

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Kandidaatintyö

BITCOININ LOUHINNAN HIILIJALANJÄLKI
Carbon footprint of Bitcoin mining

Työn tarkastaja: Tutkijaopettaja, TkT, Mika Luoranen
Työn ohjaaja: Tutkijatohtori, TkT, Kaisa Grönman

Lappeenrannassa 12.4.2021

Iida Alander

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Iida Alander

Bitcoinin louhinnan hiilijalanjälki

Kandidaatintyö

2021

38 sivua, 8 taulukkoa, 9 kuvaa.

Työn tarkastaja: Tutkijaopettaja, TkT, Mika Luoranen
Työn ohjaaja: Tutkijatohtori, TkT, Kaisa Grönman

Hakusanat: hiilijalanjälki, Bitcoin, louhinta
Keywords: carbon footprint, Bitcoin, mining

Tässä kandidaatintyössä lasketaan virtuaalivaluutta Bitcoinin louhinnan aiheuttama hiilijalanjälki sekä verrataan sitä korttimaksamisen päästöihin. Työssä perehdytään myös Bitcoinin toimintaan sekä lohkoketjuteknologiaan. Laskennassa huomioidaan louhintaan tarvittavan tietokoneen valmistuksen ja loppukäsittelyn päästöt sekä käytön aikaiset päästöt. Tarkastelun ulkopuolelle jäävät valmistuksen ja loppukäsittelyn kuluttaman energian vaikutus kokonaispäästöihin. Laskennassa huomioidaan louhintatietokoneiden malli, maantieteellinen sijainti sekä alueilla käytettävät energianmuodot. Laskenta toteutetaan hyödyntämällä työssä määritettyä toiminnallista yksikköä, joka ilmoittaa syntyvät hiilidioksidipäästöt tarkasteltavan elinkaaren ajalta yhtä louhittua TH (eng. tera hash) kohden. Työn hiilijalanjälkiarvioinnin perusteella huomataan, että merkittävimmät päästöt syntyvät louhinnassa käytön aikana. Käytön aikaiset päästöt kattavat noin 97 % kokonaispäästöistä. Keskiarvoisiksi päästöiksi yhtä toiminnallista yksikköä kohden saadaan 6,2 mgCO₂e/TH. Kokonaispäästöiksi vuoden aikana suoritetusta louhinnasta saadaan noin 40,7 MtCO₂e. Vertailussa huomataan Bitcoinin tuottavan merkittävästi enemmän päästöjä kuin korttimaksamisen, vaikka tarkastelun ulkopuolelle jää muun muassa yritysten energiankulutuksen merkitys. Täten Bitcoin ei vielä nyky menetelmillä toimi ympäristöystävällisempänä maksumenetelmänä.

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO	4
1 JOHDANTO	5
2 BITCOININ TOIMINTAPERIAATE	7
2.1 Lohkoketjun rakenne ja toiminta	8
2.2 Kryptografia	10
2.3 Transaktiot.....	11
2.4 Proof-of-Work ja Double Spending.....	12
2.5 Louhinta	14
3 BITCOININ LOUHINNAN HIILIJALANJÄLKI.....	16
3.1 Louhintatietokoneen komponentit	17
3.2 Valmistus ja loppukäsittely	18
3.2.1 Louhintalaitteiston valmistuksen ja loppukäsittelyn päästöt	19
3.3 Käyttö.....	20
3.3.1 Louhintatietokoneiden energiankulutus.....	20
3.3.2 Louhintafarmien sijainti ja alueilla hyödynnettävät energiamuodot	21
4 HIILIJALANJÄLKIARVIOINNIN TULOKSET.....	26
4.1 Maksumenetelmien päästöjen vertailu.....	27
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	30
6 YHTEENVETO.....	32
LÄHTEET	34

SYMBOLILUETTELO

Termit

Peer-to-Peer	Vertaisverkko. Ilman keskitettyä palvelinta toimiva verkko, jossa jokainen tietokone on sekä palvelin, että asiakas. (TechTerms, 2021.)
Noodi	Systeemi tai laite, joka on kytketty johonkin verkkoon (TechTerms, 2021).
Hajautusalgoritmi	Algoritmi, joka ottaa syötteeksi merkkijonon ja palauttaa sille laskemansa tiivisteen (Wikipedia, 2015).
Kryptografia	Tieteenala, joka tutkii salakirjoitusten matemaattista teoriaa (Finto, 2021).
BTC	Yksi Bitcoinista yleisimmin käytetty lyhenne (Bitcoin.org, 2021a).
Mempool	Tapa, jolla noodi säilyttää varmistamattomien transaktioiden tietoja (Binance Academy, 2021).
Hash Rate	Mittayksikkö, jota käytetään kuvaamaan Bitcoin-verkon laskentatehoa (Bitcoin.org, 2021a).
Fiat-valuutta	Raha, jonka arvo ei perustu hyödykkeeseen, vaan on valtion hallitsema, esimerkiksi USD (Investopedia, 2021).

1 JOHDANTO

Vuonna 2008 tuntematon käyttäjä nimimerkillä ”Satoshi Nakamoto” loi maailman ensimmäisen ”Peer-to-Peer”-virtuaalivaluutan, joka toimii täysin ilman valvovaa kolmatta tahoja (Nakamoto 2008). Virtuaalivaluutta Bitcoin on vakiinnuttanut asemansa nyky-yhteiskunnassa muiden maksumenetelmien rinnalla ja haastaa perinteisten menetelmien toimivuuden. Bitcoin toimii globaalissa mittakaavassa ja on lyhyen olemassaolonsa aikana herättänyt niin positiivista kuin negatiivistakin huomiota. (Bitcoin.org 2021b.)

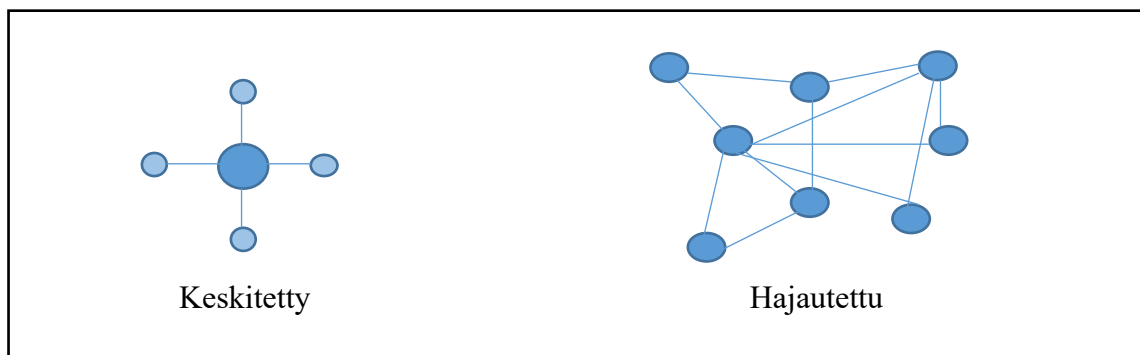
Bitcoin ja muut kryptovaluutat ovat saaneet jokseenkin tahrautuneen maineen, sillä monesti niiden käyttö yhdistetään rikollisuuteen. Kryptovaluuttojen riippumattomuus kolmannesta osapuolesta, kuten pankeista, tekee transaktioista valvomattomia ja jäljittämättömiä. Tämä altistaa kryptovaluuttojen käytön laittomuuksille, sillä anonyymiteetti maksuliikenteessä on taattu. (Vero 2020.) Kryptovaluutat tunnetaan toisaalta myös niiden aikaansaamista menestystarinoista, joissa etenkin nuoret ovat haalineet itselleen miljoonia onnistuneiden kryptovaluuttasijoitusten kautta (Yle 2018). Rikastuminen tällä tavoin ei katso ikää tai sosioekonomista asemaa, sillä kuka vain voi omalla tietokoneellaan osallistua kaikille avoimeen kryptovaluuttatoimintaan. Bitcoin on vuosien varrella saanut rinnalleen satoja muita virtuaalivaluuttoja, jotka kaikki jossain määrin hyödyntävät Bitcoinin kaltaista keskittämätöntä teknologiaa. Näistä tällä hetkellä merkittävimpiä ovat muun muassa Ethereumin virtuaalivaluutta Ether ja Litecoinin (Bitcoinkeskus 2021a). Sosiaalisessa mediassa ja uutisartikkeleissa on usein esiintynyt otsikoita siitä, miten viranomaistahot ja ei-toivotut järjestöt hyödyntävät jokaisen taskusta löytyvää teknologiaa hälyttäviin tarkoituksiin. Datan kerääminen sosiaalisen median profiileista, mainosten kohdistaminen evästeiden avulla ja puheen sekä kuvan tallennus henkilökohtaisen elektroniikan kautta, on heikentänyt ihmisten luottoa kolmannen osapuolen tarjoamiin palveluihin. (Forbes 2019.) Tämä on vauhdittanut kiinnostusta virtuaalivaluuttojen lisäksi myös muuhun ”Peer-to-Peer”-teknologiaa hyödyntävään toimintaan, jossa kolmannen osapuolen merkitys katoaa.

Virtuaalivaluutasta tai muusta virtuaalisesta toiminnasta puhuttaessa nousee harvoin esille toimintojen ympäristövaikutukset, sillä kyseessä ei ole mikään konkreettinen tuote. Louhiminen yhdistetään usein kaivoksissa tapahtuvaan toimintaan, jossa raskaan fyysisen työn päätteeksi löydetään esimerkiksi arvokas kultahippu (World Gold Council 2021). Bitcoinien louhiminen on tästä miellelyhtymästä johtuen hyvin vieras käsite monille, vaikka se noudattaakin lähes täysin samanlaista kaavaa. Yksinkertaistettuna louhinnan avulla uudet transaktiot hyväksytään ja todetaan valideiksi, jotta ne voivat muodostaa uuden lohkon ja liittyä osaksi olemassa olevaa virtuaalivaluutan tilikirjaa eli lohkoketjua. Louhinnassa käytettävät prosessorit pyrkivät ratkaisemaan haastavia salausalgoritmeja, mikä vaatii valtavasti laskennallista tehoa. Algoritmit ensimmäisenä ratkaissut saa palkinnoksi Bitcoineja. Louhinta muodostaa Bitcoinin hiilijalanjäljestä suurimman osan, sillä toiminta on hyvin energiaintensiivistä ja vaatii paljon elektroniikkaa. (Bitcoin 2020.)

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan Bitcoinin hiilijalanjälkeä lähinnä louhinnan osalta, sillä se tuottaa suurimman osan päästöistä. Muista elinkaarenvaiheista tarkastellaan louhintaan käytettävien tarvikkeiden valmistusta ja loppukäsittelyä. Laskennassa pyritään huomiomaan prosessoreiden ja muun elektroniikan valmistuksen raaka-aineet, valmistuksessa ja loppukäsittelyssä syntyvät päästöt sekä käytön, eli louhinnan, aikana energiankulutuksesta aiheutuvat päästöt. Työn tutkimuskysymyksinä ovat: 1) Kuinka paljon päästöjä Bitcoinin louhinta aiheuttaa? ja 2) Mihin tämä sijoittuu vertailussa tavanomaisen maksumenetelmän kanssa? Työssä tarkastelu rajataan koskemaan kryptovaluutoista vain Bitcoinia, sillä se on virtuaalivaluutoista vanhin ja yhä suosituin. Muut Bitcoinin jälkeen syntyneet virtuaalivaluutat perustuvat samankaltaiseen toimintaperiaatteeseen kuin Bitcoin. Tutkimusmenetelminä hyödynnetään kirjallisuuskatsausta, elinkaariarviointia sekä vertailua maksumenetelmän välillä. Teoriaosuuden kirjallisuuskatsauksessa paneudutaan Bitcoinin toimintaan, päästöjen syntysyihin sekä käydään läpi hiilijalanjälkilaskennan periaatteet. Päästöt louhinnassa käytettäville laitteille ja energiankulutukselle lasketaan hiilijalanjälkitarkastelussa.

2 BITCOININ TOIMINTAPERIAATE

Bitcoin on kuvan 1 havainnollistama hajautettu virtuaalivaluuttajärjestelmä, joka perustuu avoimeen lähdekoodiin. Tämä tarkoittaa sitä, että kaikilla Bitcoin vertaisverkon jäsenillä on hallussaan samat tiedostot ja kuka tahansa voi muokata ohjelmakoodia luodakseen oman järjestelmänsä. Koska Bitcoin sisältää sekä valuutan että maksujärjestelmän, se tarvitsee toimiakseen lohkoketjuteknologiaa, eikä sitä voida muiden valuuttojen tavoin erottaa digitaalisista maksujärjestelmistä käteiseksi valuutaksi. Bitcoinin lohkoketju, eli kirjanpito, on kaikkien verkon osapuolten hallussa, mikä tekee järjestelmästä hajautetun. Verkon jäsenten, eli noodien (eng. node), tehtävänä on valvoa transaktioiden oikeellisuutta ja toimittaa niitä ketjussa eteenpäin louhijoille. Louhija on noodi, joka pyrkii aktiivisesti lisäämään lohkoja osaksi ketjua. Louhijat kokoavat mieleisensä transaktiot lohkoon, jonka he haluavat saada lisätyksi lohkoketjuun ensimmäisenä. Lohkon lisääminen edellyttää valtavasti laskentatehoa vaativien salausalgoritmien ratkaisemista, joten vain tehokkaimmat louhijat pärjäävät kassassa voittaen palkinnoksi Bitcoineja. (Bitcoinkeskus 2020b.)



Kuva 1. Keskitetty verkko toimii yhden palvelimen kautta, hajautettu luottaa useisiin palvelimiin (mukailen: Learning Bitcoin, 2015).

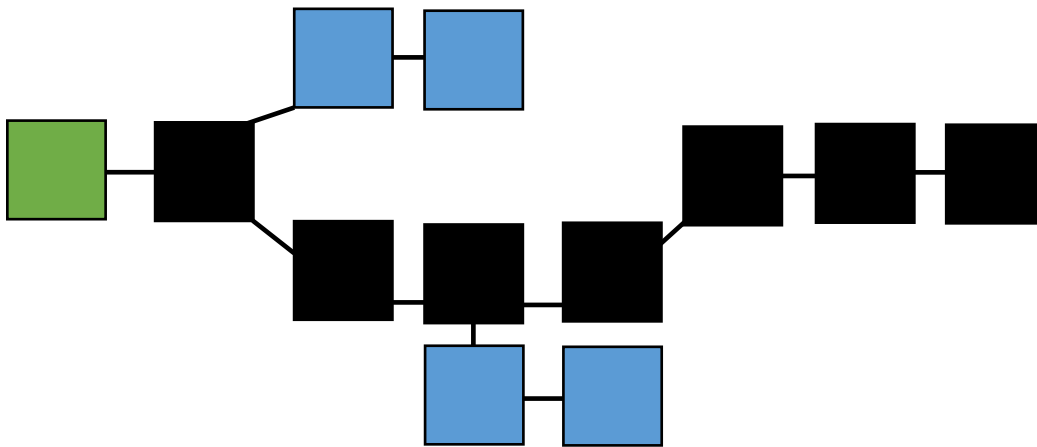
Bitcoinin taustalla toimivaan teknologiaan ei tavallisen käyttäjän tarvitse puuttua osallistukseen virtuaalivaluuttatoimintaan. Kuluttaja voi ostaa Bitcoineja siihen tarkoitetuilta sivuilta. Virtuaalirahaa säilytetään digitaalisessa lompakossa, jota hallitsee käyttäjän yksityinen avain. Tilisiirrot tapahtuvat henkilökohtaisten julkisten avainten avulla, jotka toimivat tietyn tilin tunnisteena lohkoketjussa sekä transaktioissa. Louhijoiden varmistamat transaktiot kasvattavat ketjua ja luovat luoton maksuliikenteeseen. Vaikka louhinta synnyttääkin

verkkoon uusia Bitcoineja, eli varallisuutta, herättävät sen aiheuttamat ympäristövaikutukset huolta kuluttajissa. (Bitcoinkeskus 2020b.)

2.1 Lohkoketjun rakenne ja toiminta

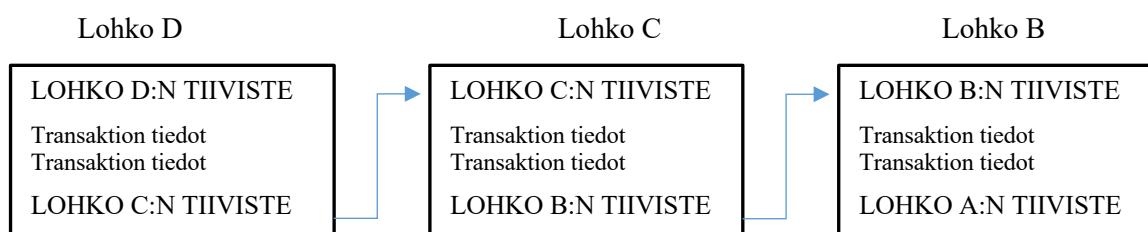
Lohkoketju on teknologia Bitcoinin takana, joka mahdollisti kopioimattoman virtuaaliva-luutan synnyn. Tavanomaisesti sähköisiä tiedostoja voi kopioida ja liittää, joka virtuaaliva-luutan tapauksessa tekisi valuutasta arvottoman, jos sitä voisi ketä vain mielivaltaisesti luoda itselleen. Useimmat palvelut, kuten pankit ja suoratoistopalvelut tarjoavat ongelmaan ratkai-suksi sen, että toiminta ohjataan kulkemaan jonkun keskitetyn palvelimen kautta. Tämä pal-velin varmistaa käyttäjän luotettavuuden ja oikeuttaa pääsyn kyseiseen palveluun. Lohko-ketju tarjoaa tähän kuitenkin hajautetun ratkaisun, sillä lohkoketju itsessään sisältää tiedon siitä, mitä transaktioita ketjun aikana on tapahtunut. Tämän avulla voidaan ylläpitää tietoja käyttäjien varallisuudesta ja täten hyväksyä käyttäjien tekemät transaktiot. Väärinkäytön yri-tykset ovat huomattavissa lohkoketjussa heti, sillä jokainen lohko on linkitetty sitä edeltä-vään lohkoon. Yhden lohkon muuttamiseksi tulisi siis muuttaa koko ketju hyvin lyhyessä ajassa. (Rothstein 2017, 23–29.)

Kuvan 2 mukainen lohkoketju on siis kuin tietokanta, jossa on mahdollista hallita minkä-laista tietoa tahansa. Kryptovaluuttojen tapauksessa sen avulla hallitaan tietoja siitä, kuka on velkaa kenelle ja kuinka paljon. Toisiinsa synkronoiduilla noodeilla on hallussaan lohko-ketju. Yhteisymmärryksen (eng. consensus) perusteella valitaan kilpailevista lohkoketjun muodoista validi versio. (Kent & Bain 2020, 13.)



Kuva 2. Lohkoketjun rakenne. Lohko alkaa vihreästä alkulohkosta (eng. genesis block) ja päättyy mustan pääketjun viimeiseen lohkokseen. Siniset lohkot ovat hylättyjä lohkoja (eng. orphan block) (mukaillen: Ray, S. Hackernoon.com, 2017).

Lohkoketjun hakkerointia laajan vertaisverkon lisäksi vaikeuttaa tiivisteiden (eng. hash) käyttö. Tiiviste on kuin sormenjälki datalle, joka muodostuu useista numeroista sekä kirjaimista ja on täysin uniikki. Lohkoketjussa tiivistettä käytetään moniin toimintoihin, jotka mahdollistavat lohkon lisäyksen ketjuun. Ensin jokin verkon tietokone validoi transaktiot, jotka lisätään lohkoketjuun. Kun transaktioita on kerätty tarpeeksi lohkoa varten, tietokone syöttää lohkon sisältämät tiedot hajautusalgoritmiin, joka palauttaa lopuksi tiiviste. Tiiviste lisätään tunnisteeksi lohkokseen, joka sisältää myös siihen kerätyt transaktiot. Nyt lohko voidaan liittää lohkoketjuun. Seuraavaa lohkoa varten kerätään taas joukko transaktioita ja mukaan lisätään lopuksi edeltävän lohkon tiiviste. Uusi lohko, sisältäen transaktiot sekä edeltävän lohkon tiiviste, syötetään uudestaan hajautusalgoritmiin. (Kent & Bain 2020, 14–15.) Tätä prosessia toistamalla syntyy kuvan 3 mukainen aikaleimattu lohkoketju.



Kuva 3. Jokaisen lohkon tiiviste tallennetaan edelliseen lohkokseen, minkä ansiosta lohkot voivat ketjuuntua (mukaillen: Kent & Bain, 2020).

Mikäli joku pyrkisi nyt muuttamaan esimerkiksi lohkon B rakennetta, tulisi hänen muuttaa myös C lohkon ja siten D lohkon rakenteita, oli kyseessä kuinka pieni muutos tahansa. Tämä edellyttäisi koko ketjun uudelleen louhimista, missä viimeistään väärinkäyttäjät häviäisivät Bitcoin-verkolle. (Kent & Bain 2020, 13–14.)

2.2 Kryptografia

Bitcoinin tapauksessa kryptografiaa, eli salausta, hyödynnetään omistajuuden hallintaan. Bitcoin perustuu avoimeen lähdekoodiin, joka ei ole salattu. Julkiset ja yksityiset avaimet, joiden avulla digitaalisia lompakkoja ja transaktioita hallitaan, pohjautuvat digitaaliseen kryptografiaan. Avaimia säilytetään digitaalisessa lompakossa, joka generoi julkisen avaimen, eli Bitcoin-osoitteen, yksityisen avaimen pohjalta. Digitaalisia lompakkoja hallitaan niille tarkoitettujen sovellusten sekä sivustojen kautta. (Kent & Bain 2020, 19, 21.)

Kuvan 4 mukaisen julkisen avaimen avulla salataan viestejä ja yksityisen avaimen avulla puretaan nämä viestit. Yksityinen avain voi koostua valtavista alkuluvuista ja julkinen avain voi esimerkiksi olla näiden lukujen summa. Käyttäjä ei voi vaikuttaa julkisen tai yksityisen avaimen muotoihin. Yksityistä avainta on mahdotonta saada selville julkisen avaimen avulla, sillä mahdollisia vaihtoehtoja on ääretön määrä. Lähettäessään jonkin tilisiirron käyttäjä luo salatun viestin julkista avaintaan hyödyntäen. Hän kohdistaa viestin toisen käyttäjän julkisen avaimen ”osoitteeseen”. Kukaan muu ei kykene tätä viestiä korruptoimaan, paitsi sen yksityisen avaimen haltija, jolle tilisiirto on osoitettu. (Rothstein 2017, 37–38.)

1LYC9T4615YzJfdamfjYvJj5oorMKG1uEd

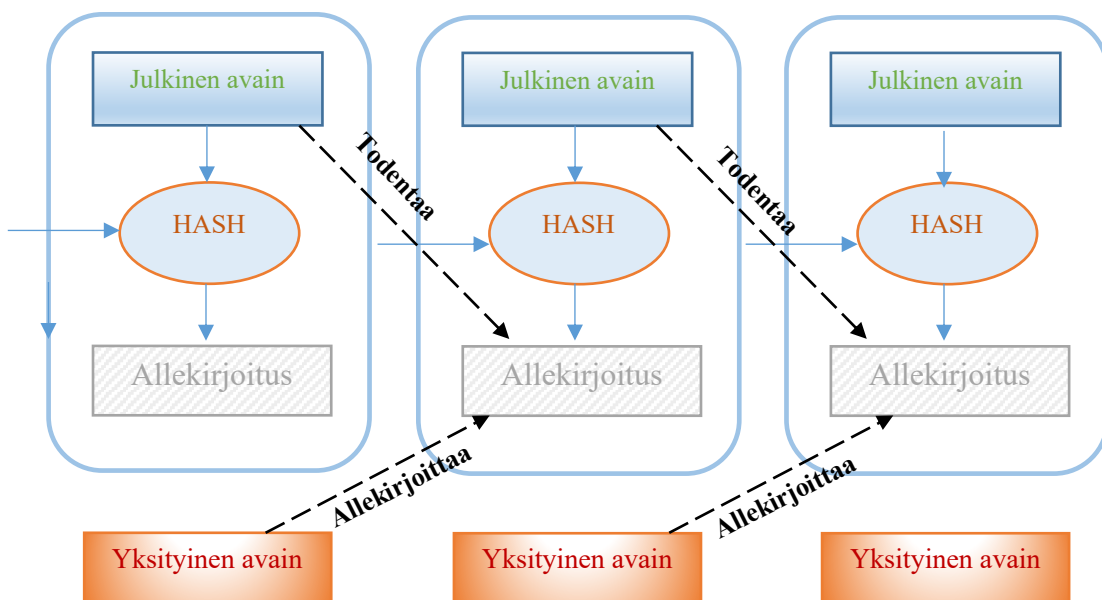
Kuva 4. Esimerkki julkiseen avaimeen pohjautuvasta Bitcoin-osoitteesta (mukaillen: Blockcahin.com, 2021).

Yksityisiin avaimiin pohjautuvien digitaalisten allekirjoitusten avulla todennetaan, että tilisiirron tehnyt taho on todella se, ketä väittää olevansa. Lähetettävät siirrot salataan verkon muilta käyttäjiltä yksityisellä avaimella. Siirron vastaanottaja voi lähettäjän julkisen avaimen avulla purkaa salatun siirron ja purun onnistuessa varmistua siitä, että lähettäjä on todella ollut tämä tietty käyttäjä. Joten kun käyttäjä salaa tilisiirron yksityisellä avaimellaan ja

kohdistaa sen toisen käyttäjän julkiseen avaimen, hän allekirjoittaa siirron omakseen, jonka vastaanottaja voi varmistaa lähettäjän julkisen avaimen avulla. (Kent & Bain 2020, 21.)

2.3 Transaktiot





Kuten aikaisemmassa luvussa 2.2 mainittiin, tilisiirtojen kulkeutuminen verkon läpi oikeaan osoitteeseen perustuu julkisten ja yksityisten avainten käyttöön. Käytännössä transaktio tapahtuu siten, että siirron tekevä käyttäjä ilmoittaa lohkoketjulle omistavansa jonkun osoitteen ja haluavansa siirtää esimerkiksi 0,05 BTC toisen käyttäjän osoitteeseen. Viestin lähetys tapahtuu digitaalisen lompakon kautta, joka on todellisuudessa enemmän sähköpostijärjestelmä kuin lompakko, sillä se viestittää koko verkolle hallitsemansa osoitteen siirroista. Verkon noodi voi tietää siirron olevan validi seuraavasti. Ainoa henkilö, joka olisi voinut lähettää salatun viestin transaktion tiedoista tälle osoitteelle yhdessä julkisen avaimen kanssa, joka alun perin loi osoitteen, on se henkilö, joka hallitsee näihin liittyvää yksityistä avainta. Tämä varmistaa omistajuuden ja tekee transaktiosta validin. (Kent & Bain 2020, 23–24.) Kuva 5 tarkentaa julkisen ja yksityisen avaimen merkityksiä transaktioissa.



Kuva 5. Transaktion rakenne lohkoketjussa (mukaillen: Randic, S et al. Researchgate.net, 2018).

Mikäli transaktio osoittautuisi epävalidiksi noodi hylkäisi sen, sillä sitä olisi turha lähettää eteenpäin seuraaville. Validit transaktiot päätyvät mempooliin yhdessä muiden hyväksytyjen siirtojen kanssa ja jatkavat matkaansa seuraaville noodeille. Bitcoin-verkon konsensus pohjautuu siihen, että nämä uudet noodit suorittavat samat prosessit transaktioille, kuin ensimmäinen noodi ja levittävät tilisiirtoja yhä laajemmalle verkkoon. Jotkin noodeista ovat louhijoita, jotka suorittavat lohkojen lisäyksen ketjuun. Transaktioiden matka päättyy louhijaan. (Kent & Bain 2020, 46.)

Kuvan 6 transaktiolla on viisi varmistusta. Yleisesti nyrkkisääntönä siirtoja tehdessä on hyvä odottaa, että siirrolla on vähintään kuusi varmistusta. Näin voidaan varmistua siitä, että siirtoa ei voi enää peruuttaa. (Learning Bitcoin 2015, 96.)

Hash	cefc3d9ed7edd77058094402e391cc7f9ce5...	2021-02-04 11:09
	bc1qhy9kp2ny5lungle0... 9.77013740 BTC 	
	bc1qut03x7z7g2sgc2qh... 0.28272451 BTC 	
	bc1qfnc4qccdnftt00x7... 9.48723813 BTC 	
Fee	0.00017476 BTC (78.721 sat/B - 31.152 sat/WU - 222 bytes)	+9.48723813 BTC
		5 Confirmations

Kuva 6. Satunnaisen käyttäjän 9,77013740 BTC:n (364 200,66 \$) arvoinen siirto (Blockchain.com, 2020).

2.4 Proof-of-Work ja Double Spending

Tilikirjan, eli lohkoketjun, erilaisia muotoja voi olla olemassa samaan aikaan useita ja ne pyrkivät huijaamaan verkkoa sekä käyttämään jonkin käyttäjän varoja useammin kuin kerran. Tämä synnytti ongelman kryptovaluuttojen käyttöön, joka tunnetaan nimellä Double Spending. Varojen moninkertaisen käytön estämiseksi esitettiin ratkaisu - Proof-of-Work. Tämän tekniikan avulla pidetään huolta siitä, että vain yksi samanlainen tilikirja on voimassa ja hallussa kaikilla noodeilla. (Rothstein 2017, 43–44.) Louhintaa suorittavat noodit kilpailevat Bitcoineista julkaisemalla Proof-of-Workin verkkoon, jonka luominen vaatii lohkon tiivisteen arvon selvittämistä. Louhijat pyrkivät löytämään pienimmän mahdollisen tiivisteen arvon, jonka suuruutta säädelään vaativuuden (eng. difficulty) avulla. Mikäli louhija

löytää lohkolle arvon, joka on pienempi kuin sen hetkinen vaativuuden arvo, on hän löytänyt hyväksyttävän ratkaisun. Muiden louhijoiden hyväksyessä tämän Proof-of-Workin, sen louhija palkitaan bitcoineilla ja lohko liitetään pisimmän ketjun jatkeeksi. Lohkossa olleet transaktiot muuttuvat varmistetuiksi ja louhinta jatkuu tämän lohkon ”päälle”. Uusien lohkojen liittyessä ketjuun, sen aikaisempien lohkojen transaktioiden varmistuksien määrä kasvaa, eli niistä tulee luotettavampia ketjun jäseniä. (Learning Bitcoin 2015, 96.)

Bitcoinin tapauksessa uusi lohko lisätään noin 10 minuutin välein. Vaativuutta modifioidaan sen mukaan, kuinka kauan edellisen lohkon hyväksyntään kuluu. Jos aikaa kuluu alle 10 minuuttia vaativuus kasvaa. Jos aikaa kuluu enemmän, vaativuus laskee. Vaativuutta päivitetään 2016 lohkon välein. (Learning Bitcoin 2015, 97.) Kuvassa 7 esitetään vaativuuden kehitys Bitcoinin alusta nykyhetkeen, joka korreloi suoraan sen kanssa kuinka paljon laskentatehoa verkossa on.



Kuva 7. Vaativuuden muutos vuodesta 2009 nykyhetkeen. Vaativuuden arvo kertoo sen, kuinka monta yritystä vaaditaan ennen oikean tuloksen löytämistä (Blockchain.com, 2021).

2.5 Louhinta

Louhijaksi luetaan sellainen noodi, joka aktiivisesti etsii vaativuustason alittavaa tiivisteiden arvoa (Learning Bitcoin 2015, 98). Louhinnan avulla myös luodaan uusia Bitcoinia, sillä louhijat palkitaan työstään kryptovaluutalla. Louhijat saavat itselleen myös siirtojen palvelumaksut, joiden suuruuden käyttäjä voi itse määrittää siirtoa tehdessään. Verkon laskentatehon jatkuvan kasvun lisäksi louhinnan palkitsevuutta vähentää puolittuminen (eng. halving). Joka 210 000. lohko, eli noin neljän vuoden välein, louhijoiden palkkion määrä puolittuu. Tällä hetkellä palkkio on 6,25 BTC. (Kent & Bain 2020, 248.) Puolittuminen tulee myös johtamaan siihen, että kun 6 930 000 lohkoa on ratkaistu ja 21 miljoonaa Bitcoinia vapautettu markkinoille, uusia ei enää synny (Rothstein 2017, 54.)

Koska louhinnassa pohjimmillaan käydään kilpailua siitä, kuka pystyy käymään läpi suurimman määrän tiivisteitä nopeiten, voittaa kilpailun se, jonka tietokone käy läpi eniten tiivisteitä aikayksikköä kohden. Laskentanopeutta kuvataan yksiöllä TH/s (eng. tera hash), joka kertoo kuinka monta tera (10^{12}) tiivistettä tietokone laskee sekunnissa. Tähän nopeuteen vaikuttaa suoraan käytössä olevan tietokoneen prosessorin teho ja niiden lukumäärä. Jokaisen tietokoneen on mahdollista osallistua louhintaan käyttämällä omaa keskusprosessoriaan (central processing unit, CPU). CPU ei kuitenkaan enää nykyään pärjää louhinnassa kehittyneempiä kilpakumppaneitaan vastaan. Ensin CPU:n tilalle löydettiin tuloksellinen GPU (graphics processing unit), jota oli laajalti käytetty pelien grafiikoiden luomisessa. Tämän laskentateho oli noin kymmenenkertainen edeltäjänsä verrattuna. Bitcoinin arvon kasvaessa alettiin yhdistää GPU yksiköiden tehoja rakentamalla louhintajoukkoja (eng. mining rigs). Tämä lisäsi merkittävästi verkon kokonaislouhintatehoa ja kasvatti louhijoiden palkkioita, mikä siivitti kilpailua kohti tehokkaampia prosessoreita. Nykyisin nämä molemmat on korvannut louhintaan erikoistunut ASIC-prosessori (application-specific integrated circuit), joka on miljoonia kertoja nopeampi kuin aikaisemmat prosessorit. Kilpavarustelu vaatii valtaviin summien sijoittamista kohti vaikeutuvaa louhintaa, mikä johtanut mining poolien syntyyn. Näissä louhintatehot eri toimijoiden välillä yhdistetään ja palkkiot jaetaan louhintaosuuksien mukaan. (Rothstein 2017, 57–61).

Vaikka Bitcoin ja muut kryptovaluutat ovat täysin virtuaalisia palveluita, syntyy niiden toiminnasta silti merkittäviä ympäristöpäästöjä. Koska kilpailu louhinnassa on nykyään kovaa Bitcoinin arvon kasvun takia, louhintakapasiteettiin panostetaan valtavasti. Louhinnassa menestyksekkäimmät ASIC-prosessorit vaativat toimiakseen hyvin paljon sähköenergiaa. Näiden prosessorien julkaisuvuonna 2013, arvioitiin Bitcoinin louhinnan energiankulutuksen olevan verrannollinen 44 000 amerikkalaisen kotitalouden energiankulutukseen. Tämä määrä on jatkanut kasvuaan Bitcoin-verkon laajentuessa. Energiaintensiiviset louhintafarmit pyritään huimien kustannustensa takia sijoittamaan alueille, joissa sähkö on edullisinta. Tällöin harvoin huomioidaan energiamuodon vihreys tai vaikutus ilmastoon, mikä on herättänyt huolta kryptovaluuttatoiminnan ympäristökuormasta. (Rothstein 2017, 65–66).

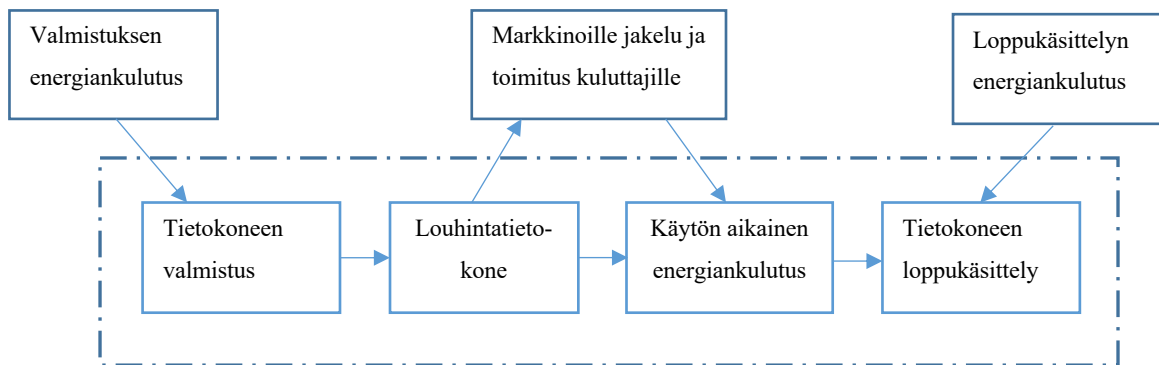
3 BITCOININ LOUHINNAN HIILIJALANJÄLKI

Hiilijalanjäljellä kuvataan jonkin tuotteen, palvelun, henkilön tai organisaation tietyllä aikavälillä syntyneitä kokonaispäästöjä. Usein hiilijalanjäljen laskennassa huomioidaan hiilidioksidin (CO₂) lisäksi myös muut merkittävimmät kasvihuonekaasut, kuten metaani (CH₄) sekä dityppioksidi (N₂O). Kokonaispäästöt ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalentteina (CO₂e) tai hiilidioksidiekvivalentteina kilogrammaa kohden (kg-CO₂e). (Sitra 2018.)

Hiilijalanjäkilaskentaa ohjaa muun muassa GHG-protokolla (Greenhouse Gas Protocol), jonka kolme Scope-ryhmittelyä määrittävät laskennan raamit. Organisaation suoria ympäristövaikutuksia kuvaa Scope 1, jossa huomioidaan yrityksen toiminnasta suoraan johtuvat päästöt. Scope 2 kuvaa organisaation ostoenergian epäsuoria päästöjä, eli esimerkiksi niitä, jotka syntyvät välillisesti yrityksen sähkönkulutuksesta. Scope 3 huomioi ne organisaation epäsuorat päästöt, jotka ovat esimerkiksi työntekijöiden ja valmistettujen tuotteiden aiheuttamia. (Ecoreal 2020.) GHG-protokollan lisäksi laskentaa ohjaavat erilaiset standardit. Tuotteiden ja palveluiden hiilijalanjäljen laskemiselle on olemassa kansainvälinen ISO 14067 standardi ja organisaatioiden hiilijalanjäljen laskennalle ISO 14064 standardi. Laskennassa hyödynnetään lämmityspotentiaalia, jonka avulla kasvihuonekaasut muunnetaan hiilidioksidiekvivalenteiksi. Lämmityspotentiaali (Global Warming Potential, GWP) kuvaa kasvihuonekaasujen synnyttämää säteilypakotteen voimakkuutta hiilidioksidin massayksikköä kohden. GWP-kerrointa käytetään ilmaisemaan lämmityspotentiaalın suuruutta, joka lasketaan usein 100 (GWP100) tai 20 (GWP20) vuoden aikajaksolle. (EPA 2020.)

Tuotteen tai palvelun hiilijalanjälki voidaan laskea koko elinkaarelle tai huomioida vain osasta. ”Kehdosta hautaan” menetelmää käytetään, kun lasketaan koko elinkaaren aikaiset päästöt. ”Kehdosta tehtaan portille” menetelmään viitataan, kun laskenta rajataan koskemaan päästöjä raaka-aineiden hankinnasta valmistukseen. ”Portilta portille” menetelmä huomioi vain valmistuksen aikaiset päästöt. ”Kehdosta hautaan” menetelmä tarjoaa tarkimman tuloksen hiilijalanjäljelle, vaikka laskentaan silti liittyy epävarmuuksia. Mahdollisuudet huomioida tuotteen ikä ja käyttöaika eivät monesti ole optimaaliset, minkä lisäksi myös tiedon puute ja luotettavuus aiheuttavat hankaluuksia laskentaan. (Claudelin 2019.)

Bitcoinin tapauksessa kyseessä ei ole mikään konkreettinen tuote, vaan palvelu, joten tarkastelu on hankala rajata koskemaan tiettyjä elinkaaren vaiheita. Tiedetään kuitenkin, että louhinta muodostaa syntyvistä päästöistä suurimman osan, joten tarkastellaan siihen liittyviä kuvan 8 mukaisia kokonaisuuksia. Hiilijalanjälkiarvioinnissa huomioidaan louhintaan käytettävien tietokoneiden valmistuksesta ja loppukäsittelystä syntyvät päästöt sekä niiden käytön aikaiset energiankulutuksen vaikutukset kokonaispäästöihin. Tarkastelussa ei puututa Bitcoin-verkon muun toiminnan aiheuttamiin päästöihin.



Kuva 8. Bitcoinin louhinnan tiivistetyt elinkaarenvaiheet ja palvelujärjestelmän rajat.

Määritetään laskentaa varten toiminnallinen yksikkö, jonka suhteen kokonaispäästöt ilmoitetaan. Tietokoneiden laskennallinen teho sekä koko verkon laskennallinen kapasiteetti ilmoitetaan yksikössä TH. Valitaan tällä perusteella laskettavaksi toiminnalliseksi yksiköksi louhinnan elinkaaren ajalta syntyvät päästöt yhtä TH:ta kohden.

3.1 Louhintatietokoneen komponentit

Bitcoinin tuottoisaan louhintaan useimmiten käytetty prosessori on ASIC-prosessori. Application-Specific Integrated Circuit on piistä valmistettu mikrosiru, johon on integroitu useita elektronisia piirejä. ASIC valmistetaan aina tiettyä käyttötarkoitusta varten, jota ei voi myöhemmin enää muuttaa. Louhintaan käytetään usein louhintajoukkoja, joissa on useita GPU- tai ASIC-mikrosiruja. ASIC-mikrosirun valinta vaikuttaa merkittävästi louhijan energiankulutukseen, sillä mikrosiru on louhijan energiaintensiivisin komponentti. ASIC-sirun lisäksi louhija tarvitsee toimiakseen myös muitakin elektronisia komponentteja. (Bitcoin Wiki 2019.)

Louhintaan tarvitaan lisäksi itse louhintajoukko, johon mikrosirut sijoitetaan. Mikrosirujen eli apusuorittimien lisäksi tarvitaan niin sanottu ”pääsuoritin”, eli CPU, joka suorittaa tietokoneohjelmiston konekieliset käskyt (Wikipedia 2021). Komponentit sijoitetaan alumiinirunkoon tai -laatikkoon, jossa on sisäänrakennetut tuulettimet. Lisäksi tarvitaan haluttu määrä RAM-muistia (Random-Access Memory), jonka avulla tietokone muun muassa pyörittää louhintaohjelmistoa. Kovalevylle tallennetaan tietokoneella olevat ohjelmistot, joten sellainen tulee olla osa louhintajoukkoa (Wikipedia 2021). Mukana on myös oltava emolevy (eng. mother board), joka yhdistää kaikki tietokoneen komponentit ja mahdollistaa niiden välisen yhteistyön. Tietokone tarvitsee energianlähteeksi akun, jonka teho voi olla tuhansia watteja. Tietokoneen liittäminen virtalähteeseen ja muihin elektronisiin komponentteihin vaatii erilaisia kaapeleita. Näistä elektronisista komponenteista muodostetaan yksi louhintajoukko, joita louhintafarmeilla on satoja. (Mineshop.eu 2018.)

3.2 Valmistus ja loppukäsittely

Louhintatietokoneen sisältämät elektroniset komponentit valmistetaan useista eri materiaaleista. Näihin kuuluu erilaisia metalleja, kuten alumiinia, kuparia sekä litiumia ja muovia moniin tarkoituksiin. Valmistukseen käytetään myös useita kemikaaleja, joiden avulla osien likaantumista ja kulumista pyritään estämään. (Fraktman 2002). Synteettisiä materiaaleja käytetään nykyään myös perinteisten raaka-aineiden rinnalla. (Investopedia 2020.)

Valmistuksessa päästöjä aiheutuu metallien louhinnasta sekä muiden materiaalien hankinnasta ja niiden jalostamisesta jatkokäyttöön. Valmistusprosessissa käytetään myös tuhansia litroja vettä ja paljon ympäristölle haitallisia kemikaaleja, kuten ftalaatteja muovin pehmentiminä ja useita bromattuja palonestoaineita. (Kriittiset materiaalit 2019; Tukes 2018.) Lisäksi tehtaiden energiankulutus ja käyttämä polttoaine lisäävät valmistuksen aikaisia päästöjä, kuten myös tuotteen jakelu kuluttajille.

ICT-laitteiden asianmukainen loppukäsittely koostuu pitkälti eri materiaalien erottelusta ja näiden jälkikäsittelystä. Vaarallisia materiaaleja sisältävät komponentit, kuten akku, erotel-

laan ensin ja käsitellään erikseen. Muut materiaalit erotellaan toisistaan, lajitellaan ja puhdistetaan jatkokäyttöä varten. Kierrätykseen kelpaamattomat materiaalit loppusijoitetaan asiaankuuluvalla tavalla. (Sims Lifecycle Services 2021).

3.2.1 Louhintalaitteiston valmistuksen ja loppukäsittelyn päästöt

Tarkastellaan työssä louhintatietokonetta, jonka voidaan valmistuksen kannalta olettaa olevan kuin tavallinen pöytätietokone. Ei huomioida kuitenkaan näytön valmistuksen vaikutuksia, sillä sellaista ei tarvita jokaiseen louhintatietokoneeseen. Oletetaan tavallisen pöytätietokoneen painavan 11,3 kg, johon louhintatietokoneiden painot suhteutetaan. (GameFaq 2018). Valitaan Ecoinvent-tietokannasta kasvihuonekaasupäästöt ilman näyttöä valmistettavalle pöytätietokoneelle ja muutetaan tarkasteltavat kasvihuonekaasut hiilidioksidiekvivalenteiksi. Ecoinvent on maailman johtava LCI-tietokanta (Life Cycle Inventory), joka tarjoaa monenlaista dataa eri prosessien ympäristövaikutuksista (Ecoinvent 2021). Huomioidaan kasvihuonekaasuista hiilidioksidin lisäksi myös metaani ja dityppioksidi. Valitaan samasta tietokannasta arvo myös käytetyn tietokoneen loppukäsittelyn päästöille vastaavien kasvihuonekaasujen suhteen. Tietokanta tarjoaa päästöille minimi ja maksimi arvot, joten käytetään näiden keskiarvoa. Muutetaan tarkasteltavat kasvihuonekaasut hiilidioksidiekvivalenteiksi käyttämällä metaanille (CH₄) GWP-kertoimena arvoa 25 ja dityppioksidille (N₂O) arvoa 298 (Tilastokeskus 2015).

Tarkastellaan päästöjä suosituimpien louhintatietokoneiden osalta. Huomioidaan omina kategorioina vain kolme suosituinta louhintatietokonetta ja yhdistetään muut käytössä olevat laitteet keskiarvojen avulla yhteen kategoriaan. Valmistuksen ja loppukäsittelyn päästöt saadaan tarkasteltavien kasvihuonekaasujen summana huomioimalla louhintatietokoneen ja pöytätietokoneen painojen suhde. Jotta päästöt voidaan ilmoittaa tarkasteltavaa toimintayksikköä kohden (mg-CO₂e/TH), tulee päästöt jakaa laitteen koko elinaikana ratkaistujen tiivisteiden määrällä. Keskimääräiseksi elinajaksi louhintatietokoneelle käytetään arvoa 1,5 vuotta (Köhler & Pizzol 2018). Taulukon 1 mukaan valmistuksen ja loppukäsittelyn päästöjen keskiarvoksi saadaan 0,16 kg-CO₂e/TH ja 0,0003 kg-CO₂e/TH.

Taulukko 1. Suosituimpien louhintatietokoneiden osuudet, painot sekä valmistuksen ja loppukäsittelyn päästöt.

Laite	Osuus [%]	Paino [kg]	Valmistuksen päästöt [mg-CO ₂ e/TH]	Loppukäsittelyn päästöt [mg-CO ₂ e/TH]
Antminer S9	79,9	4,2	0,14	0,00025
Avalon 841	8,6	4,7	0,15	0,00028
Ebang E10	6,7	9,8	0,24	0,00044
Muut	5,8	6,49	0,12	0,00022
Keskiarvo			0,16	0,0003

3.3 Käyttö

Louhintaprosessissa suurin osa päästöistä syntyy louhintatietokoneen käytön aikana. Haastavien algoritmien ratkaiseminen kuluttaa paljon energiaa, jonka tuottaminen synnyttää merkittäviä päästöjä. Tämän energian päästöihin vaikuttaa vahvasti louhintatietokoneiden maantieteellinen sijainti. Eri alueilla käytetään hyvin erilaisia energiantuotantomuotoja ja polttoaineita, joiden välillä on suuria päästöeroja. Huomioidaan käytön aikaisten päästöjen laskennassa louhintatietokoneiden energiankulutus ja maantieteellinen sijainti, sillä näillä tekijöillä on merkittävin vaikutus kokonaispäästöihin.

3.3.1 Louhintatietokoneiden energiankulutus

Tarkastellaan yhä louhintatietokoneita neljässä kategoriassa, joista kolme ensimmäistä kuvaavat vain yhtä laitetta. Selvitetään näille laitteille energiankulutus wattitunteina yhtä tarkasteltavaa toiminnallista yksikköä kohden. Louhintatietokoneille on löydettävissä valmistajien ilmoittama energiankulutus watteina. Lasketaan tämän arvon ja laitekohtaisen laskentatehon (eng. hash rate) avulla energiankulutus yksikössä J/TH. Kun tunnetaan arvo jouleina, se voidaan muuttaa wattitunneiksi. Saadaan taulukon 2 mukaisia arvoja louhintatietokoneiden energiankulutukselle.

Taulukko 2. Louhintatietokoneiden laskentatehokkuuden ja energiankulutuksen arvoja (ASIC Miner Value, 2021) sekä lasketut energiankulutuksen arvot.

Laite	Hash rate [TH/s]	Energiankulu- tus [W]	Energiankulu- tus [J/TH]	Energiankulu- tus [mWh/TH]
Antminer S9	13,5	1323	98,0	27,2
Avalon 841	13,6	1290	94,9	26,4
Ebang E10	18,0	1650	91,7	25,5
Muut	23,3	1837	79,0	21,2
Keskiarvo				25,2

3.3.2 Louhintafarmien sijainti ja alueilla hyödynnettävät energiamuodot

Louhinta on energiaintensiivistä, mikä tarkoittaa, että se on myös kallista. Tämän takia louhintafarmien sijainnit painottuvat alueille, joissa sähkö on edullista. Mongoliassa yksi kilowattitunti maksaa 4 U.S senttiä, eli huomattavasti vähemmän kuin Yhdysvalloissa, jossa hinta on noin 13 U.S senttiä. Itse louhinnan lisäksi tietokoneiden viilennys syö valtavasti sähköä, minkä takia pohjoisia sijainteja, kuten Islantia, suositaan viilennyskustannusten alentamiseksi. Työntekijöitä louhintafarmeilla on hyvin vähän, joten palkkakustannukset ovat alhaiset. (Peck 2017.)

Louhintatietokoneiden sijainti jakautuu maantieteellisesti taulukon 3 mukaisesti. Kiinassa sijaitsee suurin osuus laitteista ja pienimmät osuudet löytyvät muun muassa Islannista ja Venäjältä.

Taulukko 3. Louhintatietokoneiden maantieteellinen jakautuminen (Köhler & Pizzol 2019).

Alue	Osuus [%]
Kiina	53,5
Kanada	12,8
Yhdysvallat	13,7
Islanti	4
Georgia	4
Norja	4
Ruotsi	4
Venäjä	4

Taulukon 4 mukaan Kiinassa sähköntuotantoon käytetään noin 80 % fossiilisia polttoaineita, kun taas Islannissa fossiilisilla tuotetaan vain noin 20 % (Our World in Data 2019.) Tämä luo merkittäviä eroja maiden energijakaumiin (eng. energy mix). Käytetään Georgialle Bulgarian arvoja, sillä Georgialle ei ollut saatavilla omia arvoja.

Taulukko 4. Tarkasteltavien maiden energiankulutus lähteittäin (Our World in Data 20219.)

Alue	Öljy [%]	Hiili [%]	Kaasu [%]	Ydin [%]	Vesi [%]	Tuuli [%]	Au- rinko [%]	Biopolt- toaineet [%]	Muut uu- siutuvat [%]
Kiina	19,7	57,6	7,8	2,2	8,0	2,6	1,4	0,1	0,7
Kanada	31,7	3,9	30,5	6,3	24,0	2,1	0,3	0,6	0,7
USA	39,1	12,0	32,2	8,0	2,6	2,9	1,0	1,5	0,7
Islanti	18,5	2,2	0	0	54,8	0,03	0	0	24,5
Georgia (Bul- garia)	28,8	28,2	13,8	20	4,1	1,6	2,2	0	1,4
Norja	22,1	1,9	9,2	0	63,8	2,8	0,06	0	0,1
Ruotsi	25,7	1,7	1,7	26,7	26,1	7,9	0,2	2,7	5,2
Venäjä	22,0	12,2	53,7	6,3	5,8	<0,01	0,03	0	0,02

Huomioidaan laskennassa taulukon 4 mukaiset maiden energiajakaumat ja valitaan sähkön-
tuotannolle maakohtaiset päästökertoimet. Käytetään taulukon 5 mukaisia arvoja. Georgian
kertoimena käytetään Bulgarian maakohtaista arvoa.

Taulukko 5. Alueiden sähkötuotannon päästökertoimet energiajakaumat huomioiden (Grid Electricity Emis-
sion Factors 2020).

Alue	Päästökerroin [kgCO ₂ e/kWh]
Kiina	0,555
Kanada	0,13
USA	0,45322
Islanti	0,00011
Georgia	0,43737
Norja	0,01118
Ruotsi	0,01189
Venäjä	0,325

Tunnettaessa maiden sähkötuotannon aiheuttamat päästöt voidaan selvittää louhinnan maa-
kohtaiset päästöt eri louhintatietokoneille. Huomioidaan laskennassa myös valmistuksen
sekä loppukäsittelyn aiheuttamat päästöt ja lisätään ne louhinnan aikaisiin päästöihin. Selvi-
tetään myös vertailua helpottamaan maakohtaiset keskiarvot. Taulukon 6 mukaan voidaan
todeta, että saastuttavimmillaan louhinta tuottaa päästöjä 14,2 mgCO₂e/TH ja ympäristöys-
täväisimmillään 0,2 mgCO₂e/TH.

Taulukko 6. Louhinnan maa- ja laitekohtaiset päästöt koko tarkasteltavan elinkaaren ajalta

Alue	Antminer S9 [mgCO ₂ e/TH]	Avalon 841 [mgCO ₂ e/TH]	Ebang E10 [mgCO ₂ e/TH]	Muut [mgCO ₂ e/TH]	Keskiarvo [mgCO₂e/TH]
Kiina	15,244	14,774	14,369	12,295	14,2
Kanada	3,674	3,576	3,547	2,973	3,4
USA	12,473	12,092	11,778	10,062	11,6
Islanti	0,139	0,153	0,240	0,124	0,2
Georgia	12,042	11,674	11,374	9,715	11,2
Norja	0,440	0,445	0,522	0,367	0,4
Ruotsi	0,459	0,464	0,540	0,382	0,5
Venäjä	8,983	8,714	8,513	7,250	8,4
				Keskiarvo	6,2

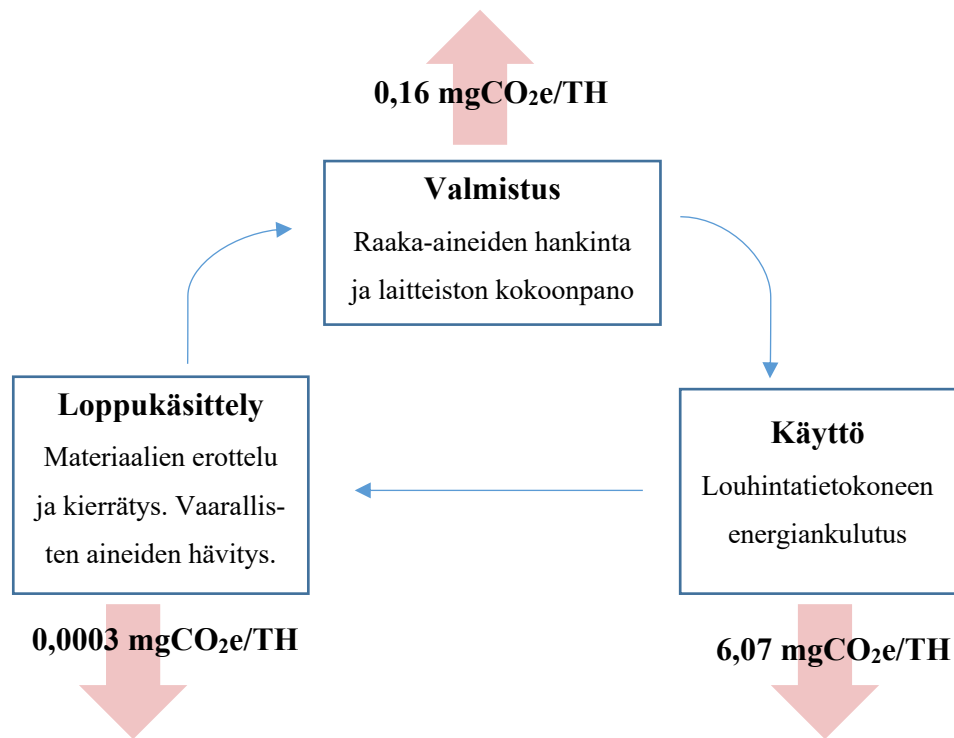
Selvitetään lisäksi vuoden 2020 helmikuun ja vuoden 2021 helmikuun aikana louhinnan aiheuttamien päästöjen suuruus hyödyntämällä Blockchain sivuston tarjoamaa dataa (2020) verkon laskentatehosta. Datasta on luettavissa päivittäiset laskentatehokkuuden keskiarvot viimeisen vuoden ajalle, joten lasketaan näiden arvojen avulla vuotuinen laskentatehokkuuden keskiarvo. Vuotuiseksi keskiarvoksi saadaan 125,6 MTH/s, eli toisin sanoen vuoden aikana laskettiin noin 3 960 000 000 MTH (miljoonaa TH). Kun huomioidaan laskentakapasiteetin maantieteellinen sijoittuminen, voidaan ratkaista syntyvien päästöjen suuruus. Taulukossa 7 esitetään vuoden aikaiset louhinnan päästöt eri maantieteellisiltä alueilta sekä louhinnan aiheuttamat kokonaispäästöt hiilidioksidiekvivalentti megatonneina.

Taulukko 7. Bitcoinin louhinnasta vuoden aikana syntyneet maakohtaiset- ja kokonaispäästöt. Louhittujen tiivisteen määrä esitetty yksikössä miljoona tiivistettä (MTH).

Alue	Määrä [MTH]	Päästöt [t-CO ₂ e]
Kiina	2 118 946 947	29 684 527 ≈ 29,7 Mt-CO ₂ e
Kanada	506 963 008	1 663 553 ≈ 1,7 Mt-CO ₂ e
Yhdysvallat	542 608 844	6 207 447 ≈ 6,2 Mt-CO ₂ e
Islanti	158 425 940	440 ≈ 0,0004 Mt-CO ₂ e
Georgia	158 425 940	1 749 010 ≈ 1,7 Mt-CO ₂ e
Norja	158 425 940	44 708 ≈ 0,04 Mt-CO ₂ e
Ruotsi	158 425 940	47 547 ≈ 0,05 Mt-CO ₂ e
Venäjä	158 425 940	1 299 651 ≈ 1,3 Mt-CO ₂ e
Yhteensä		40 696 883 ≈ 40,7 Mt-CO₂e

4 HIILIJALANJÄLKIARVIOINNIN TULOKSET

Bitcoinin louhinnan hiilijalanjälkiarvioinnissa tarkasteltiin kuvan 9 mukaisten 1,5 vuoden mittaisen elinkaaren eri vaiheiden aiheuttamia vaikutuksia louhinnan hiilidioksidipäästöihin. Kuten kuvasta ja aikaisemmista taulukoista näkyy, louhinnassa eniten päästöjä aiheutuu käytön aikana. Valmistuksen ja etenkin loppukäsittelyn vaikutukset jäävät lähes merkityksettömiksi käytön rinnalla. Vaikka valmistus ja loppukäsittely ovat erikseenkin jo ympäristölle haitallisia prosesseja, ovat louhinnan päästöt silti 38-kertaiset näiden yhteispäästöihin verrattuna yhtä toiminnallista yksikköä kohden.



Kuva 9. Bitcoinin louhinnan elinkaarenvaiheet ja niistä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt.

Taulukosta 2 saadaan selville yhden TH louhinnan kuluttavan energiaa 25,2 mWh/TH. Tämä arvo huomioi vain itse louhinnan aikaisen sähkönkulutuksen, eikä sisällä valmistuksen tai loppukäsittelyn sähkönkulutusta. Sähkönkulutuksen arvoon perustuen tarkasteltavan vuoden aikana louhinta olisi kuluttanut noin 100 TWh sähköä, eli suuruusluokaltaan suunnilleen Suomen kokonaisvuosikulutuksen verran (Tilastokeskus 2020.) Verrataan tätä arvoa keski-

verron suomalaisen sähkölämmitetyn neljän hengen omakotitalon vuotuiseseen sähkönkulutukseen arvoltaan 18 480 kWh/vuosi (Vattenfall 2021.) Täten louhinta kulutti helmikuiden 2020–2021 aikana sähköä 5 409 802 suomalaisen kotitalouden verran.

Taulukon 5 mukaan voidaan todeta keskimääräisten hiilidioksidipäästöjen olevan 6,2 mgCO₂e/TH. Luku sisältää valmistuksen, louhinnan sekä loppukäsittelyn aiheuttamat päästöt yhtä toiminnallista yksikköä (TH) kohden. Keskiarvona saatu arvo ei kuitenkaan tässä tapauksessa ole vertailukelpoinen, sillä maiden väliset erot ovat merkittäviä. Suurin osa louhinnasta tapahtuu Kiinassa, Yhdysvalloissa ja muun muassa Kanadassa, jossa energiantuotanto on vahvasti fossiilisiin polttoaineisiin tukeutuvaa. Tämän takia näissä maissa tapahtuva louhinta tuottaa päästöjä jopa kaksinkertaisesti enemmän keskiarvoon verrattuna. Eroja on myös huomattavissa maiden välillä, joissa louhintaa tapahtuu yhtä paljon. Islannissa ja Venäjällä louhintaa oletetaan tapahtuvan molemmissa noin 4 % verran koko kapasiteetista. Maiden aiheuttamat päästöt ovat silti hyvin eri suuruisia. Islannissa fossiilisten polttoaineiden osuus koko tuotannosta jää reilusti alle 50 %, kun taas Venäjällä niiden osuus kattaa yli puolet koko tuotannosta (Our World in Data 2019.) Tästä johtuen Islannissa yhden TH louhinta tuottaa hiilidioksidipäästöjä keskiarvoltaan noin 0,003 mg verran, kun taas Venäjällä vastaava luku on 8,2 mg.

4.1 Maksumenetelmien päästöjen vertailu

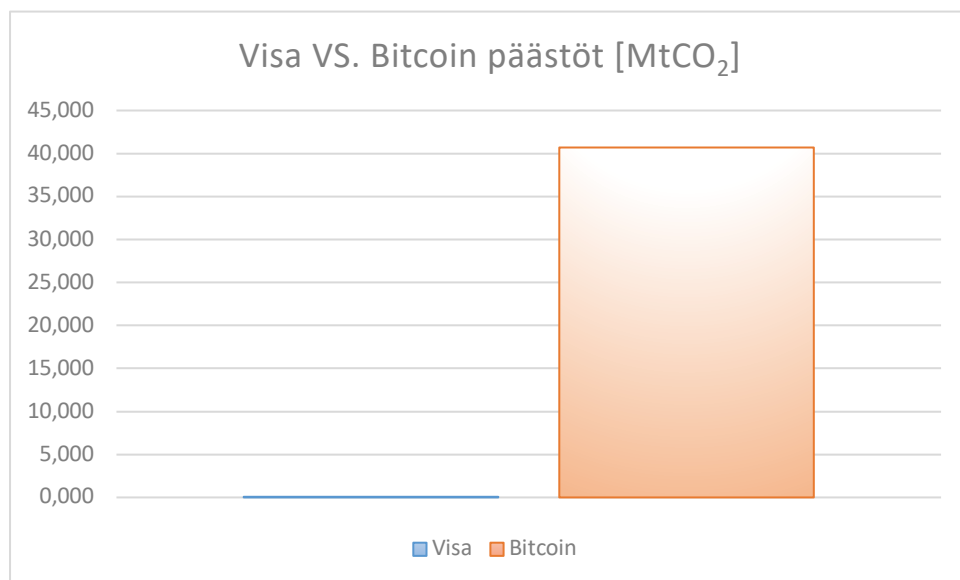
Bitcoinin tapauksessa paljon keskustelua on herättänyt massiiviset hiilidioksidipäästöt ja niiden vaikutus ympäristöön. Mikäli päästöjä pystyttäisi alentamaan, voisi virtuaalivaluuttojen käyttö osoittautua suosituimpia nyky menetelmiä kestävämmäksi ratkaisuksi.

Maksukortteina käytettävien muovisten korttien arvioidaan synnyttävän päästöjä noin 40 gCO₂ yhtä muovista normaalikokoista maksukorttia kohden. Täten globaaleiksi kokonaispäästöiksi pankkialalla käytettyjen maksukorttien osalta voidaan arvioida noin 40 000 tCO₂. (Trüggelmann 2012.) Tiedetään myös yhden Visa-transaktion synnyttävän hiilidioksidipäästöjä 0,45 gramman verran. Transaktioita tapahtuu sekunnissa noin 1700, joten koko vuoden aikana syntyneet hiilidioksidipäästöt ovat 24 000 tonnin luokkaa. (Digiconomist 2021). Yhtä Visa maksukorttia käytetään keskimäärin kolme vuotta. Kortin elinikä huomioiden voidaan

estimoida transaktioiden ja kortin vuotuisiksi yhteispäästöiksi 37 000 tCO₂e. Tämä tulos ei kuitenkaan huomioi yrityksen muusta toiminnasta aiheutuvia päästöjä.

Bitcoinin toimintaan ei liity fyysisiä liikkeitä tai henkilöstöä, mikä mahdollistaisi kanssikäymisen kuluttajien kanssa. Muiden maksuvälineiden tapauksessa tilanne on eri. Toiminnan kokoonpanoon kuuluvat konttorit, työntekijät, neuvontapisteet sekä kaikki muut asiakaslähtöisen toiminnan kannalta välttämättömät elementit. Nämä tietysti lisäävät maksuvälinettä ympäröivää materiaa ja toimintaa, jotka omalta osaltaan kuormittavat ympäristöä. Näistä aiheutuvien päästöjen suuruus vaihtelee yrityksen kokoluokan, sijainnin ja tavoitteiden mukaan. Tämän kaltaisista päästöistä ei ole saatavilla valmiiksi kerättyä dataa, joten näiden huomioimien vertailussa ei tiedonpuutteen vuoksi ole mahdollista. Vertailu Bitcoinin ja Visan toiminnan aiheuttamien päästöjen välillä jää siis vajaaksi, eikä luo täysin luotettavaa kuvaa eroista. Voidaan kuitenkin taulukon 8 mukaan arvioitujen suuruusluokkien avulla olettaa Visan toiminnan päästöjen jäävän merkittävästi pienemmiksi, vaikka isoja kokonaisuuksia, kuten yrityksen vuotuista energiankulutusta, ei huomioida.

Taulukko 8. Erot Visan ja Bitcoinin päästöjen välillä. Visan osalta ei ole huomioitu yrityksen energiankulutusta tai muun muassa liikkeiden sekä henkilöstön päästöjen vaikutuksia.



Huomioimatta vertailussa jää myös se, missä eri maksuvälineitä suurimmaksi osaksi käytetään. Verkkokaupoissa ja kivijalkaliikkeissä asioinnin välillä on päästöjen kannalta eroja. Esimerkiksi pakkausmateriaalien määrä, tuotteiden kulkemat toimitusmatkat, kuluttajien

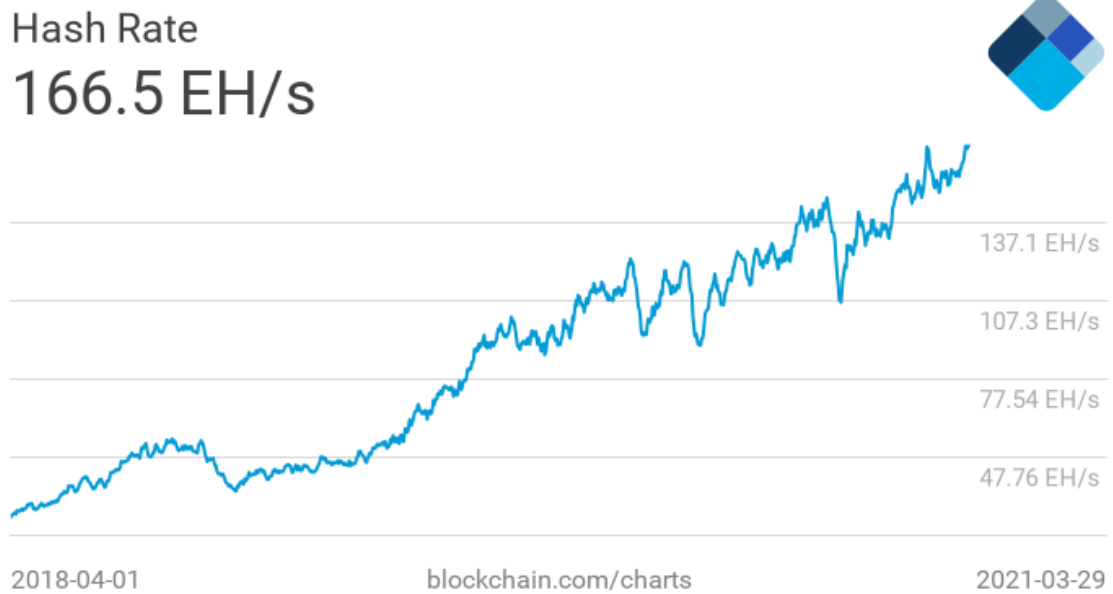
liikkeisiin saapuminen sekä tuotteiden palautukset vaikuttavat päästöihin. Molemmissa tapauksissa voidaan argumentoida ostosmuotojen olevan osaltaan kestävämpiä, mutta nyky-menetelmillä kuluttajan on helpompaa tehdä liikkeissä asioinnista ympäristöystävällisempää. Tuotteiden sovittamisella vältetään palautuksilta ja julkisilla voi kulkea kauppakeskukseen, joissa monesti useammat tarpeet on löydettävissä yhdellä käynnillä. (Ecocult 2020.) Tästä johtuen Bitcoinin käytön rajoittuneisuus verkkoon ei paranna sen asemaa maksuvälineiden kestävyuden vertailussa.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä lasketun Bitcoinin louhinnan vuotuiseksi hiilijalanjäljeksi saatiin 40,7 Mt-CO₂e. Päästöjen keskiarvoksi yhtä työssä määriteltyä toiminnallista yksikköä (TH) kohden saatiin 6,2 mgCO₂e/TH. Louhinnan hiilijalanjälkeen vaikuttaa merkittävimmin se, missä louhintaa suorittava tietokone sijaitsee, sillä energiantuotantomuoto on riippuvainen sijainnista. Uusiutuvilla polttoaineilla tuotettua sähköä käyttävät louhijat tuottavat huomattavasti vähemmän päästöjä verrattuna niihin, joiden kulutuksesta yli puolet tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla. Loppujen lopuksi kokonaispäästöihin vaikuttaa hyvin vähän itse tietokoneen ja sen komponenttien valmistus sekä loppukäsittely, sillä käytönaikainen energiankulutus on näihin verrattaessa valtavasti suurempi. Tietokoneen käyttöikä kasvattamalla tai komponenttien kierrätysastetta parantamalla voitaisiin vaikuttaa positiivisesti valmistuksen ja loppukäsittelyn päästöihin. Kokonaiskuvassa tämä ei kuitenkaan aiheuttaisi merkittävää muutosta, sillä nämä elinkaarenvaiheet aiheuttavat päästöistä vain alle 3 %.

Tämän työn laskennassa hyödynnettiin valmistusta ja loppukäsittelyä koskien tavalliselle pöytäkoneelle ilmoitettuja tietoja, jonka kaikki komponentit eivät ole täysin verrattavissa louhintatietokoneeseen. Itse louhintajoukon rakentamiseen käytetyt materiaalit ja energia jäivät työssä tarkastelun ulkopuolelle. Tähän erityisesti louhintafarmien tapauksessa sisältyy esimerkiksi alumiiniset rungot ja paljon erilaisia kaapeleita. Näiden huomioiminen lisäisi valmistuksesta aiheutuvia päästöjä ja raaka-aineiden menekkiä. Jotta työn laajuus pysyisi tavoitteessa, tehtiin oletuksia tietokoneen sekä muiden elektronisten komponenttien suhteen ja päädyttiin käyttämään saatavilla olevia pöytä tietokoneen arvoja.

Vastaavassa vuotta 2018 koskevassa tutkimuksessaan Köhler ja Pizzol esittivät tuloksina louhinnan kuluttavan energiaa 27,14 mWh/TH ja synnyttävän vuoden 2018 ajalta päästöjä 17,29 Mt-CO₂e verran. Huomioiden kuvan 9 mukaisesti verkon laskentatehon kasvu viimeisen kolmen vuoden aikana, voidaan tässä työssä laskettuja tuloksia pitää suhteellisen realistisina. Laskentateho on kasvanut noin 2,5-kertaisesti ja työssä saatu kokonaispäästöjen arvo 40,7 Mt-CO₂e on noin 2,5 kertaa suurempi kuin vuoden 2018 kokonaispäästöjen arvo.



Kuva 9. Laskentatehon muutos Bitcoin-verkossa välillä 1.4.2018 ja 29.3.2021 (Blockchain.com, 2021).

Virtuaalivaluutat ovat kasvattaneet suosiotaan vasta viime vuosien aikana, joten aiheesta toteutetut tutkimukset pohjautuvat vahvasti oletuksiin ja karkeisiin rajauksiin. Muun muassa Bitcoinin energiankulutuksesta ja hiilijalanjäljestä on esitetty rajuja tuloksia, joissa muihin maksumenetelmiin verrattessa kryptovaluutat saavat hyvin huonon maineen. Tutkimukseni edetessä kävi kuitenkin ilmi, kuinka vähän valmista dataa on saatavilla esimerkiksi pankkialan toiminnasta ja tämän aiheuttamien toimintojen hiilijalanjäljestä. Nykyiset maksumenetelmät, kuten maksukortit sekä käteinen, vaativat toimiakseen paljon konkreettista toimintaa ja materiaalia itse maksuvälineen lisäksi. Tämän huomioiminen globaalilla tasolla on haastavaa, mikä on varmasti osaltaan vaikuttanut toteutettujen tutkimusten vähäisyyteen. Virtuaalivaluutat tarjoavat tulevaisuuden kannalta lähes päästöttömän mahdollisuuden, mikäli käytetty energia tuotettaisiin uusiutuvilla polttoaineilla. Toki näitäkin maksumenetelmiä ympäröivät monet toimet ja tavarat, joiden valmistus sekä käyttö synnyttävät päästöjä. Jotta voitaisiin todella nähdä eri maksumenetelmien ilmastonmuutospotentialit, tulisi tutkimuksessa huomioida kaikki ympäröivä toiminta sekä tulevaisuuden energia- ja maksutrendit.

6 YHTEENVETO

Kehittyvä teknologia ja sen tarjoamat mahdollisuudet tuovat mukanaan uusia innovaatioita jokapäiväiseen elämään. Näistä pinnalle nousevat tuotteet ja palvelut, joiden käyttö on kuluttajalle vaivatonta ja tarjoaa etuja. Lohkoketjuteknologiaa hyödyntävä virtuaalivaluutta Bitcoin on noussut suosioon muun muassa tarjoamiensa sijoitusmahdollisuuksien ja uniikkien käyttöominaisuuksiensa takia. Uusien mahdollisuuksien mukana tulee monesti myös uusia uhkia, joilta ei olla säästyty Bitcoinin tapauksessa. Virtuaalivaluuttojen energiaintensiivinen toiminta on herättänyt keskustelua kryptovaluuttojen ympäristövaikutuksista ja aiheuttanut pohdintaa maksumenetelmien ekologisuudesta. Virtuaalivaluutat voisivat kuitenkin tulevaisuudessa tarjota vähäpäästöisen vaihtoehdon nykyisten maksumenetelmien rinnalla, mikä luo niistä tutkimisen arvoisia kohteita.

Tässä työssä perehdyttiin ensimmäisen ja suosituimman kryptovaluutan, Bitcoinin, toimintaan sekä arvioitiin Bitcoinin louhinnan hiilijalanjäljen suuruutta. Hiilijalanjälkianalyysi toteutettiin sisällyttämällä valmistuksen, käytön ja loppukäsittelyn aiheuttamat hiilidioksidipäästöt laskentaan. Kasvihuonekaasuista huomioitiin hiilidioksidin lisäksi metaani ja dityypioksidi. Valmistuksessa ja loppukäsittelyssä jätettiin huomioimatta tehtaiden ym. vaatima energiankulutus eikä käytön ajalta huomioitu laitteiden jakelun aiheuttamia vaikutuksia. Laskennassa huomioitiin louhintakapasiteetin maantieteellinen jakautuminen ja näillä alueilla esiintyvien louhijoiden määrät.

Työssä määriteltiin laskentaa varten toiminnallinen yksikkö, johon syntyvät päästöt suhteutettiin. Toiminnalliseksi yksiköksi valittiin koko tarkasteltavan elinkaaren ajalta syntyvät päästöt yhtä louhittua TH kohden. Työssä lasketuiksi Bitcoinin louhinnan hiilijalanjälkiarvioinnin tuloksiksi saatiin vuoden ajalta noin 40,7 Mt-CO₂e. Päästöjen keskiarvoksi yhtä toiminnallista yksikköä kohden saatiin 6,2 mgCO₂e/TH. Työssä tehdyn elinkaariarvioinnin pohjalta voidaan todeta, että suurin osa louhinnan päästöistä syntyy käytön aikana. Tämä johtuu tietokoneiden valtavasta energiankulutuksesta ja alueiden vahvasta fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Valmistus ja loppukäsittely aiheuttavat käyttöön nähden lähes merkityksettömän määrän päästöjä. Tuloksiin liittyy epävarmuuksia, sillä aiheesta toteutettuja tutkimuksia ja dataa on saatavilla niukasti. Laskennassa on jouduttu tekemään paljon oletuksia

ja yksinkertaistuksia, jotka omalta osaltaan vääristävät tuloksia. Tulokset ovat kuitenkin järkevien arvojen rajoissa ja pohjautuvat perusteelliseen laskentaan.

Verrattaessa Bitcoinin louhinnan päästöjä Visa maksukorttien ja transaktioiden päästöihin huomattiin Bitcoinin päästöjen olevan merkittävästi suuremmat. Vertailu ei sisältänyt toimintojen kaikkia osa-alueita ja tarjoaa siksi kyseenalaisia tuloksia, mutta antaa kuitenkin osviittaa siitä millaisia erot näiden maksumenetelmien välillä ovat. Jotta kryptovaluuttoja olisi kannattavaa käyttää maksumenetelminä nykyisten vaihtoehtojen rinnalla tai sijasta, tulisi niiden toimintaan tarvittavan teknologian kehittyä sekä sähköntuotantoon käytettävien fossiilisten polttoaineiden määrän vähentyä.

LÄHTEET

Binance academy. 2021. Mempool. [verkkodokumentti]. [viitattu 10.2.2021]. Saatavilla: <https://academy.binance.com/en/glossary/mempool>

Bitcoin wiki. 2019. ASIC. Avoin tietosanakirja. [päivitetty 24.4.2019]. [viitattu 10.2.2021]. Saatavilla: <https://en.bitcoin.it/wiki/ASIC>

Bitcoin Wiki. 2020a. Bitcoin. Avoin tietosanakirja. [päivitetty 23.6.2020]. [viitattu 24.1.2021]. Saatavilla: <https://en.bitcoin.it/wiki/Mining>

Bitcoin.org. 2021a. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.1.2021]. Saatavilla: <https://bitcoin.org/en/innovation>

Bitcoin.org. 2021b. Vocabulary. [verkkodokumentti]. [viitattu 10.2.2021]. Saatavilla: <https://bitcoin.org/en/vocabulary#hash-rate>

Bitcoinkeskus. 2020a. Mikä on paras kryptovaluutta vuonna 2021. [verkkodokumentti]. [julkaistu 20.1.2021]. [viitattu 24.1.2021]. Saatavilla: <https://bitcoinkeskus.com/paras-kryptovaluutta/>

Bitcoinkeskus. 2020b. Bitcoin-opas aloittelijoille. [verkkodokumentti]. [julkaistu 17.3.2020]. [viitattu 26.1.2021]. Saatavilla: https://bitcoinkeskus.com/bitcoin-opas/#Bitcoin_selkaranka_on_blockchain_eli_lohkoketju

Blockchain.com. 2021. Explorer: Network Difficulty. [verkkodokumentti]. [viitattu 26.1.2021]. Saatavilla: https://www.blockchain.com/explorer?utm_campaign=dcom-nav_explorer

Buy Bitcoin Worldwide. 2021. Bitcoin Mining Hardware ASICs. [päivitetty 2.3.2021]. [viitattu 4.3.2021]. Saatavilla: <https://www.buybitcoinworldwide.com/mining/hardware/#ant-miners9>

Chen, J. Investopedia. 2021. Fiat Money. [verkkodokumentti]. [julkaistu 23.4.2020]. [viitattu 10.2.2021]. Saatavilla: <https://www.investopedia.com/terms/f/fiatmoney.asp#:~:text=Fiat%20money%20is%20a%20government,U.S.%20dollar%2C%20are%20fiat%20currencies>.

Claudelin Anna. 2020. Hiilijalanjälki. PowerPoint -esitys. Moodle: Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. 24.

Doyle, M. Ecocult. 2020. Is It More Sustainable to Shop Online or in the Store. [julkaistu 30.11.2020]. [viitattu 23.3.2021]. Saatavilla: <https://ecocult.com/sustainable-shop-online-store-packaging/>

Ecoinvent. 2021. [verkkodokumentti]. [viitattu 12.4.2021]. Saatavilla: <https://www.ecoinvent.org/about/about.html>

EcoReal.fi. 2020. Hiilijalanjäljen laskenta on ensimmäinen askel kohti päästöjen pienentämistä pysyvästi. [verkkodokumentti]. [julkaistu 27.4.2020]. [viitattu 15.2.2020]. Saatavilla: <https://www.ecoreal.fi/hiilijalanjaljen-laskenta-on-ensimmainen-askel-kohti-paastojen-pienentamista-pysyvasti/#:~:text=Hiilijalanj%C3%A4lki%20voidaan%20laskea%20joko%20yrityksen,kuljetusten%20ja%20j%C3%A4tehuollon%20p%C3%A4st%C3%A4st%C3%B6jen%20osalta>.

EPA. 2020. Understanding Global Warming Potentials. [päivitetty 9.9.2020]. [viitattu 9.3.2021]. Saatavilla: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>

Finto.fi. 2021. Kryptografia. [verkkodokumentti]. [viitattu 10.2.2021]. Saatavilla: <https://finto.fi/yso/fi/page/p5480>

Forbes.com. 2019. Of Course Your Phone Is Listening to You. [verkkodokumentti]. [julkaistu 3.9.2019]. [viitattu 29.1.2021]. Saatavilla: <https://www.forbes.com/sites/nathanpetti-john/2019/09/03/of-course-your-phone-is-listening-to-you/?sh=1fd248386a3f>

Gold.org. World Gold Council. 2021. How gold is mined. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.1.2021]. Saatavilla: <https://www.gold.org/about-gold/gold-supply/how-gold-is-mined>

Helsingin kaupungin ympäristökeskus. 2002. Bromatut palonestoaineet ympäristössä. [julkaistu 2/2002]. [viitattu 17.3.2021]. Saatavilla: <https://www.hel.fi/static/ymk/julkaisut/julkaisu-02-02.pdf>

Kent, P. & Bain, T. 2020. Cryptocurrency Mining for Dummies. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc. 346. ISBN 978-1-119-57929-8.

MineShop.eu. 2018. [verkkodokumentti]. [viitattu 10.2.2021]. Saatavilla: <https://mineshop.eu/processor-cpu/amd-ryzen-9-3900x-gen-3-12-core-am4-cpu-processor/>

Nature. 2018. Cryptocurrency mining is neither wasteful nor uneconomic. [verkkodokumentti]. [julkaistu 21.3.2018]. Saatavilla: <https://www-nature-com.ezproxy.cc.lut.fi/articles/d41586-018-03391-2>

Our World in Data. 2019. Energy Mix. [viitattu 17.3.2021]. Saatavilla: <https://ourworldindata.org/energy-mix>

Peck, M. IEEE Spectrum. 2017. Why the Biggest Bitcoin Mines Are in China. [julkaistu 4.10.2017]. [viitattu 17.3.2021]. Saatavilla: <https://spectrum.ieee.org/computing/networks/why-the-biggest-bitcoin-mines-are-in-china>

Researchgate.net. 2018. The structure of transaction in a Bitcoin blockchain. [verkkodokumentti]. [viitattu 26.1.2021]. Saatavilla: https://www.researchgate.net/figure/The-structure-of-transaction-in-a-Bitcoin-blockchain_fig1_324791073

Rothstein, A. New Scientist. 2017. The End of Money. Great Britain: John Murray Learning. 288. ISBN 978-1473-62953-0. Sims Lifecycle services. 2021. How computers are recycled. [viitattu 13.3.2021]. Saatavilla: <https://www.simslifecycle.com/business/e-waste-recycling/how-we-do-it/>

Sjöstedt, T. Sitra.fi. 2018. Mitä nämä käsitteet tarkoittavat? [verkkodokumentti]. [julkaistu 26.6.2018]. [viitattu 15.2.2021]. Saatavilla: <https://www.sitra.fi/artikkelit/mita-nama-kasitteet-tarkoittavat/>

TechTerms.com. 2021. Node. [verkkodokumentti]. [viitattu 10.2.2021]. Saatavilla: <https://techterms.com/definition/node>

TechTerms.com. 2021. P2P. [verkkodokumentti]. [viitattu 10.2.2021]. Saatavilla: <https://techterms.com/definition/p2p>

Tilastokeskus. 2020. Energian hankinta ja kulutus. [julkaistu 21.12.2020]. [viitattu 23.3.2021]. Saatavilla: <https://www.tilastokeskus.fi/til/ehk/index.html>

Trüggelmann, U. ICMA Card Manufacturing. 2012. Carbon Footprint of the Card Industry. Viitattu 23.3.2021]. Saatavilla: http://www.icma.com/ArticleArchives/CarbonFootprint_SE2-12.pdf

Tukes. Sähkölaitteiden kemikaalit. [viitattu 17.3.2021]. Saatavilla: <https://tukes.fi/luulot-poiskemikaaleista/sahkolaitteiden-kemikaalit>

Vero.fi. 2020. Virtuaalivaluutat vakiintuneet vaihdannan välineiksi. [verkkodokumentti]. [julkaistu 24.8.2020]. [viitattu 29.1.2021]. Saatavilla: <https://www.vero.fi/harmaa-talous-rikkisuus/ilmi%C3%B6t/virtuaalivaluutat/>

Wikipedia.org. 2015. Hajautusalgoritmi. [verkkodokumentti]. [julkaistu 19.3.2015]. [viitattu 10.2.2021]. Saatavilla: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Hajautusalgoritmi>

Wikipedia.org. 2021. Kiintolevy. Avoin tietosanakirja. [päivitetty 24.1.2021]. [viitattu 22.2.2021]. Saatavilla: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Kiintolevy>

Wikipedia.org. 2021. Suoritin. Avoin tietosanakirja. [päivitetty 22.2.2021]. [viitattu 22.2.2021]. Saatavilla: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Suoritin>

Yle.fi. 2018. Bitcoin teki 28-vuotiaasta miljonäärin - 500 euron sijoituksella 2 miljoonan euron tulot. [verkkodokumentti]. [julkaistu 1.11.2018]. [viitattu 29.1.2021]. Saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-10487285>