa ja kulutus vaihtelevampaa. Lohkoketjuteknologian visioidaan pienentävän markkinoille osallistumiseen liittyviä kustannuksia ja täten madaltavan osallistumiseen liittyvää kynnystä.

Tehotasapainoa voidaan hallita monella tasolla. Tämän hetken matalimman tason ratkaisut koostuvat aggregoiduista tuottaja-kuluttajista. Esimerkiksi TenneT Holding B.V. ja Sonnen GmbH testavat lohkoketjuteknologiaa pientuotantoa ja sähkövarastoja yhdistävässä pilotissaan.⁴⁶ Myös Energy Web Foundationin D3A-hankeessa on tarkoitus kehittää vastaavaa joustomarkkina-alustaa lähitulevaisuudessa⁴⁷. Suuremmassa mittakaavassa lohkoketjuteknologiaa sovellettaisiin Gridchain-hankeessa, jossa useat Itävaltalaiset jakeluverkon haltijat aikovat kokeilla lohkoketjupohjaista kommunikaatiota energiayhteisöjen ja siirtoverkkojen kanssa⁴⁸. Hankkeen tavoitteena on tutkia verkkorasituksen vähentämisen mahdollisuuksia kysyntäjoustop ja verkkoon takaisinsyötön kautta. Lisäksi toisena tavoitteena on lisätä markkinatoimijoiden suunniteltujen tehonhallintapäätösten läpinäkyvyyttä julkaisemalla ne markkinapaikalle aiemmin. Tavoitteena on vähentää esimerkiksi moninkertaisista säästöistä johtuvia ylikorjauksia. Myös Saksan energiapolitiikasta vastaava ministeriö on aloittanut lohkoketjuun perustuvan markkina-alustaan liittyvän selvitystyön ETIBLOGG-hankkeen alaisuudessa⁴⁹.

⁴⁴ <https://medium.com/wepower/wepower-in-partnership-with-elering-is-launching-a-pilot-project-to-tokenize-estonian-energy-7bb929eed5c>

⁴⁵ <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservilajit>

⁴⁶ https://www.tennet.eu/fileadmin/user_upload/Company/News/German/Hoerchens/2017/20171102_PM-Start-Block-chain-Projekt-TenneT-sonnen_EN.pdf

⁴⁷ <https://energyweb.org/d3a/>

⁴⁸ <https://enerchain.ponton.de/index.php/16-gridchain-blockchain-based-process-integration-for-the-smart-grids-of-the-future>

⁴⁹ https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Standardartikel/SmartServiceWelt2Projekte/projekte_ETIBLOGG.html

Yleisesti katsotaan, että korkean volatiliteetin sähkömarkkinoilla on yhä suurempi tarve luoda nopeampia järjestelmiä vähentämään aikasidonnaisia alueellisia pullonkauloja sähkön siirtoon ja jakeiluun liittyen. Lohkoketjuteknologian tekniset ominaisuudet, kuten varmennusnopeus, eivät välttämättä riitä tehotasapainon ylläpitoon osallistuville toimijoille tai liiketoimintamalli voi osoittautua taloudellisesti kannattamattomaksi. Toisaalta osa toimijoista kehittää hyvinkin aktiivisesti lohkoketjuteknologiaan pohjautuvia alustoja. Edellä mainittu ristiriita teknologiavalintojen välillä on erityisen hyvin havaittavissa nimenomaan säätösähkömarkkinoille kehitettävissä ratkaisuissa. Esimerkiksi Nord Pool AS:n hanke ”NODES”⁵⁰ ja PONTON GmbH:n alusta ”Gridchain”⁵¹ liittyvät molemmat tehotasapainon hallintaan. NODES ei toistaiseksi mainitse käyttävänsä lohkoketjuteknologiaa. Gridchain on taas lohkoketjuteknologialla toimiva markkinaratkaisu. Lohkoketjuteknologian ja muiden ratkaisujen soveltuvuus säätösähkömarkkinoille tulee tarkentumaan pilottien tulosten julkistamisen jälkeen.

Uusiutuvien energialähteiden käytön edistäminen

Uusiutuvien energiamuotojen lisääntynyt käyttö on teknologisen kehityksen ohella mahdollistettu myös vahvalla tukipolitiikalla. Ilmastomuutoksen ja paikallisten ympäristöongelmien hillitsemiseksi lähes kaikki maailman valtiot panostavat uusiutuviin energialähteisiin investointituilla, erilaisilla premiojärjestelmillä sekä alkuperäkiintiöillä koskien käytettyä loppuenergiaa. Useat hankkeista ovat myös kansainvälisiä.

Sähkön alkuperätakuut ovat sertifikaatteja, joiden avulla varmennetaan, että sähkö on tuotettu uusiutuvista energialähteistä tai tehokkaalla yhteistuotannolla. Alkuperätakuiden järjestelmästä vastaa Suomessa Fingrid Oyj:n tytäryhtiö Finextra Oy. Suomen nykyisessä mallissa alkuperätakuisiin oikeutetut tuottajat tai näitä kokoavat aggregaattorit toimittavat kuukauden tuntien tuotantotiedot Fingridille. Tuotantolaitokseksi rekisteröityminen edellyttää voimalaitoksen todentamista ja Finextra myöntää tuotannolle alkuperätakuut sähköisessä rekisterissä. Alkuperätakuun rekisteristä on rajapinta eurooppalaisen keskus-hubiin, jota ylläpitää Association of Issuing Bodies (AIB)⁵². Tällöin alkuperätakuuta voidaan siirtää AIB:n jäsenten välillä sähköisesti. Nykyhetken lainopillinen perustelu löytyy alkuperätakuulaista 1 a §, 2 §⁵³.

Lohkoketjun on visioitu olevan sähköntuotannon alkuperätakuujärjestelmiä uudistava teknologia. Alkuperätakuiden myöntäminen, vaihdanta ja mitätöinti on kuvattu esimerkiksi Energy Web Foundationin EW Origin –tuotteessa järjestön ”virstanpylväsprojektina” lohkoketjuteknologioihin liittyen. Yleisesti ottaen lohkoketjuteknologioiden kehitys ja markkinointi perustuvat toistaiseksi toteuttavien pilottien ja kokeellisten hankkeiden tulosten varaan.

Lohkoketjuteknologian kaltaisen tiedonvaihtotavan ja samanaikaisesti markkinapaikan käyttöönoton kannattavuutta arvioitavia näkökulmia ovat uuteen järjestelmään liittyvät mahdolliset kustannussäästöt, tekniikan toimivuus, toimijoiden tietoturva sekä markkinoiden hyväksyntä ratkaisulle. Kansainvälisesti alkuperätakuiden kannalta olennaisimmat haasteet liittyvät pienten toimijoiden kokeisiin kustannuskynnyksiin, laajan markkinapaikan puutteeseen sekä toiminnan viiveisiin. Alla esitelty Energy Web Foundation –järjestön EW Origin –järjestelmä lupaa virtaviivaistaa nykyistä

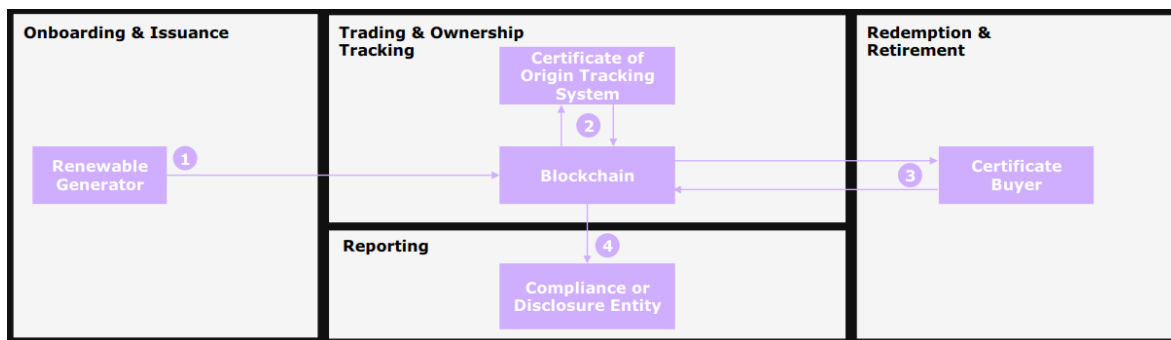
⁵⁰ <https://www.nordpoolgroup.com/message-center-container/newsroom/exchange-message-list/2018/q1/new-company-established-to-develop-energy-market-of-the-future/>

⁵¹ <https://enerchain.ponton.de/>

⁵² <https://www.aib-net.org/>

⁵³ <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2003/20031129>

järjestelmää sekä erityisesti tuoda nykyisen järjestelmän vaihdannan lähemmäs käyttöhetkeä. Useiden muiden ratkaisujen tavoin EW Origin automatisoi alkuperätakuujärjestelmän vaiheita ja manuaalisia prosesseja lohkoketjun avulla, joskin nykyiset järjestelmät ovat myös pitkälti automatisoituja.



Kuva 6 EW Origin –alkuperätakuujärjestelmä ⁵⁴

Jo käytössä olevien järjestelmien tavoin myös lohkoketjupohjaisissa järjestelmissä mittaus tulee suorittaa hyväksytyin mittarein. Lisäksi tuottajien on liityttävä suljettuun lohkoketjuun sekä mahdollisesti osallistuttava myös sen ylläpitoon. Alkuperätakuuta voidaan vaihtaa lohkoketjussa tokenneilla, jotka vastaavat nykyistä alkuperätakuun sertifikaattia.

Myös erilaisia pienempiä, esimerkiksi aiemmin kuvattuja energiayhteisön sisäisiä rahakepohjaisia uusiutuvan energian P2P-kauppapaikkoja voidaan pitää uusiutuvan energian käyttöä edistävänä järjestelmänä. Lisäksi lohkoketjujen on nähty mahdollisesti soveltuvan myös päästökauppajärjestelmän tai uusiutuvan energian hankkeiden joukkorahoituksen toteuttamiseen.

⁵⁴ <https://energyweb.org/origin/>

3 Käynnissä olevat lohkoketjuhankkeet energiasektorilla

Viime vuosina energia-alalle on perustettu paljon uusia yrityksiä ja yhteistoiminnallisia hankkeita. Solar Plaza on kerännyt tietoa 65:stä energia-alalla lohkoketjusovelluksia käyttävästä tai kehittävästä hankkeesta. Näistä suuri osa sijoittuu Eurooppaan, suurimpien yksittäisten maiden ollessa Saksa, Yhdysvallat ja Alankomaat. Yleisimmin lohkoketjusovellukset liittyvät P2P-energiakauppaan. Noin joka neljännessä kaikista hankkeista on suunniteltu tai suoritettu oman virtuaalivaluutan tai rahakkeen liikkeellelasku, joka toimii myös usein hankkeen rahoituskeinona.⁵⁵ Kansainvälisesti energia-alan investoinnit lohkoketjuteknologiaan ovat nousseet paljon viimeisen kahden vuoden aikana ja vuoden 2017 toisen neljänneksen ja vuoden 2018 ensimmäisen neljänneksen välisenä aikana investoinnit ovat GreenTechMedian mukaan yli 250 miljoonaa euroa. Summasta noin kolme neljäsosaa muodostuu virtuaalivaluutoiden ja rahakkeiden liikkeellelaskusta.⁵⁶ Saksalaisen Trend Researchin kyselytutkimuksen mukaan 80 prosenttia kyselyyn osallistuneista energia-alan yrityksistä on suunnitellut tai valmistellut lohkoketjupohjaisia ratkaisuja. Hankkeet liittyivät muun muassa hajautettuun tuotantoon, sähköautoiluun, vähittäismyyntiin, uusiutuvan energian alkuperätodistuksiin, verkonhallintaan ja laskutukseen.⁵⁷

Suomessa energiasektorilla kiinnostusta lohkoketjuteknologioita kohtaan ovat julkisesti esittäneet esimerkiksi Fortum ja Lumo Energia⁵⁸. Fortum on muun muassa yhdessä ETLAn kanssa tutkinut hajautettua vertaisverkossa toimivaa vähittäismarkkina-alustaa⁵⁹, sekä muiden eurooppalaisten energia-alan yhtiöiden kanssa ollut mukana lohkoketjuun perustuvia sähköautojen latausjärjestelmiä pilotoivassa Share&Charge-hankkeessa⁶⁰. ETLAn kanssa yhteistyönä toteutettu tutkimus on osa suomalaista lohkoketjuteknologian kehitystä ajavaa Business Finlandin rahoittamaa Blockchains Boosting Finnish industry (BOND) –hanketta⁶¹, jossa on mukana suomalaisia tutkimusorganisaatioita ja eri alojen yrityksiä. On kuitenkin huomattava, että suomalaisten referenssihankkeiden alhaiseen määrään vaikuttaa se, ettei kaikkia yritysten kehityshankkeita tuoda julkisuuteen vielä kehitysvaiheessa. Lisäksi pohjoismaisten markkinoiden ja siirtoverkkojen toimivuus sekä hajautetun tuotannon suhteellisen pieni määrä eivät välttämättä luo samanlaista kannustinta kehittää esimerkiksi P2P-kaupankäyntialustoja, joita on kehitteillä muun muassa Australiassa ja Saksassa. Seuraavalla sivulla olevaan taulukkoon 2 on kerätty esimerkkejä energia-alalla lohkoketjuja hyödyntävistä hankkeista ja yrityksistä. Useat toimijoista kehittävät kokonaisvaltaisia alustoja, mutta esimerkkinä ne on mainittu vain yhden näkökulman kohdalla.

⁵⁵ <http://ipci.io/wp-content/uploads/2017/12/Energy-Blockchain-Report.compressed.pdf>

⁵⁶ <https://www.greentechmedia.com/articles/read/energy-blockchain-startups-raised-324-million-since-2017>

⁵⁷ <https://www.reuters.com/article/us-energy-germany-blockchain/utilities-step-into-blockchain-to-stay-ahead-of-europes-energy-shakeup-idUSKBN1GZ1I2>

⁵⁸ <https://www.lumoenergia.fi/artikkelit/lumo-energia-kehittaa-energia-alalle-blockchain-teknologiaa/>

⁵⁹ <https://www.etla.fi/wp-content/uploads/ETLA-Raportit-Reports-71.pdf>

⁶⁰ <https://shareandcharge.com/>

⁶¹ <https://www.vtt.fi/sites/BOND/partners>

Näkökulma	Mahdollinen hyöty	Esimerkki
Kyberturvallisuus	<ul style="list-style-type: none"> Parannus energia-alan tietojärjestelmien hallintaan ja tietoturvaan. 	<ul style="list-style-type: none"> Guardtime KSI ⁶²
Älykkäät laitteet	<ul style="list-style-type: none"> Hajautettujen energiaressurssien käyttöasteen parantaminen Automaattinen kysyntäjousto 	<ul style="list-style-type: none"> IOTA ⁶³ ADEPT ⁶⁴ GRID+ ⁶⁵
Vertaisverkot	<ul style="list-style-type: none"> Hajautettujen energiaressurssien kustannustehokkuuden parantaminen Energiapalveluiden monipuolistuminen 	<ul style="list-style-type: none"> SolarCoin ⁶⁶ PowerLedger ⁶⁷ Bovlabs ⁶⁸
Sähkömarkkinoiden kaupankäynti	<ul style="list-style-type: none"> Kaupankäyntikustannusten minimoiminen Läpinäkyvä laskutusmalli ja asiakaskeinen markkina 	<ul style="list-style-type: none"> Grid Singularity ⁶⁹ Enerchain ⁷⁰ D3A ⁷¹
Tehotasapainon hallinta	<ul style="list-style-type: none"> Siirtoverkkojen tehotasapainon hallinnan ylläpitäminen ja kustannustehokkuus 	<ul style="list-style-type: none"> GRIDCHAIN ⁷² TenneT & Sonnen ⁷³ ETIBLOGG ⁷⁴
Uusiutuvien energialähteiden käyttö	<ul style="list-style-type: none"> Uusiutuvaan energiaan liittyvien markkinoiden läpinäkyvyyden ja tehokkuuden parantaminen. 	<ul style="list-style-type: none"> NRGcoin ⁷⁵ EW Origin ⁷⁶ WePower ⁷⁷

⁶² <https://guardtime.com/technology>

⁶³ <https://www.iota.org/>

⁶⁴ <https://www-935.ibm.com/services/multimedia/GBE03662USEN.pdf>

⁶⁵ <https://gridplus.io/>

⁶⁶ <https://solarcoin.org/en/node/6>

⁶⁷ <https://powerledger.io/>

⁶⁸ <http://www.bovlabs.com/>

⁶⁹ <https://gridsingularity.com/>

⁷⁰ <https://enerchain.ponton.de/>

⁷¹ <https://energyweb.org/d3a/>

⁷² <https://enerchain.ponton.de/index.php/16-gridchain-blockchain-based-process-integration-for-the-smart-grids-of-the-future>

⁷³ <https://www.tennet.eu/news/detail/europes-first-blockchain-project-to-stabilize-the-power-grid-launches-tennet-and-sonnen-expect-res/>

⁷⁴ https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Standardartikel/SmartServiceWelt2Projekte/projekte_ETIBLOGG.html

⁷⁵ <https://www.nrgcoin.org/>

⁷⁶ <https://energyweb.org/origin/>

⁷⁷ <https://wepower.network/#>

4 Mitä lohkoketjuteknologian hyödyntäminen edellyttää?

Finanssisektorin edelläkävijäasema lohkoketjuteknologian hyödyntämisessä edistää myös muiden alojen lohkoketjuosaamista ja niiden käyttöönottoa. Kuitenkin lohkoketjujen täysimittaiseen hyödyntämiseen niin finanssisektorilla kuin muillakin sektoreilla on vielä vuosia matkaa. Lohkoketjujen ja esineiden internetin kehitys nähdään energia-alalla yhtenä merkittävimpänä muutosajurina tulevaisuuden kannalta, vaikka siihen liittyy erittäin paljon epävarmuuksia. Lohkoketjun hyödyntämistä energia-alalla on kartoitettu esimerkiksi Maailman energianeuvoston loppuvuodesta 2017 julkaistussa selvityksessä⁷⁸. Tämän mukaan suurimpia esteitä lohkoketjujen täysimittaiselle hyödyntämiselle energia-alalla tällä hetkellä ovat sääntelyyn liittyvät kysymykset, tietotaidon puuttuminen ja lohkoketjuteknologian nykyiset tekniset rajoitteet. Kuitenkin 87 prosenttia vastaajista näki lohkoketjujen käyttöönoton ajoittuvan seuraavan viiden vuoden sisälle.

Teknologiset vaatimukset – esimerkki älymittauksesta

Lohkoketjuteknologian käyttöönotto energia-alalla on aluillaan ja suurin osa hankkeista on vasta tutkimus- tai pilotointivaiheessa. Keskenäisyyden myötä myös lohkoketjujen käyttöönottoon liittyvät tietotekniset ohjelmistoratkaisut ovat pääosin vasta kehitteillä. Lisäksi lohkoketjuteknologian käyttöönoton myötä myös fyysisiltä laitteilta voidaan tarvita enemmän ominaisuuksia. Näitä teknologisia vaatimuksia voidaan tunnistaa lohkoketjujen hyödyntämiselle esimerkiksi IoT-laitteissa. Tässä kappaleessa esimerkkinä käytetään aiemmin kuvattua lohkoketjuun perustuvaa älymittariesimerkkiä⁷⁹, jota myös seuraavan sivun kuva 7 esittää.

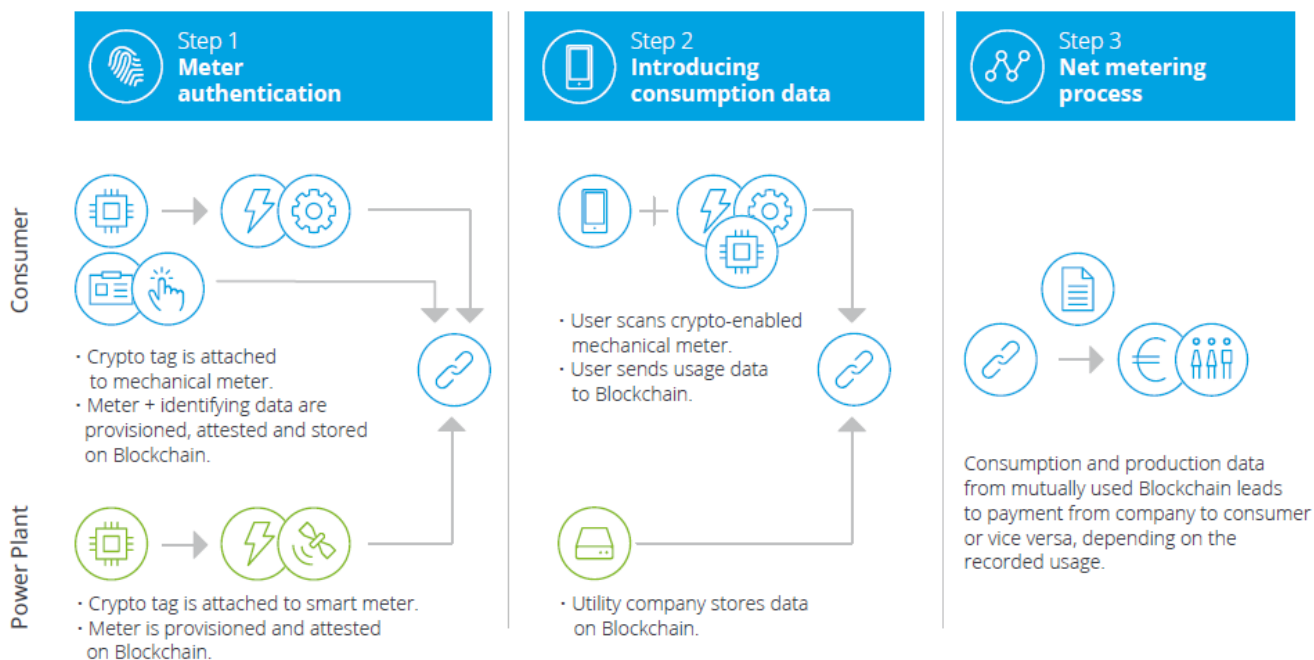
Kuvan 7 esimerkissä kuvataan kuinka yleisten mekaanisten mittarien luenta voisi helpottaa lohkoketjuteknologialla. Pohjoismaissa kotien etäluettavat digitaaliset sähkömittarit ovat arkipäivää ja teoreettisesti myös ne voisivat tulevaisuudessa sisältää itsessään mahdollisuuden toimia lohkoketjuteknologian avulla. Lisäksi energiayhteisöjen takamittarointi tai mittarit joissa käyttäjä vaihtuu usein, kuten sähköautojen latauspisteet, voivat mahdollisesti hyötyä lohkoketjuteknologian soveltamisesta. Älymittarin tai käyttäjän tulee pystyä tunnistautumaan lohkoketjuun luotettavasti ja tietoturvasuosin. Tämä voisi tapahtua esimerkiksi käyttäen NFC-, RFID- tai lohkoketjuteknologian avaimiin perustuvaa tunnistautumista, jolla käyttäjä pystyy todentamaan oman fyysisen henkilöllisyytensä esimerkiksi puhelimellaan. Tunnistauduttuaan käyttäjällä on oikeus päästä käsiksi lohkoketjun sisältämään dataan, johon myös kyseisen mittarin käyttöoikeus on tallennettuna. Mittarin koskemattomuus on turvattu esimerkiksi kryptografisesti suojatulla lohkoketjuun liitettyllä fyysisellä tunnisteella, jota ei voida poistaa mittarista. Tunniste takaa mittarin tiedon oikeellisuuden ja läpinäkyvyyden. Lohkoketjun toimintaan liittyvin operaatioihin mittari tarvitsee jonkinlaisen laskentayksikön. Tällainen voisi olla lohkoketjuteknologiaan optimoitu kevyt ja pienen energiankulutuksen omaava yksikkö (Application-Specific Integrated Circuit), joka lähettää mittaustietoa lohkoketjuun sekä hoitaa lohkoketjun validointiin liittyvät laskentatoiminnot.⁷⁹ Tulevaisuudessa mittaridataa saatetaan siirtää ja säilöä edelleen ilman lohkoketjuteknologiaa, kustannustehokkuudesta tai teknologisista reunaehdoista johtuen. Lohkoketjuteknologia voi kuitenkin mahdollistaa järjestelmien tietokantojen rajapintojen käytön valtuutuksen helpommin ja täten tehostaa energia-alan toimintaa⁸⁰.

⁷⁸ https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/11/Full-White-paper_the-developing-role-of-blockchain.pdf

⁷⁹ <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/Innovation/IoT-powered-by-Blockchain-Deloitte.pdf>

⁸⁰ <https://en.energinet.dk/About-our-news/News/2018/03/13/Electricity-consumers-should-be-able-to-swipe-their-way-to-the-green-transition>

Yhteyden internettiin älymittari voi ottaa itse tai jonkin muun laitteen kautta. Erilaisia yhteysvaihtoehtoja ovat esimerkiksi matkapuhelinverkkoyhteys, WiFi-yhteys ja LPWAN-yhteydet. Vaihtoehtojen välillä käyttötapauskohtainen valinta tapahtuu tekijöiden, kuten hinnan, kantaman, energian kulutuksen ja tiedonsiirtonopeuden määrittelemänä.⁸¹ Järjestelmän helpon ja tehokkaan käytön kannalta tärkeää olisi myös helppokäyttöinen rajapinta, josta tiedot kulutuksesta, älykkäistä sopimuksista ja maksuista ovat käyttäjälle helposti saatavilla.⁷⁹



Kuva 7 Sähkön mittarointi lohkoketjuteknologian avulla⁷⁹

Myös valittavan lohkoketjun tulee olla käyttötarkoitukseen sopiva. Suunnittelussa otettava huomioon järjestelmän tarpeet ja rajoitteet esimerkiksi yksityisyyden ja tietoturvan, transaktioiden koon, vahvistamisnopeuden, hinnan sekä järjestelmään liitettyjen laitteiden määrän ja luonteen osalta. Tässä merkittävässä asemassa on lohkoketjun käyttämä konsensusprotokolla. Lisäksi muita älykkääseen mittaamiseen tarvittavia ominaisuuksia olisivat avoimuus verkon jäsenille ja älykkäiden sopimusten hyödyntämismahdollisuus.⁷⁹

Lohkoketjuteknologian soveltaminen esimerkiksi sähkömittareiden kyberturvallisuuden parantamiseksi sisältää huomattavia teknologisia haasteita. Esimerkiksi koko Suomen mittarikannan päivittäminen, esimerkiksi kuormanohjausta suorittavaksi on pitkä ja kallis prosessi.⁸² Samat kustannushaasteet liittyvät lohkoketjuteknologian hyödyntämiseen mittaritasolla. Älymittareiden ja lohkoketjuteknologian yhdistämisen järkevyyden riippuu lohkoketjuteknologian toimivuuden lisäksi esimerkiksi siitä missä kohtaa sähkön toimitusketjua tietoa siirretään lohkoketjuun? Voi olla, että teknisesti helpointa ja kustannustehokkainta on hyödyntää jo olemassa olevaa jakeluverkkojen operaattoreilta tai tulevaisuudessa Datahubista saatavaa tietoa lohkoketjun ylläpitoon. Toisaalta keskitetyt ratkaisut muuttavat käyttäjien mielenkiintoa tai järjestelmien tietoturvaa tavoilla, joita on vaikea arvioida.

⁸¹ <https://www.mckinsey.com/featured-insights/internet-of-things/our-insights/the-future-of-connectivity-enabling-the-internet-of-things>

⁸² <https://tem.fi/documents/1410877/3481825/AMR+2.0+loppuraportti+15.12.2017/6a2df7e6-a963-40c0-b4d8-d2533fbc488/AMR+2.0+loppuraportti+15.12.2017.pdf>

Lohkoketjujen skaalautuvuus

Itse lohkoketjuteknologian nykyiset tekniset rajoitteet liittyvät eri sovelluksissa jo aiemmin mainittuihin ongelmiin, kuten lohkoketjun konsensusprotokollan nopeuteen, tarvittavan laskentatehon ja tallennustilan määrään sekä tietosuojaan. Esimerkiksi vuonna 2017 suurella eurooppalaisella energian EEX-markkinapaikalla (European Energy Exchange AG), käytiin kauppaa energiatuotteilla lähes 3800 terawattitunnin edestä. Mikäli jokainen tapahtuma olisi ollut kooltaan yhden megawattitunnin kokoinen olisi tämä tarkoittanut noin 120 transaktiota sekunnissa koko vuoden ajan.⁸³ Esimerkiksi kryptovaluutta bitcoinin tapauksessa tämä laskennallinen nopeus on monta kertaa suurempi kuin nykymuotoisen bitcoinin lohkoketjuteknologian maksiminopeus⁸⁴. Nykyiset energiamarkkinat toimivat isoilla kerrannaisyksiköillä. Energian spot-kauppaa käydään tyypillisesti minimissään 0,1 MWh:n sopimuksin, tehomarkkinat tarvitsevat megawattien edestä nopeaa säätövoimaa sekä alkuperätakuuta myönnetään megawattitunneissa. Pienten toimijoiden osallistumisen mahdollistaminen markkinoille tarkoittaa, että vaihdannan tulee tapahtua myös pienemmillä yksiköillä ja rahasummilla. Jos EEX-markkinapaikan kaikki transaktiot olisivat 1 kWh suuruisia, tulisi transaktioita 120 000 kappaletta sekunnissa vuoden 2017 volyymeilla.

Lohkoketjussa yksi lohko sisältää tyypillisesti useita transaktioita. Vaihdannassa transaktioiden laskennallista nopeutta vielä tärkeämpi ominaisuus on transaktioiden keskimääräinen hyväksymisaika. Bitcoin-järjestelmässä pyrkimyksenä on kymmenen minuutin keskimääräinen hyväksymisaika. Kuitenkin useiden sekuntien tai jopa minuuttien pituinen hyväksymisaika on liian pitkä monilla markkinapaikoilla. Energia-alan markkinapaikat ja ohjausjärjestelmät toteutetaan teknologisten reunaehtojen määrittelemässä kustannustehokkaassa mittakaavassa. Tarve yhä lyhyemmille selvitysjaksoille tai selvityksestä seuraaville toimenpiteille, kuten esimerkiksi kysyntäjoustolle, vaatii uudenlaista ajattelua suunniteltaessa energijärjestelmiä. Nykyinen lohkoketjuteknologia tai keskitetyt tietokantaratkaisut eivät skaalaudu loputtomiin ja pienempiä toimijoita aggregoidaan markkinoille eri tavoin. Esimerkiksi WePowerin nykyinen Ethereum-lohkoketjuratekaisu ei tule skaalautumaan riittävästi ja he tulevat pilotoimaan uusia lohkoketjuteknologioita Viron kantaverkkoyhtiön kanssa⁸⁵.

Lohkoketjuteknologian skaalautuvuusongelmiin on esitetty monia erilaisia ratkaisuja, kuten esimerkiksi uudenlaisia konsensusprotokollia ja eri tasoihin jaettuja tietorakenteita. Tasoihin jaetut tietorakenteet mahdollistavat esimerkiksi ratkaisut joissa tietokannan yhtä tasoa käytetään nopeana markkinapaikkana ja varsinainen transaktiohistoria tallennetaan pääketjuun. Tällöin ketjun ei tarvitse sisältää ja todentaa koko tietokantaa kerralla. Toisaalta myös alueelliset toimijat voisivat ylläpitää omaa pienempää ketjua ja tietyin väliajoin alaketju vaihtaa tietoa pääketjun kanssa. Sähköjärjestelmien tapauksessa yksi taso voi sisältää esimerkiksi siirto- ja jakeluverkon infrastruktuurin rakenteen, joka itsessään kiinnostaa kolmansia osapuolia.

Lohkoketjuteknologia kilpailee muiden tiedonvaihtoratkaisujen kanssa. Vakiintuneet pitkälle kehitetyt keskitetyt järjestelmät koetaan luotettavaksi ja ne tuovat mittakaavaetuja. Esimerkiksi lähitulevaisuudessa Suomen sähkömarkkinoiden tiedonvaihtoyksikkö datahub tulee suorittamaan keskitetyllä arkkitehtuurilla osan tässä selvitystyössä kuvatuista toiminnoista⁸⁶. Suurimpina haasteina lohkoketjujen käyttöönoton kannattavuuden arvioinnissa on lohkoketjuteknologian keskeneräinen ke-

⁸³ <https://www.eex.com/en/about/newsroom/news-detail/2017--eex-group-achieves-double-digit-growth-in-natural-gas-emissions-and-agriculturals/78336>

⁸⁴ https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-662-53357-4_8

⁸⁵ <https://medium.com/wepower/wepower-in-partnership-with-elering-is-launching-a-pilot-project-to-tokenize-estonian-energy-7bb929eed5c>

⁸⁶ <https://www.fingrid.fi/palvelut/vahittaismarkkinoiden-tiedonvaihto/datahub/>

hityksaste ja luottamushaasteet. Edellä kuvatut lupaukset toiminnan läpinäkyvyydestä, reaaliaikaisuudesta ja matalista transaktiokustannuksista ovat vielä pitkälti todentamatta, tulokset piloteista tulevat olemaan olennaisessa osassa tehdessä kannattavuusarvota.

Lohkoketjuteknologia nykyisessä sääntely-ympäristössä

Lohkoketjuun perustuvien markkinoilla olevien hankkeiden alhaisen määrän sekä lohkoketjun mahdollistamien uudenlaisten toimintatapojen myötä lohkoketjujen suhde nykyiseen sääntelyyn on vielä monilta osin epäselvä. Tässä kappaleessa on nostettu esiin joitakin lohkoketjujen sääntelyyn liittyviä kysymyksiä yleisellä tasolla. Esimerkiksi lohkoketjujen anonyymin tai pseudonyymin luonteen vuoksi lohkoketjutoimijoiden vastuiden määrittely ei ole suoraviivaista. Vastuiden määrittelemättömyydestä nousee esiin erilaisia kysymyksiä: kuka on vastuussa, kun lohkoketjussa tapahtuu tietoturvaluoto, älysovimuksessa tapahtuu häiriö tai lohkoketju aiheuttaa ylikuormituksen tai hintapiikin sähköjärjestelmässä?⁸⁷ Pohdittavana on myös esimerkiksi lakiin perustuvien laskutukseen ja maksamiseen liittyvien velvoitteiden täyttö ja mittauslaitteiden sääntely lohkoketjuun perustuvilla kaupankäyntialustoilla. Pidemmälle edenneessä hajautetussa mallissa viranomaisille tulisi vastaan myös sähkömarkkinoiden toimijoiden roolien perusteellisempaa uudelleen määrittelyä. Toisaalta tiettyjen lohkoketjuratkaisujen voidaan nähdä joissakin yrityksissä mahdollisuutena esimerkiksi Euroopan unionin yleisen tietosuoja-asetuksen (GDPR) vaatimusten täyttämiseen yrityksissä⁸⁸. Kuitenkin esimerkiksi joitakin Ethereum-pohjaisia palveluita on jouduttu sulkemaan yleisen tietosuoja-asetuksen käyttöönoton myötä.⁸⁹

Sähköverkoissa uusiutuvan energian, kaksisuuntaisen kulutuksen, hajautetun tuotannon lisääntymisen ja lohkoketjujen käyttöönotto voisi vaatia muutoksia esimerkiksi sähköön toimitusvarmuuden ylläpitoon. Vaikka hajautetumpi toimintaympäristö voisikin mahdollisesti parantaa toimitusvarmuutta keskitettyyn järjestelmään nähden, erityisesti häiriötilanteessa hajautetut organisaatiot ja roolien muutokset asettavat haasteen vastuiden asettamisessa sähköjärjestelmässä.⁹⁰ Myös sähköön toimitusvelvollisuuden sääntelyä tulee harkita erilaisten markkinamuutosten myötä⁹¹.

Elinkeinoelämän tutkimuslaitos on tutkinut älykkäiden sopimusten suhdetta oikeusjärjestelmään⁹². Oikeudelliselta kannalta erityiseksi kysymykseksi nousee älykkäiden sopimusten juridinen status. Älysovimusten käyttökohteita on lukemattomia määriä. Osassa tapauksista on selvää, ettei sopimuksen tunnusmerkit tule täyttymään, kun toisaalta osa sovelluksista tulee todennäköisesti täyttämään sopimuksen kriteerit jo nykyilainsäädännössä. Ongelmaksi muodostuvat tähän väliin sijoittuvat tapaukset, joiden juridinen sitovuus on vaikeampi määrittellä. Tällöin esille nousee kysymys, että kuka määrittelee näiden sopimusten juridisen pätevyyden? Sääntely onkin yksi keskeinen tekijä uusien innovaatioiden käyttöönotossa. Esimerkkinä ovat erilaiset kyytipalvelualustoja tuottavat yritykset, jotka loivat paineita sääntelyn muuttamiselle taksitoiminnassa. Viranomaisten tulisikin ETLAn selvityksen mukaan perehtyä lohkoketjuteknologiaan ja sen vaikutuksiin mahdollisimman pian.⁹³ Siirryttäessä lohkoketjuteknologiaan tulee suunnittelevien osapuolien huomioida muutosprosessin aikana kaikki sidosryhmät.

⁸⁷ https://cdn.eurelectric.org/media/3114/paper2_blockchain_eurelectric-h-CD3AAA18.pdf

⁸⁸ <https://www.cgi.com/sites/default/files/white-papers/cgi-blockchain-in-energy-sector-white-paper.pdf>

⁸⁹ <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-03-22/is-your-blockchain-business-doomed>

⁹⁰ <https://conference.aau.at/event/95/material/6/1.pdf>

⁹¹ <https://www.energiavirasto.fi/toimitusvelvollisuus>

⁹² <https://www.etla.fi/wp-content/uploads/ETLA-Raportit-Reports-57.pdf>

⁹³ <https://www.etla.fi/wp-content/uploads/ETLA-Raportit-Reports-57.pdf>

Taloudellinen näkökulma

Muiden tietokantojen tavoin lohkoketjujen käyttöönotosta koituu hankintakustannuksia ja käytön aikana ylläpitokustannuksia. Lohkoketjuteknologian taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttaa toimialakohtaiset erot, kuten esimerkiksi alan vakiintuneet käytännöt. Tästä syystä lohkoketjuteknologialla voi olla parempi kannattavuus kohteissa, joissa järjestelmät eivät ole vielä vakiintuneita. Esimerkiksi lohkoketjun käyttöönoton voidaan nähdä olevan selvästi helpompaa perustettaessa uutta sähköautojen lautauksen käyttöliittymää, kuin pankkien välisen maksujärjestelmän korvaaminen uudella lohkoketjuratkaisulla. Tämä on huomattava lohkoketjujen käyttöönottoon vaikuttava tekijä myös energiasektorilla, sillä energiajärjestelmiin liittyvät infrastruktuurit ovat erittäin kalliita ja investointien pitoajat pitkiä. Esimerkiksi älymittareiden laajamittainen korvaaminen lohkoketjuteknologian kanssa yhteensopivilla älymittareilla tai investoinnit rinnakkaisiin mittausjärjestelmiin nykyisen mittarisukupolven aikana ei ole järkevää, vaan mahdollisten soveltuvien lohkoketjuratkaisujen harkinta tulee kyseeseen seuraavan sukupolven mittarien suunnitteluvaiheessa. Myös Suomen tapauksessa nyt tehtävät investoinnit keskitettyyn datahub-tiedonvaihtoyksikköön voivat vaikuttaa lohkoketjupohjaisten järjestelmien käyttöönottohalukkuuteen eri tilanteissa negatiivisesti tai luomalla uudenlaisia liiketoimintamahdollisuuksia.

Julkisten tahojen linjaukset ja lohkoketjuteknologiaa kehittävien yritysten keskenään ristiriitaiset kommentit tuovat esille lohkoketjuteknologian taloudellisen ympäristön voimasuhteet. Esimerkiksi Suomen verohallinnon linjaukset kryptovaluuttojen verotukseen ovat muuttuneet markkinoiden kehityksen myötä⁹⁴. Kryptovaluuttoilla kaupankäyntiin pohjautuvat ansaintamallit, verotus ja takaamiseen perustuvat vastuut ovat toistaiseksi poikkeavia muusta keskuspankkien takaamasta rahaliikenteestä. Lohkoketjuteknologian taloudellisten mahdollisuuksien ohella on sillä myös ominaisia haasteita. Esimerkiksi anonyymeja kryptovaluuttoja voidaan soveltaa rikollisuuden rahanpesuun, ja kryptovaluuttakaupoista saatavien voittojen seuraaminen on verottajan kannalta hankalaa.

Energia-alan lohkoketjuteknologia yritykset kehittävät erilaisia ansaintamalleja ja esimerkiksi investointirahoitusta haetaan kryptovaluuttojen liikkeellelaskujen (Initial Coin Offering, ICO) kautta. ICO on rahoitustapa, jossa lohkoketjun parissa työskentelevät yritykset luovuttavat sijoituksia vastaan omia esilouhittuja virtuaalivaluuttojaan. Lohkoketjuteknologian käyttöönoton myötä mahdollinen kehityssuunta energiamaarkkinoille on kaupankäynti rahakkeilla lohkoketjupohjaisella alustalla, kuten sähkömarkkinoiden kaupankäynti –kappaleessa kuvattiin. Mikäli nykyisiin kryptovaluuttoihin tai lohkoketjuteknologiaan yleisesti pohjautuvia järjestelmiä sovelletaan energiasektorille, on toimijan tarpeen määrittää vastuut vaihdannan välineen takauksesta esimerkiksi valuuttariskien tai tietoturtojen tapauksessa. Kryptovaluuttojen läpilyönti finanssimarkkinoille voisi myös muuttaa energiasektorin suhdetta liiketoiminnan kassavirtoihin tai laajemmin yhteiskunnan kokemaa raha-käsitettä, joskin esimerkiksi Suomen Pankki on skeptinen tätä kehityssuuntaa kohtaan⁹⁵. Useat pilottihankkeet, esimerkiksi Vattenfallin PowerPeers, toteutetaan mallilla, jossa transaktioita tehdään toistaiseksi testimielessä lohkoketjun välityksellä, mutta samanaikaisesti euromääräiset tarjoukset ja kaupat toteutetaan perinteiseen tapaan⁹⁶.

Ennen nykyisiä energia-alan kokeiluja lohkoketjuteknologiaa on kehitetty erityisesti finanssimarkkinoilla. Energia-alan lohkoketjuhankkeissa runsaasti vaihteleva markkinatilanne tai epäluottamus nykyisiä toimijoita tai käytäntöjä kohtaan voi olla otollinen ympäristö lohkoketjuteknologian soveltamiseksi. Kansainvälisesti volatiilimmat sähkömarkkinat kannustavat toimijoita aktiivisempaan

⁹⁴ <https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-hakusivu/48411/virtuaalivaluuttojen-verotus/>

⁹⁵ <https://helda.helsinki.fi/bof/handle/123456789/15564>

⁹⁶ <https://www.powerpeers.nl/>

markkinoille osallistumiseen ja toimialan luottamuksen puute on alkuperäisen lohkoketjuteknologian periaatteen ytimessä. Siksi kehittyvät markkinat esimerkiksi Aasiassa tai Afrikassa tarjoavat erilaisen kohteen lohkoketjulle kuin pohjoismaiset energiajärjestelmät. Toisaalta esimerkiksi Virossa, olemassa olevan älymittarikannan ja tietoteknisen osaamisen hyödyntäminen voi antaa riittävät alkuedellytykset tekniikan kokeilemiseksi⁹⁷. Kustannustehokkuuden kannalta on järkevää hyödyntää olemassa olevaa infrastruktuuria mahdollisuuksien mukaan. Esimerkiksi kaksinkertainen sähkön kulutuksen mittarointi ei kannata, jos lohkoketjupalvelin voi saada tietonsa esimerkiksi jakeluverkkojen valvomo-ohjelmiston tietokannan rajapinnasta. Lisäksi rinnakkainen laskutus sekä nykyisillä käytännöillä että lohkoketjuteknologian avulla ei ole todennäköisesti järkevää pilotointivaihtetta lukuun ottamatta. Alan toimijoiden kehityshankkeet ovat niin alussa, että lohkoketjupilottien tutkimat kustannussäästöt tai prosessien virtaviivaistuminen ovat vielä toistaiseksi pitkälti todentamatta tai salassapidon piirissä. Samoin myös lohkoketjujärjestelmien käyttöönoton kokonaisvaikutusten, esimerkiksi kuluttajien aktivoitumisen tai kyberturvallisuuden parantumisen kautta, on vaikeasti arvioitavissa.

⁹⁷ <https://medium.com/wepower/wepower-in-partnership-with-elering-is-launching-a-pilot-project-to-tokenize-estonian-energy-7bb929eed5c>

Lohkoketjujen vaikutusanalyysi

Seuraavassa taulukossa on selvitystyön perusteella havaittuja mahdollisia lohkoketjujen yhteiskunnallisia vaikutuksia PESTEL-analyysin avulla. PESTEL on strategisen johtamisen analyysityökalu, joka sisältää kuusi yhteiskunnallista muutosvoimaa. Analyysi on tehty keskipitkällä, yli viiden vuoden aikajänteellä tapahtuvista mahdollisista muutoksista perustuen esimerkiksi Maailman energianeuvoston selvityksestä⁹⁸ saatuun näkemykseen, että lohkoketjujen käyttöönotto ajoittuisi pääosin noin viiden vuoden sisään.

Taulukko 3 PESTEL-analyysi älykkäiden sähköjärjestelmien ja lohkoketjuteknologian yhteensovittamisesta

Muutosvoima	Lohkoketjuteknologian soveltaminen älyverkkojärjestelmissä
Poliittinen	Digitaaliset ansaintamallit sekä lohkoketjuteknologia ovat poliittisessa päätöksenteossa osittain linjaamatta. Poliittiset epävarmuudet liittyvät teknologian kehityksen tuomiin muutoksiin yhteiskunnan toimintamalleissa ja jos muut tahot tai maat siirtyvät lohkoketjupohjaiseen toimintaan. Lohkoketjuteknologialla voidaan toisaalta myös ajoittain ohittaa järjestyneen yhteiskunnan luomat vakiintuneet järjestelmät. Esimerkiksi rahakepohjaiset energiayhteisöt.
Ekonominen	Mikäli lohkoketjuteknologia toisi rahallisia säästöjä yhteiskunnan toimintaan, tulee tämä vaikuttamaan olennaisesti esimerkiksi finanssimarkkinoiden toimintaan. Erityisesti tämä on olennaista, jos vaihdanta siirtyy lähemmäs reaaliaikaisia vertaismarkkinoita lohkoketjun takia. Esimerkiksi lohkoketjupohjaiset energian kauppapaikat ja kauppojen selvitys.
Sosiaalinen	Lohkoketjuteknologia voi edistää kehitystä kohti asiakaskesteistä ja osallistavaa energiajärjestelmää. Esimerkiksi asiakkaan joustojärjestelmien tehokkaammat lohkoketjupohjaiset ratkaisut. Lohkoketjuteknologia itsessään vaatii huomattavaa ymmärrystä ja täten se ei välttämättä lisää luottamusta käyttää tätä teknologiaa. Esimerkiksi rahakepohjaiset järjestelmät voivat tuntua uusilta ja epäluottamusta herättäviltä.
Teknologinen	Lohkoketjuteknologian tulo älyverkkojärjestelmiin voi vauhdittaa uuden teknologian energiahankkeita. Esimerkiksi jos lohkoketjuteknologia mahdollistaa hajaantuneemman tuotantorakenteen hallinnan, voivat pientuotanto ja energiavarastot yleistyä.
Ekologinen	Mikäli lohkoketjuteknologia mahdollistaa uusiutuvien energiamuotojen hankkeita tai tehostaa energiajärjestelmän toimintaa, on sillä ekologisesti positiivinen vaikutus. Jos lohkoketjujärjestelmän ylläpito kuluttaa huomattavasti energiaa (esim. nykymuotoinen bitcoin), vähentää tämä mahdollisesti saatavia ympäristöhyötyjä.
Lainsäädännöllinen	Ennen lainsäädännöllisiä linjauksia lohkoketjuteknologian anonyymiin, ansaintamalleihin ja vastuisiin on Suomessa vaikea luoda todellista liiketoimintaa lohkoketjuteknologioiden ympärille. Esimerkiksi kryptovaluuttojen verotuskäytännöt määriteltiin tarkemmin toimintaympäristön vakiinnuttamiseksi.

⁹⁸ https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/11/Full-White-paper_the-developing-role-of-blockchain.pdf

Yhteenveto

Lohkoketjuteknologian mahdollisella läpimurolla energia-alalle olisi vaikutuksia älyverkkotyöryhmän aihekokonaisuuksiin. Erilaisia vaikutuksia kuluttajan näkökulmasta voisivat olla esimerkiksi energiayhteisöjen perustamisen ja aggregointitoiminnan helpottuminen. Toisaalta vaikutuksia lohkoketjuilla voisi olla myös yksittäisten kuluttajien joustojärjestelmiin ja älykkäiden järjestelmien kehitykseen. Älysopimukset voisivat mahdollistaa nopean sähkönmyyjän vaihdon tai sähkön oston suoraan toisilta kuluttajilta automaattisesti. Suunnitellun myyjäkeskeisen vähittäismarkkinamallin kannalta kuluttajan, myyjän ja verkkoyhtiön väliset laskutusprosessit voisivat virtaviivaistaa hajautettujen tietokantaratkaisujen käyttöönoton myötä. Toisaalta myös perinteinen sähkönmyyjän liiketoimintamalli voisi olla jopa vaarassa, mikäli välikädettömät lohkoketjuun perustuvat markkina-alustat yleistyvät. Pitkälle visioidussa skenaariossa lohkoketjuteknologia voisi mahdollistaa lohkoketjuun perustuvia, koko sähköjärjestelmän hallinnan mahdollistavia lohkoketjualustoja. Tällaisessa järjestelmässä toiminnot aina päästökaupasta kantaverkon taajuudenhallintaan asti hoidettaisiin lohkoketjuteknologialla.

Kuitenkin lohkoketjujen tulevaisuus sisältää erittäin paljon epävarmuutta suurimman osan hankkeista ollessa vielä kehitysvaiheessa. Selvityksen esittelemät aiheet ovatkin lohkoketjujen mahdollisia ja visioituja käyttökohteita, joiden osalta taloudellinen ja tekninen kannattavuus ovat vielä pitkälti todistamatta käytännössä. Energia-alan lohkoketjusovellukset kilpailevat muuttuvassa energiamurroksen toimintaympäristössä muiden teknologiaratkaisuiden kanssa. Onkin huomattava, että esitellyissä sovelluskohteissa lohkoketju on vain yksi teknologiaratkaisu muiden joukossa. Teknologiahankintoja tehdessä on pohdittava, tuoko lohkoketjun ominaisuudet todellista lisäarvoa käyttökohteessa. Tähän vaikuttaa myös markkinakohtainen sovellusympäristö. Esimerkiksi pohjoismaiset, korkean luottamuksen sekä toimivat ja vakiintuneet järjestelmät omaavat sähkömarkkinat eivät välttämättä muodosta kaikkein houkuttelevinta ympäristöä lohkoketjuteknologian käyttöönotolle. Esimerkiksi Australiassa ja Saksassa, joissa hajautettua pientuotantoa on huomattavasti Pohjoismaita enemmän, on havaittavissa myös enemmän kiinnostusta lohkoketjupohjaisen P2P-kauppapaikan luomiselle.

Lohkoketjujen kaltaisten disruptiivisten teknologioiden analysointi on erittäin haastavaa ja epävarmaa niiden laajuuden ja monimutkaisuuden vuoksi. Erityisesti lohkoketjujen osalta tulee huomioida, ettei ole olemassa vain yhdenlaista lohkoketjua, vaan lohkoketjupohjaiset ratkaisut ulottuvat keskitettyä tietokantaa muistuttavista järjestelmistä, aina bitcoinin kaltaisiin, täysin hajautettuihin ja avoimiin järjestelmiin. Kussakin lohkoketjun sovelluskohteessa lohkoketjuteknologiaa sovelletaankin järjestelmävaatimusten mukaisesti. Jääkin seuraavien vuosien aikana nähtäväksi, soveltuuko lohkoketjuteknologia energia-alan eri sovelluskohteisiin muita teknologiaratkaisuja paremmin.