

Samuli Pohjola

NAND FLASH- JA MAGNEETTISTEN MUISTIEN ASEMA TIETOKONEISSA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Sakari Lahti
Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Samuli Pohjola: NAND FLASH- JA MAGNEETTISTEN MUISTIEN ASEMA
TIETOKONEISSA

Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tietotekniikka
Huhtikuu 2020

Tässä työssä tutkittiin kahden massamuistiteknologian asemaa nykytietokoneiden massamuisteina. Nämä kaksi teknologiaa ovat NAND Flash -muistit ja magneettiset levymuistit. Yhdessä ne kattavat suurimman osan maailmassa valmistetuista massamuisteista. Tutkimus toteutettiin kirjallisuusselvityksenä, jossa tutustuttiin massamuistiteknologioiden toimintaperiaatteisiin ja teknologioilla toteutettujen laitteiden ominaisuuksiin. Näiden ominaisuuksien pohjalta havainnointiin teknologioiden suurimmat erot ja tehtiin päätelmiä teknologioiden asemasta kuluttajamarkkinoilla sekä yritys- ja palvelinkäytössä.

Laitteiden ominaisuuksien ja toimintaperiaatteen pohjalta havaittiin, että NAND Flash -muistit tarjoavat selvästi suuremman nopeuden sekä satunnaisissa että peräkkäisissä luku- ja kirjoitusoperaatioissa. Levymuistit sen sijaan ovat paljon NAND Flash -muisteja halvempia bittiä kohti ja kapasiteetiltaan suurempia. Kannettavissa ja akkukäyttöisissä tietokoneissa NAND Flash -muisteilla on kuitenkin selvä etu pienemmän virrankulutuksensa ja paremman iskunkestävyytensä takia.

Näiden havaintojen pohjalta pääteltiin, että NAND Flash -muisteilla on vakaa asema kuluttaja- ja yrityskäytössä. Levymuistien ainoa vahvuus näissä käyttökohteissa on niiden halpa hinta, joka edelleen pitää ne varteenotettavana vaihtoehtona. Palvelinkäytössä kiintolevyillä on hyvä asema, koska NAND Flash -muistit eivät sovellu hyvin palvelinkäyttöön nopeamman kulumisensa takia. Tältä pohjalta tehtiin johtopäätös, jossa todettiin, että NAND Flash -muistien asema tulee parantumaan ainakin kuluttaja- ja yrityskäytössä, mutta levymuistit eivät kuitenkaan katoa markkinoilta lähiaikoina.

Avainsanat: massamuisti, NAND Flash -muisti, kiintolevy, SSD-levy

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. MASSAMUISTI TIETOKONEEN MUISTIHIERARKIASSA	3
3. NAND FLASH -MUISTI	6
3.1 NAND Flash -muistin toimintaperiaate	6
3.2 Useiden kynnysjännitetasojen hyödyntäminen NAND Flash -muistikenoissa	7
3.3 NAND Flash -muistien luotettavuusongelmat	8
3.4 3D NAND Flash -muistit	9
4. MAGNEETTISET LEVYMUISTIT	11
4.1 Magneettisen levymuistin toimintaperiaate	11
4.2 Kiintolevyjen kapasiteetti sekä luku- ja kirjoitusnopeus	12
4.3 Kiintolevyjen luotettavuus	13
5. MUISTITEKNOLOGIOIDEN VERTAILU	14
5.1 Erot hinnassa, kapasiteetissa ja nopeudessa	16
5.2 Muut maininnan arvoiset erot	17
5.3 Kuluttajan näkökulma	18
5.4 Yrityskäytön ja palvelinkäytön näkökulma	19
5.5 Tulevaisuudennäkymät	20
6. YHTEENVETO	21
LÄHTEET	23

LYHENTEET JA MERKINNÄT

DRAM	engl. dynamic random-access memory, dynaaminen satunnaiskäyttömuisti
ECC	engl. error-correcting code, virheenkorkauskoodi
FN	Fouler–Nordheim-tunneleittuminen
HDD	engl. hard disk drive, kiintolevyasema
MLC	engl. multi-level cell, neljä tai useampia jännitetasoja sisältävä muistikkenno
NVMe	engl. non-volatile memory express, haihtumattomien muistien tiedonsiirtoprotokolla
PCIe	engl. peripheral component interconnect express, lisälaitteiden keskinäisliitäntä väylä
QLC	engl. quad-level cell, 16 jännitetasoa sisältävä muistikkenno
SLC	engl. single-level cell, vain 2 jännitetasoa sisältävä muistikkenno
SRAM	engl. static random-access memory, staattinen satunnaiskäyttömuisti
SSD	engl. solid-state drive, puolijohdelevy
TLC	engl. triple-level cell, 8 jännitetasoa sisältävä muistikkenno
TBW	engl. total bytes written, kirjoitettujen tavujen kokonaismäärä
WRL	engl. workload rate limit, työkuormasuhderaja
B	tavu eli kahdeksan peräkkäisen bitin jono
B/s	tavua sekunnissa
G	normaaliputoamiskiihtyvyyden monikerta
IOPS	engl. input/output operations per second, sisään- ja ulostulo-opeatioita sekunnissa

1. JOHDANTO

Nykyaikaisissa tietokoneissa muistin tarve on jatkuvassa nousussa. Tämä on ollut totta koko tietokoneiden kehityshistorian ajan, eikä muutosta ole näkyvissä. Tietokoneita käytetään kasvavassa määrin esimerkiksi pelaamiseen ja pelien kehittyessä suurenee myös niiden vaatima muistin määrä. Varsinkin pelien grafiikan vaativuus nostaa paljon muistin tarvetta. Muistivaatimuksiltaan laajat pelit, jotka voivat viedä jopa satoja gigatavuja massamuistia, vaativat nopeaa massamuistia toimiakseen optimaalisesti [1]. Harva pelaaja jaksaa odottaa useampaa minuuttia pelin alkulatausta ilman, että latauksen hitaus käy ärsyttäväksi. Samaan aikaan erilaiset videoiden, elokuvien ja pelien suoratoistopalvelut yleistyvät, mikä puolestaan luovat uusia vaatimuksia palvelinkäytössä oleville massamuisteille.

Kuluttajakäytön lisäksi myös yritysmaailma vaatii tehokkaampia massamuistitratkaisuja. Big data -sovellukset ja oppivat järjestelmät vaativat valtavia määriä tallennustilaa. Joidenkin arvioiden mukaan ihmiset luovat muutaman exabitin edestä dataa päivittäin [2]. Kaikkea tätä dataa ei tietenkään kannata tallentaa, mutta murto-osankin tallentaminen vaatii jo suuren määrän massamuistia. Tämän lisäksi myös muistin nopeus on tärkeää, sillä nopeampi muisti mahdollistaa nopeamman datan analysoinnin tai oppivan järjestelmän opetuksen.

Massamuisteille asetettujen vaatimuksien takia nykyisillä massamuistimarkkinoilla kilpailee vain kaksi vartenotettavaa massamuistiteknologiaa: NAND Flash -muistit ja magneettiset levymuistit. Tässä työssä tutustutaan näihin kahteen massamuistiteknologiaan ja niiden asemaan nykytietokoneissa. Työssä tutustutaan NAND Flash -muisteihin hieinan tarkemmin kuin levymuisteihin, koska NAND Flash -teknologia on uudempi ja nopeammin kehittyvä. Muistityyppien esittelyn lisäksi työssä vertaillaan niiden ominaisuuksia kuluttajan, yrityksen ja palvelinkäytön näkökulmasta. Tämän lisäksi arvioidaan eri muistityyppien tulevaisuudennäkymiä. Näiden tietojen pohjalta voidaan tehdä johtopäätös näiden muistiteknologioiden asemasta nykytietokoneiden muisteina. Työssä tutkimusmenetelmänä käytetään kirjallisuusselvitystä, jossa tutustutaan alan kirjallisuuteen ja laitevalmistajien datalehtiin ja tehdään johtopäätöksiä näiden esittämien arvojen pohjalta.

Työn luvussa 2 käsitellään massamuistia yleisesti tietokoneen komponenttina ja esitellään niiden paikka tietokoneen muistihierarkiassa. Luvussa 3 esitellään Flash-muistit yleisesti ja syvennytään NAND Flash -muistin toimintaperiaatteisiin ja ominaisuuksiin. Työn luvussa 4 tutustutaan magneettisiin tallennusmenetelmiin ja käydään läpi kiintolevyjen perustoimintaperiaate ja muutamia muita ominaisuuksia. Tämän jälkeen luvussa 5 vertaillaan aiemmin esitettyjen muistityyppien ominaisuuksia eri näkökulmista. Lisäksi kartoitetaan eri muistityyppien mahdollisia tulevaisuudennäkymiä. Työn lopussa luvussa 6 kootaan yhteen työssä esitetyt havainnot ja johtopäätökset.

2. MASSAMUISTI TIETOKONEEN MUISTI-HIERARKIASSA

Tietokoneen muistilla tarkoitetaan laitetta, jota käytetään datan ja ohjelmien tallentamiseen väliaikaisesti tai pysyvästi. Tietokone tallentaa tietoa binäärikoodina eli jonona ykkösiä ja nollia. Jokainen tämän binäärijonon biteistä tallennetaan fyysiseen järjestelmään, joka voi olla kummassa tahansa kahdesta vakaasta tilasta: 1 tai 0. [3]

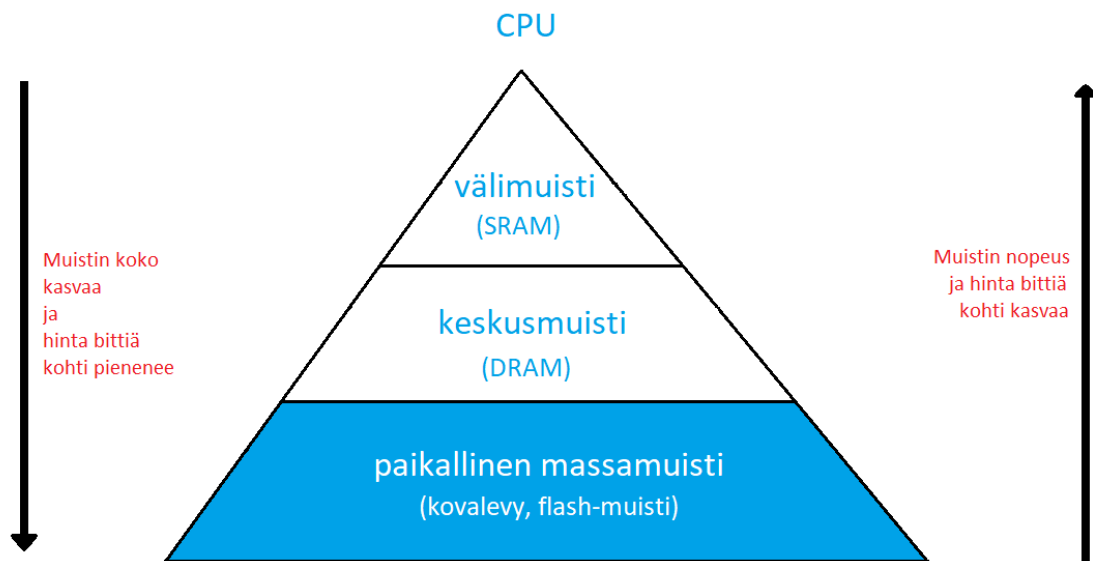
Muisti on aina ollut tärkeä osa tietokoneita. Maailman ensimmäisessä tietokoneessa ENIAC:ssa oli muistikomponentti, joka koostui 20 sähköisestä varaajasta, joista kukin pystyi säilyttämään yhden numeron [4]. Kyseisiä varaajia kuitenkin käytettiin myös yhteen ja vähennyslaskujen tekemiseen, mikä aiheutti sen, että muistissa ollut luku katosi. Tästä eteenpäin tietokoneiden muistit ovat kehittyneet paljon, ja nykyään jopa suhteellisen halvoissa kuluttajakäyttöön valmistetuissa massamuistilaitteissa voi olla useita tera-bittejä muistia.

Tietokoneiden muistin kehittyessä on niihin tullut mukaan myös useampia erityyppisiä muisteja. Siinä missä ENIAC:ssa oli vain vähän yhdenlaista muistia, voi nykyisissä tietokoneissa olla useita eritasoisia muisteja [5, s. 456]. Tämän takia erilaisille muistityypeille on määritetty omat nimensä ja niiden keskinäisiä suhteita kuvaamaan on määritetty muistihierarkia.

Muistihierarkia koostuu useista muistitasoista, joilla on erilainen nopeus ja koko. Hierarkian korkeimmalla tasolla sijaitsevat nopeimmat muistit, jotka ovat lähellä prosessoria. Tämän tason muisteja kutsutaan välimuisteiksi [5, s. 453]. Välimuistit on usein jaettu useampaan eri tasoon, jolloin nopeimmat ja pienimmät ovat lähimpänä prosessoria. Yleensä välimuistit toteutetaan SRAM-teknologialla [6, s. 13–14]. SRAM tulee sanoista static random access memory ja tarkoittaa nopeaa muistia, jonka muistialkiot säilyttävät datansa niin kauan kuin laitteen virta on päällä [7].

Hierarkian seuraavalla tasolla on keskusmuisti, joka on hieman hitaampaa muistia kuin välimuistit, mutta myös kooltaan suurempi. Nykyaikaisissa tietokoneissa keskusmuisti on toteutettu DRAM-teknologialla. DRAM tulee sanoista dynamic random access memory ja on nopeaa muistia, joka vaatii jaksottaista muistin virkistämistä säilyttääkseen tallennetun datan [5 s.19]. Kolmantena hierarkiassa on paikallinen massamuisti, joka on paikallisista muisteista kooltaan kaikkein suurin, mutta nopeudeltaan hitain. Paikallinen massamuisti on usein Flash-muistia tai kiintolevyjä. Flash-muistiin ja kiintolevyihin palataan myöhemmin tässä työssä. [5, s. 453, 6, s. 13–14]

Hierarkkisen muistirakenteen ideana on tuoda tietokoneen toiminnallisuus lähemmäksi ideaalia konetta, jossa on loputtomasti muistia ja välittömät vasteajat, säilyttäen kuitenkin taloudelliset realiteetit [8, s. 141–142]. Tämä pyritään saavuttamaan yhdistämällä suuren ja hitaan ja pienen ja nopean muistin edut. Hierarkkisessa muistirakenteessa prosessori hakee dataa aina lähimmältä muistilohkolta, joka tarvittaessa hakee tätä dataa seuraavalta lohkolta [5, s. 454–455]. Datan hakua jatketaan aina seuraavalta lohkolta, kunnes se löytyy. Tämän jälkeen data kopioidaan ylempiin lohkoihin. Tällä tavalla hyödytään hitaimman muistin suuresta koosta, mutta saadaan myös lisää nopeutta suoritukseen optimoimalla esimerkiksi käyttöjärjestelmän muistinhallinta hyödyntämään tätä hierarkkista rakennetta. Muistihierarkia on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. Tietokoneen muistihierarkia havainnollistettuna.

Kuvasta 1 nähdään, että massamuisti löytyy tietokoneen muistihierarkian pohjalta. Hierarkian määritelmään perustuen tämä tarkoittaa sitä, että massamuisti on tietokoneen hitainta muistia, mutta samalla yleensä kooltaan suurinta. Massamuistia voidaan kuvata pysyväksi oheismuistiksi [9]. Tässä määritelmässä pysyvällä viitataan siihen, että massamuistiteknoologioilla toteutetuissa muisteissa oleva data säilyy, vaikka tietokone sammutetaan [10]. Määritelmän sanalla oheismuisti sen sijaan viitataan siihen, että ohjelman suorittamiseen ei välttämättä tarvita massamuistia, sillä ohjelman käskyjen tulee olla tietokoneen keskusmuistissa, jotta prosessori voi lukea niitä [11]. Tämän lisäksi kaikki data, johon käskyt viittaavat, tulee myös olla keskusmuistissa ohjelmaa suoritettaessa.

Aiemman määritelmän perusteella voitaisiin olettaa, että massamuisti on tietokoneissa toissijaista. Tämä ei kuitenkaan pidä paikkaansa, koska tietokoneen käyttöjärjestelmää tai muita ohjelmia ei saada päälle ilman jonkinlaista massamuistia. Massamuistiin tallennetaan alustava ohjelma, jota tarvitaan aktivoimaan tietokoneen perustoiminnallisuudet

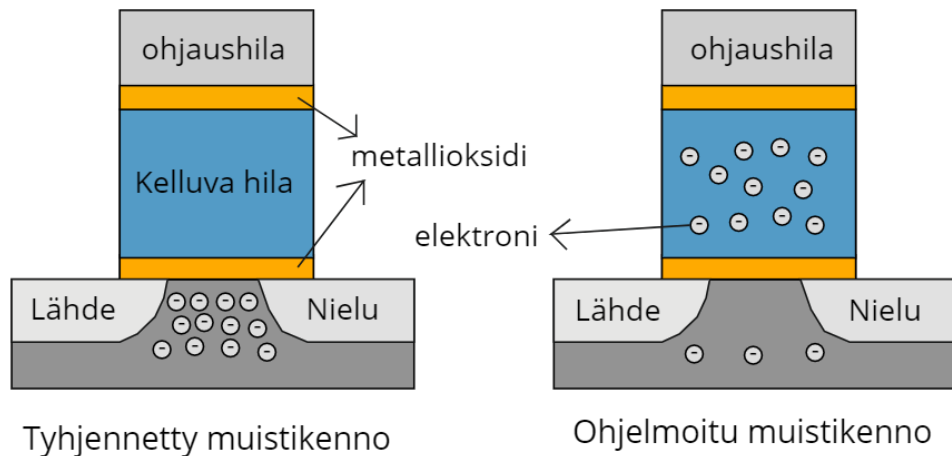
käynnistyksen yhteydessä [12, s. 23]. Tietokoneen käyttöjärjestelmä ja muut ohjelmat tallennetaan myös massamuistiin, jotta ne säilyisivät käynnistysten välillä. Tietokoneen käynnistyessä käyttöjärjestelmä ladataan keskusmuistiin, josta sen käskyjä voidaan suorittaa. Pitkäaikaissäilytyksen lisäksi massamuisteilla on roolinsa myös ohjelmien suorituksen aikana: nykyaikaiset käyttöjärjestelmät osaavat varata muistia dynaamisesti ohjelman suorituksen aikana, mikä mahdollistaa sen, että välimuistien ja keskusmuistin täytyessä käyttöjärjestelmä pystyy varamaan muistia ohjelman käyttöön myös tietokoneen massamuistista [12, s. 23]. Tämä ominaisuus mahdollistaa paljon muistia varaa-
vien ohjelmien suorittamisen järjestelmissä, joissa keskusmuisti ei suoritukseen tavallisesti riittäisi.

3. NAND FLASH -MUISTI

Flash-muisti tallentaa bittejä vangitsemalla varauksen rakenteeseensa tavalla, joka estää varauksen purkautumisen jopa virran olleessa pois päältä [13]. Flash-muistin kehitti tohtori Fujio Masouka vuonna 1984 työskennellessään Toshiba-yritykselle [14]. Tämän jälkeen Flash-muistille on kehitetty useita erilaisia kennotyyppejä ja arkkitehtuureja, mutta vain kahta näistä arkkitehtuureista voidaan pitää standardeina puolijohdeteollisuudessa [10]. Nämä kaksi arkkitehtuuria ovat NOR Flash ja NAND Flash. NOR Flash nousi nopeasti ilmestymisensä jälkeen laajaan käyttöön firmware-ohjelmien muistina, mutta ei onnistunut pääsemään merkitykselliseksi osaksi tietokoneiden muistihierarkiaa [13]. NAND Flash -muisti sen sijaan oli optimoidumpi ratkaisu massamuistimarkkinoille ja on sen ansiosta onnistunut kasvamaan merkittäväksi osaksi markkinoita [10, 15]. Nykyaikaisissa tietokoneissa NAND Flash -teknologiaa käytetään puolijohdelevyissä eli SSD-levyissä [16]. Tämän työn rajallisen laajuuden takia Flash-muisteista käsitellään tarkemmin vain NAND Flash -muisteja.

3.1 NAND Flash -muistin toimintaperiaate

NAND Flash -muisti tallentaa bittejä muistikennoihin, joita kutsutaan kelluvan hilan transistoreiksi. Data tallennetaan näihin muistikennoihin säätämällä kennon kynnysjännitettä eli pienintä jännitettä, jolla transistori johtaa virtaa lävitseen. Kennon kynnysjännitettä voidaan säätää muuttamalla kennon kelluvassa hilassa olevien elektronien määrää ohjelmointijännitteen avulla. Data voidaan hävittää poistamalla elektronit kennon kelluvasta hilasta. Kennon ohjelmoinnin jälkeen sen arvo voidaan lukea mittaamalla kennon kynnysjännite. Kennon kelluvaan hilaan ajautuneet elektronit pysyvät hilassa, vaikka laitteen virta kytkettäisiin pois päältä, mikä tekee NAND Flash -muistista haihtumattoman muistin. Kuva 2 havainnollistaa kennon rakenteen ja muutoksen, jonka kennon ohjelmointi aiheuttaa. [17]



Kuva 2. NAND Flash -muistikkenno tyhjänä vasemmalla ja ohjelmoituna oikealla.

NAND Flash -muistissa muistikennot on järjestetty jonoihin, joissa voi olla 16, 32, 64 tai enemmän muistikkenoja. Jonot on yleensä asetettu kahden valitsijatransistorin väliin, joista toinen on yhdistetty maahan ja toinen bittilinjaan. Tämä muistikkenojen järjestys pienentää muistin kokoa ja vähentää muistin hintaa bittiä kohti, mutta samalla se tekee NAND Flash -muistin lukemisesta hitaampaa, koska yksittäisen muistikennon lukemiseksi täytyy mennä kaikkien jonossa olevien muistikkenojen läpi. Kyseinen muistikkenojen järjestys myös käytännössä estää NAND Flash -muistin käyttämisen RAM-muistina. [14, s. 3–4, 18, luku 1.3.3]

Kelluvan hilan NAND Flash -laitteissa käytetään FN eli Fowler–Nordheim-tunnetoimista kirjoitus- ja tyhjennysoperaatioissa [19]. Tunnetoimisella tarkoitetaan sitä, että elektroni läpäisee potentiaalivallin, vaikka sen oma energia on pienempi kuin potentiaalivallin energia [20, s. 50–53]. Fowler–Nordheim-tunnetoimisessa elektronin tunnetoituminen saadaan aikaan sähkökentän avulla. Fowler–Nordheim-tunnetoitumisen käyttäminen muistikkenojen ohjelmointiin vaatii vain erittäin pienen virran, mikä mahdollistaa suuren määrän rinnakkaisuutta NAND Flash -muistin kirjoitusoperaatioissa [18, luku 1.3.3]. Rinnakkaisuus puolestaan mahdollistaa korkean suorituskyvyn kirjoitusoperaatioille.

3.2 Useiden kynnysjännitetasojen hyödyntäminen NAND Flash -muistikkennoissa

NAND Flash -tekniikan kehittyessä on keksitty tekniikka, jonka avulla voidaan kasvattaa muistien kokoa muuttamatta valmistusprosessia. Tätä tekniikkaa kutsutaan nimellä multi-level cell storage, joka lyhennetään usein MLC [14, s. 5–6]. MLC perustuu siihen,

että yhteen NAND Flash -muistikennoon tallennetaan 1:n bitin sijaan useampia bittejä [21]. Tämä onnistuu käyttämällä muistikennoissa useita kynnyksjännitetasoja, jotka merkitsevät eri bittiyhdistelmiä. Esimerkiksi muistikennoissa voitaisiin käyttää neljää eri kynnyksjännitetasoa, jotka esittäisivät bittipareja 11, 10, 01 ja 00. Samalla tavalla kynnyksjännitetasoja voisi olla 8 tai 16, jolloin yhteen muistikennoon voitaisiin tallentaa 3 tai 4 bittiä. Tällaisista useista kynnyksjännitetasoja hyödyntävistä tekniikoista puhuttaessa yleensä lyhenne MLC viittaa juuri neljää eri kynnyksjännitetasoa hyödyntävään tekniikkaan. 8:a tai 16:a kynnyksjännitetasoa hyödyntäviin tekniikoihin viitataan puolestaan lyhenteillä TLC ja QLC. Alkuperäiseen 2:n kynnyksjännitetasoon tekniikkaan viitataan lyhenteellä SLC. [14, s. 5–7]

MLC-tekniikan avulla NAND Flash -muistien muistin pakkaustiheyttä voidaan kasvattaa paljon ja samalla muistin hinta bittiä kohden vähenee [21]. MLC-tekniikan hyödyt eivät kuitenkaan tule täysin ilmaiseksi, sillä useampien kynnyksjännitetasojen käyttäminen tuo mukanaan myös uusia ongelmia: MLC:ssä käytettävien useiden eri kynnyksjännitetasojen asettaminen ja lukeminen vaatii enemmän tarkkuutta [13, s. 6]. Tämä johtaa siihen, että tarkat kirjoitus- ja tyhjennysoperaatiot vievät enemmän aikaa, jolloin muistin kirjoitusnopeus heikkenee.

MLC-tekniikan käyttäminen lisää myös muistipiirin kompleksisuutta, koska useampien kynnyksjännitetasojen ohjelmointiin tarvitaan tarkempia jännitteitä. Tarkempien jännitteiden käyttäminen lisää taustakohinan vaikutusta jännitetasojen huojuntaan, minkä on huomattu vaikuttavan muistikennojen elinikään heikentävästi. MLC-tekniikkaa hyödyntävät muistikennot siis kuluvat nopeammin, minkä takia niiden valmistuksessa täytyy huomioida ikääntymisen aiheuttama bittivirheiden määrän kasvu. [22]

3.3 NAND Flash -muistien luotettavuusongelmat

Luotettavuus on suuri kysymys massamuisteissa, koska niiden oletetaan säilyttävän dataa virheettömänä. NAND Flash -muistit kärsivät luotettavuusongelmista, jotka kumpuavat muistin fyysisestä rakenteesta. Tavallisten NAND Flash -muistien kirjoitus- ja tyhjennysoperaatioihin käytetty FN-tunneleittuminen vaatii korkeatehoisten sähkökenttien käyttöä, mikä puolestaan kuluttaa muistikennoja ja lisää bittivirheiden määrää [16, s. 203–205]. Toisin sanoen NAND Flash -muistiin kirjoittaminen lisää pitkällä aikavälillä muistissa esiintyvien virheiden määrää.

Kulumisen lisäksi NAND Flash -muisteissa esiintyy useita muita ongelmia, jotka voivat aiheuttaa bittivirheitä. Tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi epätasainen tunneleittuminen, kirjoitus- ja lukuoperaatioiden aiheuttama häiriö ja kvanttitason kohina [23]. Lisäksi

NAND Flash -muistitekniikan kehittyessä ja pienentyessä ilmestyy myös useita uusia luotettavuusongelmia, jotka ovat suurin este teknologian kehittymiselle [24]. Tämän työn laajuuden rajaamiseksi näiden ongelmien syitä ei käsitellä.

Näiden bittivirheiden korjaamista varten NAND Flash -muisteihin on kehitetty virheenkorjauskoodeja (ECC), jotka tallentavat pariteettibittejä. Pariteettibitteihin tallennetun datan avulla voidaan rekonstruoida muistissa ollut data, jos osa biteistä muuttuu virheelliseksi. ECC:n toiminnasta vastaa muistin kontrolleri, joka on yleensä toteutettu muistipiiriin lisätyllä mikrokontrollerilla. [23]

ECC-koodeja on kehitetty useita eri tyyppisiä [25]. Esimerkiksi MLC-tekniikkaa hyödyntävä NAND Flash -muisti tarvitsee erilaisen ECC-koodin kuin SLC-tekniikalla toteutettu. Tämän takia ECC-koodien kehitys on tärkeää NAND Flash -muistien kehityksen kannalta.

ECC-koodien lisäksi NAND Flash -muisteihin on kehitetty erilaisia tekniikoita, jotka vähentävät bittivirheitä aiheuttavien ongelmien vaikutuksia. Esimerkkejä näistä tekniikoista ovat inkrementaalinen askelpulssityhjennys, muistikenttien kynnysjännitetasojen jännitearvon maksimointi ja kynnysjännitetasojen tarkempi ohjaaminen [23, 26, 27]. Näitä tekniikoita ei kuitenkaan käsitellä tarkemmin tässä työssä.

3.4 3D NAND Flash -muistit

NAND Flash -muistien yleistyessä jatkuvat vaatimukset suuremmasta muistitiheydestä johtivat uuden pystysuorasti yhdistetyn 3D NAND Flash -teknologian kehittämiseen. Aiemmat NAND Flash -piirit oli toteutettu tasomaisella 2D NAND Flash -teknologialla. Muistitiheyden parantamiseksi hyvä vaihtoehto oli asettaa 2D NAND Flash -tasoja päällekkäin. Tämä onkin yksikertaisin tapa tuottaa 3D NAND Flash -piirejä. Yksikertaisimman ratkaisun lisäksi on kehitetty monia erilaisia 3D NAND Flash -arkkitehtuuria, jotka paremmin hyödyntävät kolmannen ulottuvuuden. [28]

Kolmannen ulottuvuuden tuominen NAND Flash -muisteihin suurentaa muistin tiheyttä ja laskee muistin hintaa bittiä kohden. Tämän lisäksi 3D NAND Flash -muistin rakenne sallii suuremmat muistikentät, jotka vähentävät muistikenttien kynnysjännitteen epätasaisuuden ongelmia. Näin suuremmat muistikentät helpottavat useampaa kynnysjännitetasoa hyödyntävien tekniikoiden, kuten MLC tai TLC, käyttöä 3D NAND Flash -arkkitehtuurin kanssa. [29]

Uuden ulottuvuuden lisääminen on kuitenkin tuonut mukanaan myös uusia ongelmia muistin luotettavuuteen. 3D NAND Flash -arkkitehtuurissa esiintyvät suuret kerrosten

väliset erot aiheuttavat ongelmia muistin kestävyteen, datan säilytykseen ja lämpötilavaihteluiden vaikutuksiin. Nämä ongelmat vaikeuttavat riittävän ECC-koodin ja korkean luotettavuustason ylläpitämistä. Siksi 3D NAND Flash -muisteja varten onkin kehitetty signaalinkäsittelyä ja koneoppimista hyödyntäviä algoritmeja, jotka torjuvat uusien ongelmien aiheuttamia bittivirheitä. [30]

4. MAGNEETTISET LEVYMUISTIT

Magneettiset tallennusjärjestelmät ovat pitkään olleet tärkeimpiä menetelmiä massamuistin valmistuksessa. Magneettinen tallennus perustuu magneettisen tallennusmateriaalin alkeismagneettien suuntaamiseen [31, s. 5]. Tämä peruseriaate keksittiin jo vuonna 1899, mutta tietokoneissa magneettista tallennusta hyödynnettiin magneettinauhan muodossa vasta vuonna 1951 [13]. Muutama vuosi myöhemmin kehitettiin ensimmäinen magneettinen levymuisti [32]. Tämän jälkeen levymuistien kehitys on jatkunut nykypäivään asti.

Magneettisia tallennusmenetelmiä voidaan hyödyntää magneettinauhoissa, magneettisissa levykkeissä ja kiintolevyissä [31, s. 1]. Nykyään näistä kolmesta vain kiintolevyjä käytetään kuluttajille suunnatuissa massamuisteissa [33]. Lisäksi kiintolevyt ovat ainoa massamuistiratkaisu, joka pystyy kilpailemaan NAND Flash -muistien kanssa. Tämän takia tässä työssä keskitytään magneettisten massamuistitekniikoiden osalta vain kiintolevyihin.

4.1 Magneettisen levymuistin toimintaperiaate

Tavallisen kiintolevyn tärkeimmät osat ovat magneettilevyt ja kirjoitus- ja lukuanturit. Magneettilevyt on kiinnitetty siten, että ne saadaan pyörimään levyjen keskellä olevan akselin ympäri. Anturit on puolestaan kiinnitetty magneettilevyjen pinnalla oleviin liukukoskettimiin, joiden paikkaa levyllä voidaan siirtää ohjaimen avulla. Kun muistiasema on käynnissä, pyöritetään magneettilevyjä suurella nopeudella, jolloin anturit voivat lukea levyillä olevaa tietoa ja kirjoittaa uutta tietoa levyille. [34, s. 64-3]

Kiintolevyn kirjoitusoperaatiossa hyödynnetään liukukoskettimen päässä olevaa sähkömagneettia. Sähkömagneettiin ohjattavan virran suunta määrää myös virran aiheuttaman magneettikentän suunnan. Tätä magneettikenttää käytetään kiintolevyn magneettilevyn magnetoimiseen. Sähkömagneetin vaikutuksesta magneettilevy magnetoituu paikallisesti saman suuntaisesti sähkömagneetin magneettikentän kanssa. Vaihtelemalla sähkömagneetissa kulkevan virran suuntaa saadaan tallennettua tietoa magneettilevyn paikallisiin magneettikenttiin. [31, s. 65–66]

Kiintolevyn lukuoperaatiossa sen sijaan käytetään liukukoskettimen päässä olevaa anturia, jossa on induktiivinen tallennuspää. Kun tämä tallennuspää liikkuu magneettilevyn

päällä, aiheuttavat magneettilevyllä olevat paikalliset magneettikentän muutokset induoituneen jännitteen anturiin. Näiden induoituneiden jännitepiikkien avulla voidaan lukea magneettilevyllä tallennettu data. [31, s. 49–50]

Kuvassa 4 on esitettyä tyypillinen kiintolevy. Kuvasta nähdään kiintolevyn sisäinen rakenne, joka ei ole pääpiirteiltään muuttunut teknologian kehittyessä. Kuvan kiintolevy on pois päältä ja siksi sen liukukosketin on siirtynyt pois magneettilevyllä. Liukukoskettimen siirtäminen pois magneettilevyllä hidastaa kiintolevyn käynnistymistä, mutta parantaa sen iskunkestävyyttä.



Kuva 3. Kiintolevyn sisäinen rakenne [35].

4.2 Kiintolevyjen kapasiteetti sekä luku- ja kirjoitusnopeus

Kuten aiemmin mainittiin, kiintolevyt tallentavat dataa magneettilevyn paikallisiin magneettikenttiin. Tämän takia kiintolevyn muistikapasiteettia rajoittaa paikallisten magneettikenttien koko, magneettilevyjen koko ja magneettilevyjen määrä [31, s. 7]. Kiintolevyjen kehityksessä onkin painotettu juuri näiden tekijöiden optimoimista ja on esimerkiksi pyritty pienentämään paikallisia magneettikenttiä alkeismagneettien kokoisiksi [34, s. 64–7].

Dataa sisältävien paikallisten magneettikenttien pienentäminen vaikuttaa myös kiintolevyn luku- ja kirjoitusnopeuteen. Koska luku- ja kirjoitusoperaatiot tapahtuvat liikuttamalla magneettilevyjä anturin alla, vaikuttaa magneettilevyjen pyörimisnopeus ja paikallisten

magneettikenttien koko kovalevyn luku- ja kirjoitusnopeuteen. Mitä nopeammin magneettilevy pyörii, sitä enemmän luku- ja kirjoitusoperaatioita voidaan suorittaa. Lisäksi pienemmät paikalliset magneettikentät tarkoittavat useampaa luettua tai kirjoitettua bittiä yhden magneettilevyn pyörähdysen aikana. [31, s. 9]

Pyörimisnopeus ja paikallisten magneettikenttien koko eivät kuitenkaan kerro kaikkea lukunopeudesta. Varsinkin nykyaikaiset monimutkaiset käyttöjärjestelmät tarvitsevat paljon tietoa kerralla ja tämä tieto on usein tallennettu useampaan eri paikkaan muistissa. Tällaisessa tilanteessa kiintolevyn lukunopeus heikkenee huomattavasti, koska tiedon etsintään kuluu aikaa. Etsintään kuluvaan aikaan vaikuttaa nopeus, jolla lukuanturi voi siirtyä halutulle lukualueelle, ja lukuanturin liikkeen jälkeinen asettumisaika [31, s. 9]. Tämän lisäksi pitää odottaa, että magneettilevyn osa, joka sisältää halutun tiedon, pyörrähtää lukuanturin alle.

4.3 Kiintolevyjen luotettavuus

Kuten muutkin massamuistitekniologiat, myös kiintolevyillä on luotettavuuteen liittyviä ongelmia. Yleinen virheiden aiheuttaja kiintolevyissä on kohina. Magneettilevyä luettaessa liukukoskettimen anturi havaitsee myös kohinaa, joka johtuu magneettisen tallennusmateriaalin epätäydellisyydestä ja tiheään asetelluista paikallisista magneettikentistä [31, s. 233]. Tämä tarkoittaa, että mitä tiheämmin data pakataan magneettilevyille, niin sitä enemmän kohinaa ilmenee dataa luettaessa.

Kohinan aiheuttamien virheiden korjaamiseksi kiintolevyissä käytetään virheitä korjaavia koodeja (ECC) kuten NAND Flash -muisteissakin. ECC-koodien avulla kohinan aiheuttamat virheelliset bitit huomataan lukuvaiheessa ja voidaan korjata ennen datan lähettämistä eteenpäin. ECC-koodit vievät tilaa kiintolevyiltä, mutta tämä voidaan korvata kasvattamalla kiintolevyn muistitiheyttä. Muistitiheyttä voidaan ECC-koodien ansiosta kasvattaa vapaammin, koska koodit korjaavat tiheyden kasvamisesta aiheutuvat luotettavuusongelmat. [31, s. 217–218, 35, s. 178–179]

Kohinan lisäksi magneettilevyillä voi esiintyä alueita, jossa suuri osa datasta on virheellistä. Tällaisten alueiden aiheuttajina voivat olla magneettilevyn naarmut, magneettikalvomateriaalin liian pieni määrä tai magneettisen tallennusmateriaalin huononeminen. Alueella oleva data saattaa olla liian vaurioitunutta korjattavaksi, jolloin data menetetään. Tällöin kiintolevyn kontrolleri pyrkii välttämään vaurioitunutta aluetta tulevissa kirjoitusoperaatioissa. Näin suuret virheet ovat kuitenkin erittäin harvinaisia ja usein vääränlaisen käytön aiheuttamia. [36, s. 180]

5. MUISTITEKNOLOGIOIDEN VERTAILU

Nykyaikaisissa tietokoneissa käytetään yhä sekä NAND Flash -muistia että kiintolevyjä. Tämän takia tässä luvussa selvitetään vertailemalla näiden kahden muistitekniikan välinen suhde. Vertailua varten on valittu neljä NAND Flash -teknologiaa hyödyntävää SSD-levymallistoa. Näitä vertaillaan neljään nykyaikaiseen kiintolevymallistoon. Vertailemalla näitä massamuisteja on tarkoitus saada yleiskuva nykyään käytössä olevien NAND Flash -muistien ja kiintolevyjen eroista. Tämän takia vertailuun on valittu vain muutama SSD- ja kiintolevymallisto, joista kaikki kuvastavat hyvin oman massamuistitekniikkansa erityispiirteitä.

Vertailuun valittiin SSD-levymallistoiksi Samsung SSD 860 EVO, Samsung SSD 970 PRO, Corsair Force MP600 SSD ja Kingston KC600 SSD. Kiintolevymallistoiksi valittiin Western Digital WD Red NAS Hard Drive, Seagate IronWolf NAS HDD, Toshiba N300 NAS Hard Drive ja Seagate Exos X. Vertailuun pyrittiin valitsemaan mahdollisimman uusia levymallistoja, joiden datalehdet olivat julkisesti saatavilla ja sisälsivät tarpeeksi tietoja vertailun tekemiseen. SSD-levyistä valittiin kaksi NVMe 1.3 -protokollaa tukevaa mallistoa ja kaksi SATA III -protokollaa tukevaa mallistoa, koska molemmat ovat yleisiä. Lopulliset mallistot valittiin satunnaisotannalla kriteerit täyttäneistä mallistoista. Vertailua varten tutustuttiin näiden massamuistien datalehtiin ja koottiin niistä olennaisia tietoja taulukkoon 1. Vertailussa otettiin huomioon kaikki SSD- ja kiintolevymallistojen eri kapasiteettiluokat ja niiden hinnat. Jokaisesta mallistosta on tarjolla useampia eri kapasiteetin omaavia SSD-levyjä ja kiintolevyjä. Taulukossa kuitenkin näytetään jokaisesta mallistosta vain suurimman ja pienimmän kapasiteetin levyjen arvot, koska muiden mallistojen levyjen ominaisuuksien arvot ja hinta löytyvät esitetyjen väliltä.

Taulukossa esitetyt hinnat on haettu suomalaiselta hinta.fi-nimiseltä hintavertailusivustolta. Sivustolle on kerätty useiden suomenkielisten elektroniikkaverkkokauppojen hintoja. Taulukon arvoihin päädyttiin, kun laskettiin keskiarvo kaikista hintavertailussa esitetyistä verkkokauppojen hinnoista. Keskiarvojen laskemiseen käytettyjen verkkokauppojen määrä vaihteli välillä 8–29. Verkkokauppojen hinnat eivät välttämättä vastaa tarkasti tuotteiden oikeaa markkina-arvoa, mutta antavat tarpeeksi hyvän kuvan SSD-levyjen ja kiintolevyjen hintaeroista. Myös taulukon muita arvoja lukiessa kannattaa huomioda, että datalehdet ovat valmistajille myös tapa mainostaa omaa tuotettaan, mikä tarkoittaa sitä, että osa datalehden arvoista on mahdollisesti mitattu olosuhteissa, jotka eivät vastaa tavallista käyttöä. Datalehtien arvot ovat kuitenkin tarpeeksi suuntaa antavia, jotta niistä voidaan nähdä yleiset erot SSD-levyjen ja kiintolevyjen välillä.

Taulukossa on mainittu termit TBW ja WRL. TBW tulee sanoista total bytes written ja tarkoittaa siis SSD-levylle koko sen elinaikana kirjoitettujen tavujen määrää [37]. WRL puolestaan tulee sanoista workload rate limit, joka tarkoittaa valmistajan määrittämää vuosittaista käyttörajaa [38]. Pelkkä viiva taulukossa tarkoittaa, että kyseiseen ominaisuuteen ei löytynyt tietoa.

Taulukko 1. Valittujen SSD- ja kiintolevymallistojen ominaisuuksia [37, 39–46].

Ominaisuus	860 EVO	970 PRO	WD Red	IronWolf
Muistintyyppi	SSD-levy	SSD-levy	Kiintolevy	Kiintolevy
Hinta Suomessa (€)	70–737	202–384	76–375	68–428
Kapasiteetti (TB)	0,25–4	0,5–1	1–10	1–12
Kapasiteetin suhde hintaan (€/TB)	184–280	384–404	38–76	36–68
Maksimi jaksottainen lukunopeus (MB/s)	550	3 500	144–210	180–210
Maksimi jaksottainen kirjoitusnopeus (MB/s)	520	2 300–2 700	-	-
Tiedonsiirtoprotokolla	SATA III	NVMe 1.3	SATA III	SATA III
Iskunkestävyys pois päältä (G)	1 500	1 500	250	250–300
Virrankulutus unitila (mW)	2–8	5	200–800	500–800
Virrankulutus joutokäynti (W)	0,05	0,03	0,6–5,3	2,5–7,6
Virrankulutus luku ja kirjoitus (W)	2,2–3	5,2–5,7	1,4–8,8	3,75–8,8
TBW (TB)	150–2 400	600–1 200	-	-
WRL (TB/vuosi)	-	-	180	180
Julkaisuvuosi	2017	2018	2018	2017
	MP600	KC600	N300	Exos X
Muistintyyppi	SSD-levy	SSD-levy	Kiintolevy	Kiintolevy
Hinta Suomessa (€)	262–501	57–329	134–588	422–607
Kapasiteetti (TB)	1–2	0,25–2	4–14	10–16
Kapasiteetin suhde hintaan (€/TB)	251–262	165–228	34–42	38–42
Maksimi jaksottainen lukunopeus (MB/s)	4 950	550	204–274	245–261
Maksimi jaksottainen kirjoitusnopeus (MB/s)	4 250	500–520	-	-

Tiedonsiirtoprotokolla	NVMe 1.3	SATA III	SATA III	SATA III
Iskunkestävyys pois päältä (G)	1 500	-	250	200
Virrankulutus unitila (mW)	1.6	-	-	500–800
Virrankulutus joutokäynti (W)	1.1	0,06	4,03–7,22	5
Virrankulutus luku ja kirjoitus (W)	6.6	3.2	-	6,0–10,0
TBW (TB)	1 800–3 600	150–1 200	-	-
WRL (TB/vuosi)	-	-	180	-
Julkaisuvuosi	2019	2019	2017	2019

5.1 Erot hinnassa, kapasiteetissa ja nopeudessa

SSD-levyjen ja kiintolevyn välillä on kaksi suurta eroa, joista toinen voidaan nähdä taulukon ensimmäisistä luetelluista ominaisuuksista. Tämä suuri ero on tallennustilan hinta bittiä kohden. Taulukosta voidaan nähdä, että nykyaikaiset kiintolevyt tarjoavat ainakin nelinkertaisen tallennuskapasiteetin samassa hintaluokassa oleviin SSD-levyihin nähden. Tätä suurta eroa voidaan parhaiten selittää teknologian iällä. Kiintolevyissä käytetty magneettinen tallennusmenetelmä on paljon vanhempi keksintö kuin NAND Flash ja siksi kiintolevyjen valmistustekniikat ovat vielä parempia ja tehokkaampia. Tästä syystä kiintolevyjä voidaan valmistaa halvemmalla.

Toinen suuri ero SSD-levyjen ja kiintolevyjen väliltä löytyy taulukon seuraavista luetelluista ominaisuuksista: SSD-levyt tarjoavat selvästi suuremman luku- ja kirjoitusnopeuden. Kiintolevyjen kirjoitusnopeuksia ei datalehdillä mainittu, mutta koska kirjoitusnopeus on riippuvainen levyn pyörimisnopeudesta, niin se voi maksimissaan olla samaa luokkaa lukunopeuden kanssa. SSD-levyjen suurempaa kirjoitus- ja lukunopeutta selittää NAND Flash -muistien rakenne, joka sallii suuren määrän rinnakkaisuutta. Kiintolevyt sen sijaan rajoittuvat magneettilevyjen pyörimisnopeuteen, jota voidaan kasvattaa vain rajallisesti fysikaalisten rajoitteiden takia.

Taulukossa olevien SSD-levyjen suuret erot luku- ja kirjoitusnopeudessa johtuvat niiden käyttämistä tiedonsiirtoprotokollista: 860 EVO ja KC600 käyttävät SATA III -protokollaa, jonka maksimi tiedonsiirtonopeus on 750 MB/s [47]. SSD-levyn luku- ja kirjoitusnopeus on pidetty pienempänä kuin protokollan tiedonsiirtonopeus, koska muutoin protokollan tiedonsiirtonopeuden ylittävä luku- ja kirjoitusnopeus menisi hukkaan. 970 PRO ja MP600 sen sijaan käyttävät NVMe 1.3 protokollaa, joka hyödyntää neljää PCIe Gen 3.0

väylää [39, 42]. Neljä PCIe Gen 3.0 väylää pystyy siirtämään jopa 4 gigatavua sekunnissa [48]. Erilaisen protokollan ansiosta 970 PRO ja MP600 eivät ole rajoittuneet nopeuteen 750 MB/s vaan pystyvät tarjoamaan paljon suurempia luku- ja kirjoitusnopeuksia.

SSD-levyjen ja kiintolevyjen luku- ja kirjoitusnopeutta vertailtaessa täytyy ottaa myös huomioon satunnaiset luku- ja kirjoitusoperaatiot. Kuten aiemmin on mainittu, kiintolevyjen täytyy odottaa liukukoskettimen liikkumista sopivaan kohtaan ja magneettilevyn pyöryhdystä satunnaisissa luku- ja kirjoitusoperaatioissa. SSD-levyissä sen sijaan täytyy rakenteensa takia lukea useiden muistikenttien sisältö, vaikka vain yhdestä oltaisiin kiinnostuneita. SSD-levyn lukuoperaatio tapahtuu kuitenkin sähköisesti, mikä on paljon nopeampaa kuin kiintolevyn mekaanisten osien liikkuminen.

Tätä eroa voidaan osittain demonstroida IOPS arvoilla. IOPS tulee sanoista input/output operations per second ja sitä käytetään usein muistin tehokkuuden mittaamiseen [49]. IOPS ei kuitenkaan ole täydellinen mittari tehokkuudelle, sillä erilaiset työkuormat ja testiympäristöt vaikuttavat suuresti IOPS lukemaan. Valmistajien datalehdet ilmoittavat vertailussa olleiden SSD-levyjen satunnaisten luku- ja kirjoitusoperaatioiden IOPS-arvojen olevan välillä 10 000–680 000 [37, 39, 42, 43]. Kiintolevyjen datalehdistä vain Exos X:n datalehdellä on ilmoitettu IOPS arvoja. Exos X:n IOPS arvot on ilmoitettu olevan välillä 170–440 [45]. Tästä huolimatta levyjen todellinen tehokkuusero ei varmasti ole niin suuri kuin nämä luvut antaisivat ymmärtää, mutta selvää eroa tukee aiemmin esitetty teoria-pohja.

5.2 Muut maininnan arvoiset erot

Aiemmin esitetyssä taulukossa on kerrottu SSD-levyjen ja kiintolevyjen iskunkestävyydestä. Taulukosta voidaan suoraan nähdä, että SSD-levyjen iskunkestävyys on paljon parempi kuin kiintolevyjen. Iskunkestävyyttä vertailtaessa tulee huomioida, että kiintolevyjen iskunkestävyys on selvästi pienempi niiden ollessa päällä. Tämä selviää myös datalehdistä, joissa näytetään, että iskunkestävyys voi tippua jopa kahdeksasosaan kirjoitusoperaatioiden aikana [40]. Heikomman iskunkestävyyden selittää kiintolevyjen rakenne: kiintolevyissä oleva liukukosketin voi helposti naarmuttaa magneettilevyjä tai jopa särkeä ne, jos kiintolevy saa kovan iskun. SSD-levyissä ei tällaisia liikkuvia osia ole ja siksi ne pystyvät helpommin selviämään kovista iskuista.

Iskunkestävyyden jälkeen taulukossa on tietoja SSD-levyjen ja kiintolevyjen virrankulutuksesta. Taulukon arvoista havaitaan, että SSD-levyt kuluttavat selvästi vähemmän virtaa joutokäynnillä ja unitilassa. Joutokäynnin virrankulutuksen eron selittää kiintolevyjen

pyörivät magneettilevyt. Joutokäynnissä kiintolevyn täytyy kuitenkin olla valmis tekemään luku- ja kirjoitusoperaatioita, minkä takia magneettilevyjä täytyy pyörittää, mikä puolestaan lisää virran kulutusta. Vaikka SSD-levyjen ja kiintolevyjen virrankulutus luku- ja kirjoitusoperaatioiden aikana on samantasoista, kuluttavat SSD-levyt todennäköisesti vähemmän virtaa, koska suoriutuvat kirjoitus- ja lukuoperaatioista nopeammin kuin kiintolevyt. Tämä virrankulutuksen ero riippuu kuitenkin paljon siitä, minkälaisia luku- ja kirjoitusoperaatioita massamuisteilla tehdään ja ei siksi ole yhtä merkittävä ero kuin unitilassa ja joutokäynnissä havaittu.

Taulukosta voidaan nostaa myös SSD-levyjen kulumiseen viittaava TBW-arvo ja kiintolevyjen vuosittaisen käyttörajan arvo. Kuten aiemmin on mainittu, aiheuttavat kirjoitus- ja tyhjennysoperaatiot kulumista SSD-levyihin, minkä takia niillä voidaan tehdä vain rajallinen määrä kirjoitus- ja tyhjennysoperaatioita ennen kuin levyn sisältämä data muuttuu liian virheelliseksi. Tästä syystä levyjen valmistajat ovat määrittäneet rajan kirjoitettujen tavujen määrälle. Kiintolevyille on myös ilmoitettua käyttöä rajoittava arvo, jossa kiintolevyn valmistaja lupaa, että kiintolevyille voidaan kirjoittaa tai lukea WRL:n määrittämä tavumäärä vuodessa ilman ongelmia levyn toimivuuden kanssa.

5.3 Kuluttajan näkökulma

Kuluttajan näkökulmasta tavallisen pöytätietokoneen massamuistina SSD-levyt ja kiintolevyt näyttävät omat erikoispiirteensä omaavina vaihtoehtoina. Levyjen selkein ja usein tärkein ero kuluttajalle on hinta. Jos kuluttaja on hakemassa pelkkää tallennuskapasiteettia, on kiintolevy ehdoton valinta selvästi pienemmän hintansa ansiosta.

Tavallisia pöytätietokoneita käytetään kuitenkin kasvavassa määrin videopelien pelaamiseen. Videopeleissä esiintyy yleensä paljon kohtia, joissa pelin tietoja ladataan massamuistista. Näissä kohdissa pelaaja joutuu usein vain odottamaan. Odottaminen ei kuitenkaan ole nykyisin erityisen suosittua ja siksi SSD-levyjä suositaan varsinkin pelikäytössä. SSD-levyjen selvästi suurempi nopeus, joka mahdollistaa odotusten pienenemisen, tekee niistä houkuttelevan ratkaisun kuluttajalle, vaikka niiden hinta onkin suurempi.

Kannettavissa akkukäyttöisissä kuluttajätietokoneissa SSD-levyt ovat selvästi parempi valinta. Akkukäyttöisissä laitteissa juuri akunkesto on usein tärkeä elementti, ja sen parantamiseksi SSD-levyt ovat selvästi parempi valinta. Tämän lisäksi SSD-levyjen parempi iskunkestävyys voi olla tarpeellinen kannettavissa tietokoneissa, joita käytetään monenlaisissa paikoissa. Parempi iskunkestävyys voi tarkoittaa tietojen säilymistä, vaikka tietokone putoaisi vahingossa. SSD-levyjen korkeampi hintakaan ei haittaa kan-

nettavissa tietokoneissa yhtä paljon, koska niissä harvemmin tarvitaan suurta tallennuskapasiteettia varsinkaan nykyään, kun monet kuluttajien käyttämät palvelut löytyvät suoratoistopalveluina internetyhteyden avulla.

Kokonaisuudessaan voidaan nähdä, että SSD-levyjen asema kuluttajakäytössä on taattu, koska ne tarjoavat pienempiä latausaikoja ja paremman akunkestävyyden. SSD-levyjen vahvaa asemaa tukee myös SSD-levymarkkinoiden suuri vuosittainen kasvunopeus, joka on muutamassa lähteessä arvioitu noin 15 %:ksi [50–51]. Kiintolevyjen vastaava luku on arvioitu noin 10 %:ksi, mikä osoittaa SSD-levyjen olevan paremmassa markkina-asemassa [52]. SSD-levyjen rajoitettu elinaikainen kirjoitusmääräkään ei haittaa, sillä se tulee erittäin harvoin vastaan kuluttajakäytössä. Kiintolevyjen ainoana etuna on niiden halpa hinta, joka tosin pitää ne varteenotettavana vaihtoehtona kuluttajalle.

5.4 Yrityskäytön ja palvelinkäytön näkökulma

Monissa yrityksissä työtehtävät ovat hyvin liikkuvia. Tällöin on yritykselle kätevää, jos tietokonetta tarvitseva työntekijä pystyy suorittamaan työtehtäviään muuallakin kuin työpisteellään. Tämän takia työntekijöille on yleensä kannattavampaa hankkia kannettavat tietokoneet pöytätekoneiden sijaan, jos työtehtävät eivät vaadi suurta jatkuvaa prosessointitehoa. Kannettavat työtietokoneet voivat mahdollistaa myös etätöiden tekemisen, mikä vähentää yrityksen tarvitsemia työtiloja ja voi parantaa työntekijöiden hyvinvointia. Kannettavissa tietokoneissa SSD-levyt ovat hyvä valinta paremman iskunkestävyytensä ja pienemmän virrankulutuksensa takia. Laittevalintaan vaikuttaa myös se, että monet tietokonetta paljon työssään tarvitsevat ovat usein jonkinlaisia asiantuntijoita, joiden palkka on korkea ja siksi heidän työaikaansa ei kannata tuhjata tietokoneen latausaikojen odotteluun. Näistä syistä SSD-levyt ovat yleensä hyvä ratkaisu yrityskäyttöisiin tietokoneisiin.

Kiintolevyillekin on vielä paikkansa yrityskäytössä varsinkin tietotekniikan alalla, jossa nykyaikaisissa Big data -sovelluksissa saatetaan käsitellä erittäin suuria datamääriä. Kaikki data pitää mahdollisesti tallentaa johonkin, ja silloin SSD-levyjen käyttö voi tulla kalliiksi. Lisäksi data saattaa vaihtua usein, jolloin SSD-levyjen rajoitettu elinaikainen kirjoitusmäärä saattaa tulla vastaan aiheuttaen lisää kuluja. Tällaisissa tilanteissa on kiintolevyillekin käyttöä.

Samankaltainen tilanne on palvelinkäytössä, jossa tallennettavaa dataa on erittäin paljon ja datan vaihtuvuus voi olla suurta. Jo datan suuren määrän takia ovat kiintolevyt hyvä ratkaisu palvelinkäytössä. Tämän lisäksi datan suuri vaihtuvuus tuo esille SSD-levyjen

kulumisesta aiheutuvat ongelmat. Tosin tässä asiassa myös kiintolevyillä on heikkoutensa. Kuten aiemmin on mainittu, on kiintolevyille määritetty vuosittaisen käytön raja, jonka ylittäminen voi aiheuttaa vahinkoa laitteelle. Tästä huolimatta kiintolevyt ovat yhä parempi ratkaisu palvelinkäyttöön, koska ne tarjoavat paljon tilaa ja niitä ei tarvitse vaihtaa säännöllisesti, vaikka data vaihtuisi paljon.

5.5 Tulevaisuudennäkymät

Kiintolevyjen tarve kuluttajakäytössä ja tavallisessa yrityskäytössä on todennäköisesti vähenevä. Kuluttajille kiintolevyjen ainoa etu on niiden halpa hinta, minkä takia tämän hintaeron katoaminen todennäköisesti heikentäisi kiintolevyjen asemaa merkittävästi kuluttajamarkkinoilla. Tavallisessa yrityskäytössä ei kiintolevyjä välttämättä tarvita, mutta halvan hintansa takia voivat ne olla vaihtoehto yrityksille, jotka eivät tarvitse hyvää suoritusnopeutta. SSD-levyt sen sijaan jatkavat yleistymistään kuluttaja- ja yrityskäytössä. Toisaalta palvelinkäytössä SSD-levyt eivät todennäköisesti yleisty ennen kuin niiden hinta bittiä kohden on pienentynyt ja SSD-levyjen kulumiseen on keksitty uusia ja parempia ratkaisuja.

SSD-levyjen ja kiintolevyjen hintaerolle ei ole nähtävissä vielä selvää loppua. On todennäköistä, että molemmat teknologiat jatkavat kehittymistään ja hintaero bittiä kohden saattaa pienentyä. Hintaeron pienentyminen tulee todennäköisesti tapahtumaan hitaasti, mikä tarkoittaa, että kiintolevyillä on paikkansa massamuistimarkkinoilla vielä jonkin aikaa. Sillä välin SSD-levyjen tehokkuus todennäköisesti kehittyy selvästi nopeammin kuin kiintolevyjen, minkä takia kiintolevyjen asema tulee heikkenemään. Ainoastaan palvelinkäyttöisten kiintolevyjen asema tulee pysymään suurin piirtein ennallaan, sillä SSD-levyjen kulumisen estämiseen ei ole vielä nähtävissä mullistavia ratkaisuja.

6. YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää kahden nykytietokoneissa käytetyn massamuistitekniologian, NAND Flash -muistien ja kiintolevyjen, asema toisiinsa nähden. Tutkimusta varten selvitettiin massamuistien tarpeellisuutta tietokoneissa ja niiden sijoittuminen tietokoneen muistihierarkiaan. Tämän jälkeen käytiin läpi NAND Flash -muistien ominaisuuksia ja niiden pääsääntöinen käyttökohde SSD-levyt. NAND Flash -muistien lisäksi käsiteltiin kiintolevyjen ominaisuuksia, jotta eri massamuistitekniologioita voitaisiin vertailla.

Massamuistitekniologioiden vertailussa käytettiin neljän SSD-levymalliston ja neljän kiintolevymalliston datalehtiä, joista saatujen tietojen avulla muodostettiin teoriaan pohjautuva yleiskuva tekniologioiden eroista. Suurimmat erot NAND Flash -tekniologiaa käyttävien SSD-levyjen ja magneettisia tallennustekniikoita käyttävien kiintolevyjen välillä ovat hinnan ja tallennuskapasiteetin suhde sekä kirjoitus- ja lukunopeus. Vertailussa havaittiin, että kiintolevyt ovat halvempia kuin SSD-levyt, mutta niiden nopeus satunnaisissa ja peräkkäisissä luku- ja kirjoitusoperaatioissa on selvästi SSD-levyjä hitaampi. Tämän lisäksi havaittiin, että SSD-levyt sopivat paremmin kannettaviin tietokoneisiin, koska niillä on pienempi virrankulutus ja parempi iskunkestävyys.

Näistä havainnoista voitiin tehdä johtopäätöksiä SSD-levyjen ja kiintolevyjen asemasta kuluttaja-, yritys- ja palvelinkäytössä. Kuluttajan näkökulmasta kiintolevyjen vahvuutena on halpa hinta, kun puolestaan SSD-levyt tarjoavat paremman tehokkuuden ja lyhentävät kuluttajien käyttämien ohjelmien latausaikoja. Kuluttajakäyttöön tarkoitetuissa kannettavissa tietokoneissa SSD-levyt todettiin selvästi paremmaksi vaihtoehdoksi. Yrityskäytössä sen sijaan tarvitaan usein tehokkaita tietokoneita ja usein on kannattavaa minimoida tietokoneen odotteluun käytetty työaika, jolloin SSD-levyt ovat parempi vaihtoehto. Joissakin tietotekniikan alan yrityksissä saatetaan tosin käsitellä niin suuria määriä dataa, että kiintolevyjen suurelle kapasiteetille on tarvetta. Kiintolevyjen todettiin olevan tarpeellisia myös palvelinkäytössä, jossa datan suuri määrä ja nopea vaihtuvuus tekevät SSD-levyistä epäkäytännöllisiä.

Näiden havaintojen ja johtopäätösten pohjalta voidaan nähdä, että SSD-levyjen ja siten NAND Flash -tekniologian asema nykytietokoneiden massamuistina on vakaa. SSD-levyt ovat selvästi paremmassa asemassa kuin kiintolevyt. Kiintolevyt eivät kuitenkaan ole kaatoamassa massamuistimarkkinoilta lähitulevaisuudessa vaan pysyvät kilpailussa vielä mukana pienemmän hintansa ja hitaamman kulumisensa ansiosta. Palvelinkäytössä on

kiintolevyillä vakain asema, koska SSD-levyjen ominaisuudet eivät sovellu yhtä hyvin palvelinkäyttöön. SSD-levyjen kehityksen jatkuminen todennäköisesti vähentää kuluttajakäytössä olevien kiintolevyjen määrää, mutta halvempi hinta pitää kiintolevyt kuluttajamarkkinoilla myös tulevaisuudessa.

Työssä saatiin aikaiseksi yleiskuva kahdesta suosituimmasta massamuistiteknologiasta ja tämän yleiskuvan avulla voitiin päätellä niiden asema nykyaikana. Työ ei kuitenkaan ole kaiken kattava ja on monia osa-alueita, joita olisi voitu tutkia tarkemmin ja näin saada tarkempi kuvaus massamuistiteknologioista ja niiden eroista. Varsinkin vertailuosiossa olisi hyvä käyttää suurempaa otosta SSD-levyistä ja kiintolevyistä, jotta saataisiin varmempi tulos niiden eroista. Näiden asioiden tarkempi selvittäminen jää kuitenkin jatkotutkimusten varaan, koska tämän työn laajuus ei asioiden varmentamiseen riitä. Siksi jatkotutkimukset olisivat tarpeellisia, jos aiheesta haluttaisiin yleiskuvaa tarkempi tulos.

LÄHTEET

- [1] J. Martindale - Forza Motorsport 7 is one of the largest games ever, with 100GB install size, Digital Trends, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 01.03.2020): <https://www.digitaltrends.com/gaming/forza-motorsport-7-100gb/>
- [2] Data Never Sleeps 5.0, Domo, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 01.03.2020): <https://www.domo.com/learn/data-never-sleeps-5>
- [3] Computer memory, Britannica Online Academic Edition. 2019. verkkosivu, Saatavissa (viitattu 31.01.2020): <http://academic.eb.com/levels/collegiate/article/25051>
- [4] J.G., Brainerd, T.K. Sharpless, The ENIAC, Proceedings of the IEEE, Vol. 87, Iss. 6, June 1999, pp. 1031–1041.
- [5] D.A. Patterson, J.L. Hennessy, Computer organization and design: the hardware/software interface, 4th ed., Elsevier, USA, 2012.
- [6] G. Sun, Exploring Memory Hierarchy Design with Emerging Memory Technologies, 1st ed., Cham: Springer International Publishing, 2014.
- [7] A. Bhaskar, Design and analysis of low power SRAM cells, 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), IEEE, 2017, pp. 1–5.
- [8] G. Blanchet, B. Dupouy, Computer architecture, London: ISTE, 2013.
- [9] Mass storage, PCMag, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 31.01.2020): <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/mass-storage>
- [10] R. Bez, E. Camerlenghi, A. Modelli, A. Visconti, Introduction to flash memory, Proceedings of the IEEE, Vol. 91, Iss. 4, April 2003, pp. 489–502.
- [11] J. Bacon, T. Harris, Operating systems: concurrent and distributed software design, Harlow, England, 2003.
- [12] D. Yevick, A Short Course in Computational Science and Engineering: C++, Java and Octave Numerical Programming with Free Software Tools, Cambridge University Press, 2012.
- [13] D. Klein, The History of Semiconductor Memory: From Magnetic Tape to NAND Flash Memory. IEEE Solid-State Circuits Magazine, Vol. 8, Iss. 2, 2016, pp. 16–22.
- [14] R. Micheloni, L. Crippa, A. Marelli, Inside NAND Flash Memories, 1st ed, Dordrecht: Springer Netherlands, 2010, pp. 2–7.
- [15] C. Monzio Compagnoni, A. Goda, A.S. Spinelli, P. Feeley, A.L. Lacaita, A. Visconti, Reviewing the Evolution of the NAND Flash Technology, Proceedings of the IEEE, Vol. 105, Iss. 9, September 2017, pp. 1609–1633.
- [16] R. Micheloni, A. Marelli, K. Eshghi, Inside Solid State Drives (SSDs), 1st ed, Dordrecht: Springer Netherlands, 2013.

- [17] J.P. van Zandwijk, A. Fukami, NAND Flash Memory Forensic Analysis and the Growing Challenge of Bit Errors, *IEEE Security & Privacy*, Vol. 15, Iss. 6, November 2017, pp. 82–87.
- [18] Y. Nishi, *Advances in non-volatile memory and storage technology*, Cambridge, England, Woodhead Publishing, 2014.
- [19] C. Ludwig, M. Beug, K. Kusters, *Advances in flash memory devices*, *Materials Science-Poland*, Vol. 20, Iss. 1, 2010, pp. 105–115.
- [20] D. Mann Kim, *Introductory Quantum Mechanics for Applied Nanotechnology*, Somerset: Wiley, 2015.
- [21] D. Guiqiang, L. Shu, Z. Tong, Using Data Postcompensation and Predistortion to Tolerate Cell-to-Cell Interference in MLC nand Flash Memory, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, Vol. 57, Iss. 10, October 2010, pp. 2718–2728.
- [22] S. Korkotsides, G. Bikas, E. Eftaxiadis, T. Antonakopoulos, BER analysis of MLC NAND Flash memories based on an asymmetric PAM model, 2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (IS-CCSP). IEEE, 2014, pp. 558–561.
- [23] N. Mielke, T. Marquart, W. Ning, J. Kessenich, H. Belgal, E. Schares, et al. Bit error rate in NAND Flash memories, *IEEE International Reliability Physics Symposium*, 2008, pp. 9–19.
- [24] Y. Park, J. Lee, S.S. Cho, G. Jin, E. Jung, Scaling and reliability of NAND flash devices, *IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings*, 2014.
- [25] J. Xiao-Bo, T. Xue-Qing, H. Wei-Pei Novel reliability evaluation method for NAND flash memory, *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON*, 2016, pp. 1–4.
- [26] S. Hyunyoung, C. Myoungkwan, A. Kunok, B. Gihyun, S. Park, Novel integration technologies for improving reliability in NAND flash memory, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2012, pp. 424–427.
- [27] D.W. Lee, Sunghoon Cho, B.W. Kang, S. Park, B. Park, M. Cho, The Operation Algorithm for Improving the Reliability of TLC (Triple Level Cell) NAND Flash Characteristics, *3rd IEEE International Memory Workshop (IMW)*, 2011, pp. 1–2.
- [28] R. Micheloni, S. Aritome, L. Crippa, Array Architectures for 3-D NAND Flash Memories, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 105, Iss. 9, September 2017, pp. 1634–1649.
- [29] N. Righetti, G. Puzzilli, 2D vs 3D NAND technology: Reliability benchmark, *IEEE International Integrated Reliability Workshop (IIRW)*, 2017, pp. 1–6.
- [30] C. Zambelli, R. Micheloni, P. Olivo, Reliability challenges in 3D NAND Flash memories, *IEEE 11th International Memory Workshop, IMW*, 2019 pp. 1–4.
- [31] S.X. Wang, A.M. Taratorin, *Magnetic information storage technology*, San Diego: Academic Press, 1999.

- [32] A. Hoagland, History of magnetic disk storage based on perpendicular magnetic recording, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 39, Iss. 4, July 2003, pp. 1871–1875.
- [33] T. Coughlin, Market Trends are Driving Digital Storage Choices for Consumer Devices [The Art of Storage], *IEEE Consumer Electronics Magazine*, Vol. 6, Iss. 4, October 2017, pp. 133–136.
- [34] N. Liu, D.B. Bogy, Magnetic Storage, in: R.W. Bruce, *Handbook of Lubrication and Tribology*, Volume II, 2nd ed., CRC Press, 2012, pp. 64-1–18.
- [35] Laptop-hard-drive-exposed, Wikimedia, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 16.03.2020)
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laptop-hard-drive-exposed.jpg>
- [36] G. Campardo, F. Tiziani, M. Iaculo, *Memory Mass Storage*, 1st ed., Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [37] Samsung SSD 860 EVO Data Sheet, Samsung, December 2017, Saatavissa (viitattu 22.02.2020): https://www.samsung.com/semiconductor/global.semi.static/Samsung_SSD_860_EVO_Data_Sheet_Rev1.pdf
- [38] Annualized Workload Rate, Seagate, verkkosivu, Saatavilla (viitattu 22.02.2020)
<https://www.seagate.com/gb/en/support/kb/annualized-workload-rate-005902en/>
- [39] Samsung SSD 970 PRO Data Sheet, Samsung, April 2018, Saatavissa (viitattu 22.02.2020): https://www.samsung.com/semiconductor/global.semi.static/Samsung_NVMe_SSD_970_PRO_Data_Sheet_Rev.1.0.pdf
- [40] WD Red Data Sheet, Western Digital, November 2018, Saatavissa (viitattu 22.02.2020): https://media.flixcar.com/f360cdn/Western_Digital-3805661149-eng_spec_data_sheet_2879-800002.pdf
- [41] IronWolf 3.5 HDD Data Sheet, Seagate, July 2017, Saatavissa (viitattu 22.02.2020): https://www.seagate.com/www-content/datasheets/pdfs/ironwolf-12tbDS1904-9-1707US-en_US.pdf
- [42] Force Series Gen.4 MP600 Data Sheet, Corsair, July 2019, Saatavissa (viitattu 14.03.2020): <https://files.bbystatic.com/2rc7kXtrFAAIT9CCu3DtA%3D%3D/B9A0A355-A000-4100-AF01-410CDD6F3504.pdf>
- [43] KC600 SSD Data Sheet, Kingston, Saatavissa (viitattu 14.03.2020)
https://www.kingston.com/datasheets/kc600_us.pdf
- [44] N300 NAS Hard Drive Data Sheet, Toshiba, Saatavissa (viitattu 14.03.2020)
<https://www.toshiba-storage.com/products/toshiba-internal-hard-drives-n300/?pdf>
- [45] Exos X Data Sheet, Seagate, October 2019, Saatavissa (viitattu 14.03.2020)
https://www.seagate.com/files/www-content/datasheets/pdfs/exos-x16-DS2011-2-1910GB-en_GB.pdf
- [46] Hinta.fi-hintavertailusivusto, verkkosivusto, Saatavissa (viitattu 21.04.2020)
<https://hinta.fi>

- [47] Fast Just Got Faster: SATA 6Gb/s, Serial ATA International Organization, May 2009, Saatavissa (viitattu 22.02.2020): https://sata-io.org/system/files/member-downloads/SATA-6Gbs-Fast-Just-Got-Faster_2.pdf
- [48] FAQ – PCI Express 3.0, Peripheral Component Interconnect Special Interest Group, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 22.02.2020): https://web.archive.org/web/20140808133856/https://www.pcisig.com/news_room/faqs/pcie3.0_faq/#EQ2
- [49] S. Lowe, Calculate IOPS in a storage array, TechRepublic, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 27.02.2020): <https://www.techrepublic.com/blog/the-enterprise-cloud/calculate-iops-in-a-storage-array/>
- [50] Solid State Drives Market, MarketsandMarkets, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 30.03.2020): <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/solid-state-drives-market-75076578.html>
- [51] Solid State Drive (SSD) Market Research Report-Forecast 2023, Market Research Future, verkkosivu, Saatavilla (viitattu 30.03.2020): <https://www.marketresearchfuture.com/reports/solid-states-drives-market-1028>
- [52] Hard Disk Drive Market Set to Grow at 10% CAGR through 2029, Helium HDD Gains Prominence over Air-Filled HDD, The Manufacturer, verkkosivu, Saatavilla (viitattu 21.04.2020): <https://www.themanufacturer.com/press-releases/hard-disk-drive-market-set-to-grow-at-10-cagr-through-2029-helium-hdd-gains-prominence-over-air-filled-hdd/>