

Osku Leppälä

# Virtuaalitodellisuuslaitteet ja niiden vaikutus aistijärjestelmien toimintaan -kirjallisuuskatsaus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Optometrismi

Optometrian koulutusohjelma

Opinnäytetyö

Kevät 2017

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Osku Leppälä Virtuaaliodellisuuslaitteet ja niiden vaikutus aistijärjestelmien toimintaan -kirjallisuuskatsaus 54 sivua Kevät 2017
Tutkinto	Optometri (AMK)
Koulutusohjelma	Optometrian koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Optometria
Ohjaajat	Lehtori Juha Päällysaho Lehtori Niina Gould
<p>Virtuaaliodellisuuslasien käyttö on yleistynyt 2010-luvulla viihdeteollisuuden ansiosta. Virtuaaliodellisuuslaitteita on kuitenkin kehitetty ja käytetty 1960-luvulta asti. Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää mitkä aistijärjestelmät ovat käytössä, kun virtuaaliodellisuuslaseja käytetään. Tavoitteena oli myös tarkastella, millä tavalla aistijärjestelmät toimivat virtuaaliodellisuuslaitteiden käytön aikana ja käytön jälkeen. Lisäksi tavoitteena oli löytää tapoja, joilla aistijärjestelmien toimintaa ja poikkeavuuksia voidaan mitata.</p> <p>Opinnäytetyö toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Kirjallisuuskatsaus käsittelee virtuaaliodellisuuslaitteiden historiaa, nykyisiä virtuaaliodellisuuslaitteita ja niiden ominaisuuksia, näköjärjestelmää, virtuaaliodellisuuslaitteiden käytön vaikutusta näköjärjestelmään, tasapainojärjestelmää, virtuaaliodellisuuslaitteiden käytön vaikutusta tasapainojärjestelmään, pahoinvointia, virtuaaliodellisuuslaitteiden käytön vaikutusta pahoinvointiin, sekä pahoinvointikyselyitä. Kirjallisuuskatsauksessa käytetty kirjallisuus käsitteli pääasiassa tieteellisiä tutkimuksia ja artikkeleita aiheesta.</p> <p>Kirjallisuuskatsauksen mukaan virtuaaliodellisuuslasien käyttö aktivoi näköjärjestelmää ja tasapainojärjestelmää. Virtuaaliodellisuuslaitteista ja niiden ominaisuuksista riippuen aistijärjestelmät voivat olla suurelkin rasituksen alaisia. Näköjärjestelmän suurin rasite johtuu akkommodaatio- ja vergenssijärjestelmän ristiriidasta, joka voi aiheuttaa ohimeneviä akkommodaatio- ja vergenssimuutoksia. Tasapainojärjestelmän rasite johtuu tasapainojärjestelmän ja näköjärjestelmän vihjeiden ristiriidasta. Tästä voi seurata pahoinvointia. Näköjärjestelmän muutoksia voi seurata ja tutkia näöntutkimusmenetelmillä. Tasapainojärjestelmän muutoksia voi seurata pahoinvointikyselyillä.</p> <p>Opinnäytetyössä havaittiin, että aistijärjestelmät voivat olla hyvinkin suuren rasituksen alaisena käytettäessä virtuaaliodellisuuslaitteita. Kirjallisuuskatsaus kuitenkin kohdistui pääasiassa vanhempiin tutkimuksiin. Osa aistijärjestelmien rasitteista ja oireista johtuikin vanhempien virtuaaliodellisuuslaitteiden ominaisuuksista. Nykyaikaiset virtuaaliodellisuuslaitteet eroavat ominaisuuksiltaan vanhemmista virtuaaliodellisuuslaitteista paljon. Uudempien virtuaaliodellisuuslaitteiden ei voi olettaa rasittavan aistijärjestelmiä samalla tavalla kuin vanhemmat virtuaaliodellisuuslaitteet.</p>	
Avainsanat	virtuaaliodellisuuslaitteet, näönrasitus, vestibulaarinen järjestelmä, simulaatiopahoinvointi

Author Title Number of Pages Date	Osku Leppälä Virtual Reality Headsets and Their Effect on Functions of Sensory Systems - a Literature Review 54 pages Spring 2017
Degree	Bachelor of Health Care
Degree Programme	Optometry
Specialisation option	Optometry
Instructors	Juha Päälyysaho, Senior Lecturer Niina Gould, Senior Lecturer
<p>The use of virtual reality headsets has increased in the 21<sup>st</sup> century, largely thanks to entertainment industry. However, virtual reality devices have been made since the 1960s. The purpose of this thesis was to find out which sensory systems are active during the use virtual reality headsets. Another purpose of this thesis was to study how these sensory systems act during and after the use of a virtual reality headset. The final purpose of this thesis was to find ways to evaluate and measure the functions and abnormalities of these sensory systems.</p> <p>This thesis was carried out as a literature review. The literature review deals with the history of virtual reality devices, current virtual reality headsets and their properties, visual perception, the effect of the use of virtual reality devices on visual perception, vestibular system, the effect of the use of virtual reality devices on the vestibular system, motion sickness, simulator sickness, the effect of the use of virtual reality devices on motion and simulator sickness, and sickness questionnaires. The literature used in this literature review were mainly research articles and articles about the topic.</p> <p>According to the literature view, the use of virtual reality devices activates visual perception and the vestibular system. Depending on the properties of the virtual reality devices used, these sensory systems may be under a lot of stress. The main source of stress for visual perception is the conflict between accommodation and vergence due to different visual cues. The stress may cause temporary accommodation spasms and vergence changes. Vestibular system's stress is caused by the cue conflict of visual perception and vestibular system. It may cause motion sickness and simulator sickness. Visual perception and its changes can be tracked and measured with eye examination techniques. Changes in the vestibular system can be tracked with motion sickness and simulator sickness questionnaires.</p> <p>It was found that the sensory systems can be under a lot of stress during the use of virtual reality headsets. The literature review focused mainly on older research articles. Some of the stress and the symptoms that followed were caused by the properties of older virtual reality headsets. The properties of the older virtual reality devices differ considerably from the current ones. Current virtual reality headsets cannot be assumed to cause the same type and the same amount of stress as older virtual reality headsets.</p>	
Keywords	virtual reality headsets, visual stress, vestibular system, simulator sickness

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Työn toteutus	2
2.1	Kirjallisuuskatsaus	2
2.2	Aineiston käsittely	2
3	Virtuaalitodellisuuslasit ja niiden ominaisuudet	4
3.1	Historia	4
3.2	Markkinoille tulleet virtuaalitodellisuuslasit	5
3.3	Nykyaikaisten virtuaalitodellisuuslasien näytöt	8
3.4	Virtuaalitodellisuuslasien linssitekniikka	9
4	Virtuaalitodellisuuslasit ja näköjärjestelmän toiminta	12
4.1	Akkommodaatio ja vergenssi	18
4.2	Virtuaalitodellisuuslasien näkökentän ja viiveen vaikutus aistijärjestelmään	26
5	Virtuaalitodellisuuslasit ja pahoinvointi	28
5.1	Matkapahoinvointi	28
5.2	Simulaatiopahoinvointi ja virtuaalitodellisuuslasit	30
5.3	Vektio (koetun liikkeen illuusio) ja virtuaalitodellisuuslasit	32
6	Virtuaalitodellisuuslasit ja tasapaino	36
6.1	Vestibulaarinen järjestelmä	36
6.2	Vestibulo-okulaarinen refleksi	37
6.3	Optinen "virtaus"	38
6.4	Asentoon liittyvä vakaus ja virtuaalitodellisuuslasit	39
7	Yhteenveto ja pohdinta	43
	Lähteet	49

## 1 Johdanto

Idea opinnäytetyöhön kehittyi keväällä 2016, jolloin raapaisin pintaa mahdollisista tutkimuskysymyksistä ja toimintatavoista opinnäytetyön suhteen. Syksyllä 2016 kävin keskustelemassa aiheesta opinnäytetyön ohjaajien kanssa, ja he antoivat omia ehdotuksiaan. Loppuvuodesta 2016 opinnäytetyö sai muotonsa kirjallisuuskatsauksena, ja se toteutettiin alkuvuodesta 2017. Opinnäytetyön työelämän yhteistyökumppanina toimii Metropolia Ammattikorkeakoulu.

Idea opinnäytetyöhön lähti liikkeelle uusien virtuaalitodellisuuslasien saavuttua markkinoille. Nykyaikaiset virtuaalitodellisuuslasit ovat päähän asetettavia näyttölaitteita, eli HMD-laitteita (Head Mounted Display). Alkuperäisenä ajatuksena oli selvittää, millä tavalla nykyaikaisten virtuaalitodellisuuslasien käyttö vaikuttaa ihmisen näköjärjestelmään. Opinnäytetyön edetessä huomattiin, että virtuaalitodellisuuslaseja ja niiden vaikutusta ihmisen aistijärjestelmään on tutkittu joitakin vuosikymmeniä ennen nykypäivää. Tästä tuli tarve tehdä kirjallisuuskatsaus jo tiedossa olevista tutkimuksista aihepiirin sisällä.

Alkuperäiset tutkimuskysymykset muuttuivat hieman ensimmäisten tietokannoista tehtyjen hakujen jälkeen ja tiedon kerääntyessä. Lopullisiksi tutkimuskysymyksiksi muodostuivat: ”Miten virtuaalitodellisuuslasien käyttö vaikuttaa ihmisen aistijärjestelmään?” ja ”Rasittaako virtuaalitodellisuuslasien käyttö näköä, ja miten?”. Tutkimuksia ja tuloksia pyrittiin tarkastelemaan optometrian näkökulmasta. Opinnäytetyön tavoitteena on löytää ja tunnistaa ne aistijärjestelmät jotka ovat käytössä virtuaalitodellisuuslaseja käyttäessä. Tavoitteena on myös tarkastella aistijärjestelmien toimintaa virtuaalitodellisuuslaitteiden käytön aikana ja jälkeen. Tavoitteena on myös löytää ja kirjata tapoja, joilla aistijärjestelmien toimintaa ja poikkeavuuksia voidaan mitata.

## 2 Työn toteutus

### 2.1 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsauksessa on kysymys metodista ja tutkimustekniikasta, jolla tutkitaan tehtyä tutkimusta. Kirjallisuuskatsaus on tutkimustekniikka, jolla tehdään 'tutkimusta tutkimuksesta', eli tarkastellaan ja kootaan aikaisempien tutkimuksien tuloksia jotka ovat perustana uusille tutkimustuloksille. Tällöin kirjallisuuskatsaus voi kehittää olemassa olevaa teoriaa sekä rakentaa uutta teoriaa. Kirjallisuuskatsauksen avulla voidaan myös arvioida teoriaa ja voidaan tunnistaa ongelmia. Kirjallisuuskatsauksella voi myös rakentaa kokonaiskuvaa tietyistä asiakokonaisuudesta. (Salminen 2011: 1, 3.)

Kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena on arvioida ja tulkita saatavilla olevaa oleellista tutkimustietoa liittyen esitettyyn kysymykseen, eli tutkimusongelmaan (Bains – Colditz – Glasziou – Irwing 2001: 1). Systemaattisesti ja tarkasti tehty kirjallisuuskatsaus voi toteutuessaan antaa vastauksen esitettyyn tutkimusongelmaan, jolloin tutkimuksia liittyen esitettyyn ongelmaan ei tarvitse tehdä. Mutta vaikka selvää vastausta ei esitettyyn ongelmaan saada, kirjallisuuskatsaus voi paljastaa kohtia, jotka vaativat lisää tutkimista ja tiedon kartoittamista. (Roine 1999: 6.)

Kirjallisuuskatsauksessa parhaimmillaan käytetään kaikki mahdolliset tutkimukset, tutkielmat ja lähteet, olivat ne julkaistuja tai eivät. Tämä kuitenkin aiheuttaa huomattavaa kuormitusta ja rajoitteita kirjallisuuskatsaukselle, tehden sen lähes mahdottomaksi. Tutkimukset ja lähteet, joita tarkastellaan, tulisi arvioida ja valita kriittisesti. Toistettava ja systemaattinen lähestymistapa on toivottavaa. Materiaali, joka voidaan valita tarkasteltavaksi, tulisi arvioida liittyen tutkimukseen ja esitettyyn tutkimusongelmaan ja -kysymykseen. Tämä voidaan toteuttaa tarkastamalla tutkittavan materiaalin rakennetta, toteutusta ja tuloksia. (Bains ym. 2001: 3, 4.) Niiden lisäksi käytettävien arkistojen selaaminen sopivilla, tutkimusongelmaan liittyvillä hakusanoilla rajaa myös aiheeseen liittyviä tutkimuksia.

### 2.2 Aineiston käsittely

Opinnäytetyö on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Aiheeseen liittyviä tutkimuksia haettiin asiasanoilla kansainvälisistä tutkimusartikkelitietokannoista, kuten ACM,

*EBSCOhost, Google Scholar IEEE Xplore, PubMed, ScienceDirect, ARVO Journals ja Wiley Online Library.* Opinnäytetyössä käsitelty kirjallisuus valittiin tutkimusten asiaankuuluvuuden suhteen. Tutkimusten julkaisuajankohdalla ei ollut merkittävää vaikutusta kirjallisuuden valintaan. Tavoitteena oli välttää katsaus-artikkeleita, mutta niiden sisäl- täessä tarpeeksi tutkijoiden omaa pohdintaa, nekin saatettiin sisältää opinnäytetyön kir- jallisuuteen. Kirjallisuutta opinnäytetyöhön kerättiin myös tutkimusten ja artikkeleiden lähdeluetteloista. Tutkimukset ja artikkelit opinnäytetyön aihepiiristä ovat suhteellisen vä- häisiä määrältään, joten kirjallisuutena käytetyt tutkimukset ja artikkelit esiintyvät usein toistensa lähdeluetteloissa. Sitä kautta poimittu kirjallisuus valittiin asiaankuuluvuuden mukaan.

Ensisijaisesti opinnäytetyössä tutustuttiin vapaasti saatavilla oleviin tutkimuksiin ja artik- keleihin. Aihepiiriin liittyvien tutkimusten ja artikkeleiden ollessa vähäisiä, opinnäyte- työssä tutustuttiin myös tutkimuksiin ja artikkeleihin, jotka olivat saatavilla vain verkkokir- jastojen käyttäjätunnuksilla. Käyttäjätunnuksina toimivat yhteistyökumppanin antamat käyttäjätunnukset. Käyttäjätunnuksia vaativat tutkimukset ja artikkelit pyrittiin pitämään vähäisinä vapaasti saatavilla oleviin tutkimuksiin ja artikkeleihin verrattuna.

Opinnäytetyössä kirjallisuutena on käytetty myös Internetissä julkaistuja verkko-, viihde- ja teknologia-artikkeleita. Tämä johtuu siitä, että virtuaalitodellisuusteknologiaa ja virtu- aalitodellisuuslaitteita tuottavat yhtiöt eivät ole julkaisseet tietoja kaikista osista ja omi- naisuuksista, joita virtuaalitodellisuuslaitteissa on. Näin ollen opinnäytetyössä on jou- duttu turvautumaan kolmannen osapuolen tietoon. Opinnäytetyössä käytetyt verkkoar- tikkelit valittiin kriittisesti.

Pääasiallisia hakusanoja, joita käytettiin tutkimusartikkelitietokannoissa, olivat: *virtual re- ality, virtual reality headset, head-mounted display, HMD, accommodation, vergence, binocular vision, vergence-accommodation, visual discomfort, visual fatigue, motion sickness, simulator sickness,vection, vestibular system ja fresnel lens.* Hakusanoja yh- disteltiin eri tavoin eri tietokannoissa. Esimerkiksi IEEE Xplore -tietokannasta löytyi enemmän teknillisempää tietoa kuin lääketieteellistä tietoa, joten siellä käytetyt hakusa- nat erosivat esimerkiksi PubMedissä käytetyistä hakusanoista. Näillä hakusanoilla ja yk- sinkertaisilla yhdistelmillä löytyi tarpeeksi tutkimuksia ja artikkeleita, joiden lähdeluette- loista voitiin löytää toisia tutkimuksia ja artikkeleita tutkijoiden ja tutkimusten nimillä. Läh- deluetteloista löydettyjä tutkimuksia ja tekijöitä etsittiin ensin tietokannoista ja lopuksi Google Scholarista.

### 3 Virtuaalitodellisuuslasit ja niiden ominaisuudet

#### 3.1 Historia

Virtuaalitodellisuuslasien historian voidaan katsoa alkaneeksi 1950-luvulla, jolloin Morton Heilig rakensi useaa aistia aktivoivan simulaattorin. Simulaattori nimettiin Sensoramaksi ja patentoitiin vuonna 1962. Sensorama oli kuin yksityinen elokuvakoppi, joka näytti elokuvaa, tuotti ääniä, tuoksuja, värinää ja tuulta. Elokuvaa katsottiin stereoskooppisesti linssijärjestelmän lävitse. (Gervautz – Mazuryk 1996: 2; History of Virtual Reality n.d.)

Vuonna 1965 Ivan Sutherland ehdotti ja kuvaili virtuaalisen todellisuuden lopullista ratkaisua, joka olisi keinotekoinen maailma sisältäen interaktiivista grafiikkaa, kosketuksen ja tunteen palautetta, ääntä, hajua ja makua. Sutherland itse kuvaili sitä huoneena, jonka sisällä olevia materiaaleja tietokone pystyisi hallitsemaan. (Gervautz – Mazuryk 1996: 2; History of Virtual Reality n.d.)

Kolme vuotta myöhemmin, 1968, Sutherland rakensi virtuaalitodellisuuslaitteen nimeltä ”The Sword of Damocles” (Damokleen miekka). Tämä laite oli ensimmäinen päähän asetettava näyttölaite, joka oli yhteydessä tietokoneeseen. Laite pystyi seuraamaan pään asentoa ja katsesuuntaa samalla, kun se tarjosi stereoskooppisen näkymän. Laite roikui katosta ja oli melko kookas. (Gervautz – Mazuryk 1996: 2; History of Virtual Reality n.d.)

Virtuaalitodellisuuslasien kohdalla seuraava kehitysaskel oli 1980-luvulla USA:n ilmavoimien ja NASA Ames -tutkimuskeskuksen kehittämät virtuaalitodellisuuslaitteet. Suurempaa huomiota sai kuitenkin Jaron Lanierin ja Tom Zimmermanin yrityksen VPL:n tuottamat virtuaalitodellisuuslaitteet: EyePhone (1988) ja DataGlove (1985). Nämä tuotteet olivat myös kaupallisesti saatavilla. (Gervautz – Mazuryk 1996: 2; History of Virtual Reality n.d.)

1980-luvun lopussa ja 1990-luvun alussa nähtiin monia projekteja ja muutamia tuotteita virtuaalitodellisuuden alalla. Vuonna 1989 Fake Space Labs kehitti BOOM-nimisen virtuaalitodellisuuslaitteen, jossa pienessä laatikossa olevia kahta CRT-monitoria katsottiin stereoskooppisesti. Tässä monitoreilla näytetyssä virtuaalimaailmassa pystyi liikkumaan



laitteen antaman tilan verran. (Gervautz – Mazuryk 1996: 3.) 1990-luvulla viihdemaailma yritti ottaa virtuaalitodellisuuden tehokkaampaan käyttöön. Peliyritykset, kuten Sega ja Nintendo, yrittivät kehittää omat virtuaalitodellisuuslaitteensa. Segan virtuaalitodellisuuslasit (1993) jäivät kuitenkin vain prototyypivaiheeseen ja Nintendon Virtual Boy -laitteisto (1995) vedettiin pois markkinoilta vuotta myöhemmin. Molempien laitteiden ongelmat kiteytyivät niiden teknisiin ongelmiin. (History of Virtual Reality n.d.) Näiden epäonnistumisien jälkeen suuri yleisö ja yritykset menettivät kiinnostuksensa virtuaaliseen todellisuuteen, joka johti virtuaalitodellisuusteknologian hitaaseen kehittymiseen. Tekniset ratkaisut kuitenkin kehittyivät nopeasti, jonka seurauksena ihmisten kiinnostus virtuaalitodellisuuteen heräsi uudelleen.

Vuonna 2012 Palmer Luckey kehitti oman virtuaalitodellisuuslaitteensa. Sitä esiteltiin pelialojen messuilla ja se keräsi valtavan huomion. Kesällä 2012 Luckey perusti oman yrityksensä, Oculus VR, ja pian sen jälkeen hän aloitti joukkorahoituskampanjan laitteen tuottamiselle ja jatkokehitykselle. (Kumparak 2014.) Kolmessakymmenessä päivässä joukkorahoitus keräsi 2,437,429 \$ (Kickstarter 2012) ja laitteen kehitys pääsi alkamaan. Vuonna 2014 Facebook osti Oculus VR:n (Oculus VR 2014). Keväällä 2016 ensimmäiset kuluttajaversiot heidän kehittämästään Oculus Rift -virtuaalitodellisuuslaseista olivat valmiit (Oculus VR 2016).

Suuren yleisön huomion kiinnittyessä uudelleen virtuaalitodellisuuteen, muutkin laitevalmistajat aloittivat tai julkaisivat aikomuksensa omien virtuaalitodellisuuslaitteidensa kehittämisen. Peli- ja jakeluyhtiö Valve Corporation ilmoitti vuonna 2015 tekevänsä älypuhelin-yhtiö HTC:n kanssa omaa virtuaalitodellisuuslaitettansa nimeltään Vive (D’Orazio – Savov 2015). Vuonna 2014 älypuhelin-yhtiö Samsung ilmoitti tekevänsä yhteistyötä Oculus VR:n kanssa tuodakseen markkinoille älypuheliin perustuvan virtuaalitodellisuuslaitteiston, Samsung Gear VR (GSMArena, 2014). Myös viihde-elektroniikkavalmistaja Sony Corporation julkisti vuonna 2014 oman virtuaalitodellisuuslaitteiston kehittämishankkeensa (McWhertor 2014).

### 3.2 Markkinoille tulleet virtuaalitodellisuuslasit

2000-luvulla on julkaistu monia virtuaalitodellisuuslaseja. Kuitenkin vasta vuotta 2016 pidetään ajankohtana, joka toi virtuaalitodellisuuden tälle vuosituonnelle. Tämä oli lähinnä Oculus VR:n ja HTC Viven ansiota, niiden tultua markkinoille. Nämä kaksi yhtiötä

muodostavatkin kaksi viidestä yhtiöstä, jotka ovat tuoneet markkinoille viisi tunnetuinta virtuaalitodellisuuslaitetta. (Smith 2016.)

Ensimmäisenä näistä viidestä voidaan mainita Oculus Rift, joka julkaistiin keväällä 2016. Oculus Rift vaatii toimiakseen tietokoneen, johon virtuaalitodellisuuslaite yhdistetään. (Lang 2016a: 1; Smith 2016.) Oculus Rift vaatii tietokoneelta tietyn tasoisia komponentteja, esimerkiksi näytönohjaimen tulisi olla vähintään yhtä tehokas kuin NVIDIA GTX 960 tai AMD Radeon R9 290 (Oculus n.d.). Oculus Rift seuraa käyttäjänsä pään asentoja gyroskoopin, kiihtyvyyssanturin ja magnetometrin avulla. Näiden lisäksi laitteessa on myös infrapuna-anturit ja -kamera, jotka seuraavat käyttäjän liikkeitä oikeassa maailmassa ja virtuaaliympäristössä. (Oculus VR Tracking n.d.)

Toinen suurta huomiota herättänyt virtuaalitodellisuuslaite, jota pidetään Oculus Riftin suurimpana kilpailijana, on HTC:n ja Valve Corporationin yhdessä vuonna 2016 julkaissama HTC Vive. Kuten Oculus Rift, HTC Vive vaatii toimiakseen myös tietokoneen, johon virtuaalitodellisuuslaite yhdistetään. (James 2016; Smith 2016.) Kuten Oculus Rift, myös HTC Vive vaatii tietyn tasoisia komponentteja toimiakseen, esimerkiksi suositellun näytönohjaimen tulisi olla yhtä tehokas kuin NVIDIA GTX 1060 tai AMD Radeon RX 480 (Vive Ready Computers n.d.), mutta vähintään NVIDIA GeForce GTX 970 tai AMD Radeon R9 290 (Davies 2016: 8). HTC Vive -kypärässä on 32 sensoria ja kahdessa käsin pidettävässä ohjaimessa on kummassakin 24 sensoria. Nämä sensorit yhdistettynä HTC Viven liikkeenseurantalaitteisiin mahdollistaa käyttäjän asennon ja liikkeiden tarkan seurannan. Liikkeenseurantalaitteet ja sensorit mahdollistavat käyttäjän liikkumisen fyysisessä ja virtuaalisessa tilassa. Itse liikkeenseuranta tapahtuu LED-valojen avulla. (Buckley 2015; Vive n.d.)

Kolmantena laitteena voidaan mainita loppuvuodesta 2016 markkinoille tullut PlayStation VR, projektinimeltään PlayStation Morpheus. Kuten edellä mainitut virtuaalitodellisuuslaitteet, myös PlayStation VR vaatii toimiakseen ulkoisen laitteen. Se ei kuitenkaan ole tietokone, vaan PlayStation 4 -pelikonsoli. (PlayStation n.d.; Smith 2016.) PlayStation VR:ssä on myös gyroskooppi ja kiihtyvyyssanturi, jotka seuraavat pään liikkeitä. Näiden lisäksi kypärässä on 9 anturia, joita virtuaalitodellisuuslaitteiston kamera seuraa. Myös laitteiston ohjaimissa on anturit, joita kamera seuraa. Näin käyttäjä voi liikkua fyysisessä ja virtuaalisessa tilassa. (Lang 2016b: 2–3; PlayStation n.d.)

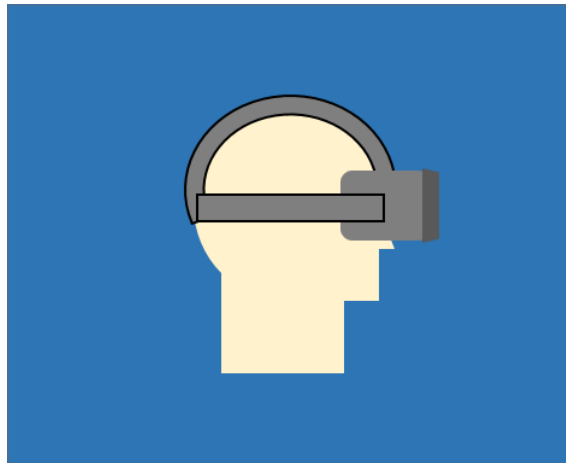
Edellä mainitut virtuaalitodellisuuslaitteet kytketään fyysisesti tietokoneeseen tai pelikonsoliin. Seuraavaksi esitelly virtuaalitodellisuuslaite ei vaadi tietokonetta, vaan älypuheli-  
men. Samsungin Gear VR julkaistiin vuotta aikaisemmin, vuonna 2015, kuin edellä mai-  
nitus virtuaalitodellisuuslaitteet. Tämä lähestymistapa tuo vapauksia ja rajoitteita toisiin  
laitteisiin verrattuna. (Smith 2016.) Gear VR:ssä on kiihtyvyysanturi, gyroskooppi ja etäi-  
suysanturi (Gear VR | Samsung n.d.).

Myös Google on tuottanut virtuaalitodellisuuslaitteita. Google tuli markkinoille jo ennen  
edellä mainittuja yhtiöitä, vuonna 2014, Google Cardboard -virtuaalitodellisuuslasiansa  
muodossa. Sen jälkeen Google on tuonut lisää teknologiaan perustuvia virtuaalitodelli-  
suuslaitteita. Uusin versio niistä on Google DayDream View, joka tarvitsee toimiakseen  
älypuhelimien, kuten myös Gear VR ja Google Cardboard -lasit tarvitsevat. (Smith 2016;  
Statt 2014.)

Oculus Riftin ja muiden edellä mainittujen virtuaalitodellisuuslasien myötä markkinoille  
on saapunut myös monia muita virtuaalitodellisuuslaseja (ks. kuvio 1 ja 2). Nämä virtu-  
aalitodellisuuslasit ovat lähes käytännössä aina halvempia kuin edellä mainitut virtuaali-  
todellisuuslasit, itsekoottavaa Google Cardboardia lukuun ottamatta. Halpa hinta muo-  
dostuu nykyisten älypuhelimia käyttävien virtuaalitodellisuuslasien rakenteesta, jotka ei-  
vät vaadi kalliita teknisiä osia. (Ralph 2015 n.d.)



Kuvio 1. Kuvissa Spectra Optics G-02 3D -virtuaalitodellisuuslasit. Vasemmalla näkyy nykyai-  
kaisten virtuaalitodellisuuslasien yleinen muoto: hihnat, jotka tuetaan päähän ja virtu-  
aalitodellisuuslasien etuosa. Oikealla olevassa kuvassa näkyy virtuaalitodellisuusla-  
sien etuosa edestä avattuna. Älypuhelin sijoitetaan pöydällä makaavaan pidikkeeseen.



Kuvio 2. Nykyaikaisten virtuaalitodellisuuslasien yleisluontoinen ulkomuoto. Virtuaalitodellisuuslasit asetetaan käyttäjän silmien eteen ja kiinnitetään hihnoilla tukevasti päätä vasten. Nykyaikaiset virtuaalitodellisuuslasit näyttävät yleensä binokulaarista kuvaa.

### 3.3 Nykyaikaisten virtuaalitodellisuuslasien näytöt

Oculus Rift – virtuaalitodellisuuslasien näyttö on OLED-perustainen AMOLED-näyttö. Se koostuu kahdesta erillisestä AMOLED-näytöstä, joiden erotustarkkuudet ovat 1080 pikseliä horisontaalisesti ja 1200 pikseliä vertikaalisesti (1080x1200 pikseliä). Näyttöjen ulkoiset mitat ovat 3.54” ja virkistystaajuudet 90Hz. (Lang 2016a: 2; Oculus Rift | OLED-Info n.d.)

HTC Vive – virtuaalitodellisuuslasien näyttö on OLED-perustainen AMOLED-näyttö. Näyttö koostuu kahdesta erillisestä AMOLED-näytöstä, joiden erotustarkkuudet ovat 1080x1200, ulkoiset mitat 3.54” ja virkistystaajuudet 90Hz. (HTC Vive | OLED-Info n.d.; James 2016; Vive n.d.)

PlayStation VR – virtuaalitodellisuuslasien näyttö on OLED-perustainen AMOLED-näyttö. Näyttö koostuu yhdestä AMOLED-näytöstä, jonka erotustarkkuus on 1920x1080. Näytön koko on 5.7” ja virkistystaajuus 120Hz tai 90Hz. (Lang 2016b: 2; PlayStation VR n.d.; Sony Playstation VR | OLED-Info n.d.)

Samsungin Gear VR – virtuaalitodellisuuslasien näyttö koostuu virtuaalitodellisuuslaseihin kiinnitettävästä älypuhelimesta. Gear VR – virtuaalitodellisuuslasit tukevat Samsungin uudempia älypuhelimia, joita ovat: Galaxy S7, S7 edge, Note5, S6 edge+, S6 ja S6

edge. Puhelinten näyttöjen koot ja erotustarkkuudet vaihtelevat hieman, mutta esimerkiksi Galaxy S7:n näyttö on AMOLED-näyttö, jonka erotustarkkuus on 2560x1440. Näytön koko on 5.1". Näyttöjen virkistystaajuuudet voivat myös vaihdella. (Gear VR | Samsung n.d.; Samsung Galaxy S7 | OLED-Info n.d.)

Googlen virtuaalitodellisuuslasien näyttö koostuu älypuhelimista ja sovelluksesta. Esimerkiksi Google Cardboardiin soveltuvan älypuhelimien tulee olla Android-käyttöjärjestelmän versio 4.1 tai sitä uudempi. (Cardboard 2016) Markkinoilla olevien Android-käyttöjärjestelmillä toimivien puhelinten määrän ja ominaisuuksien erilaisuuksien vuoksi Googlen virtuaalitodellisuuslaseihin ei tässä paneuduta syvemmin.

OLED-näyttö koostuu kahden elektrodin väliin sijoitetusta orgaanisesta materiaalista. Vähintään toisen elektrodeista tulee olla läpinäkyvä. Kun niihin johdetaan sähkövirtaa, orgaaninen materiaali tuottaa valoa. OLED-näyttöjen materiaali voi olla kahdentyyppistä: pieniä molekyylejä tai polymeerejä. OLED-näytöt toimivat ilman taustavaloa, ne tuottavat tarkkaa ja kirkasta kuvaa, ne ovat kevyitä ja ohuita, mutta kuluttavat vain vähän energiaa, ja voivat myös taipua. (Ibrahim 2012: 12)

AMOLED-näytöt ovat OLED-näytöistä kehitettyjä näyttöjä. AMOLED-näytöissä jokainen pikseli on yhdistetty transistoriin, joka toimii kytkimenä. Tällä tavalla pikseli voidaan aktivoita, kun sitä halutaan muuttaa, mutta se voidaan myös eristää ja ylläpitää sen nykyistä tilaa samalla, kun toisia pikseleitä aktivoidaan. Toinen transistorikerros on myös yhdistetty jokaiseen pikseliin ylläpitämään OLED-laitetta. AMOLED-näytöt kuluttavat vielä vähemmän virtaa, ja ne mahdollistavat suurempien pikselimäärien käytön. (Templier 2014: 40.)

### 3.4 Virtuaalitodellisuuslasien linssitekniikka

Virtuaalitodellisuuslasit pitävät sisällään linssijärjestelmän, jonka avulla katsottavat näytöt tulisi näkyä terävästi. Näyttöihin luodut kuvat ovat erittäin lähellä ihmisen silmiä. Näin ollen virtuaalitodellisuuslasien linssien täytyy olla erityisesti suunniteltu niille tarkoitettuun tehtävään, jotta käyttö- ja katselukokemus olisivat miellyttävät.

Oculus Rift -virtuaalitodellisuuslaseissa on käytössä hybridifresnel-linsit. Linsseissä on fresnel-prismoja, mutta linsseissä on myös kaarevuutta takapinnalla. Tämä saattaa vaikuttaa linssien polttopisteeseen katsottaessa linssien läpi sen eri kohdista. (Oculus Rift

CV1 Teardown 2016.) Linssijä voidaan liikuttaa vaakatasossa virtuaalitodellisuuslaitteen sisällä säätäen näin linssien keskipisteiden etäisyyttä. Oculus Riftin linssien väliset etäisyydet voidaan säätää 58-72mm etäisyydelle toisistaan. Riippuen kuinka kaukana käyttäjän silmät ovat linseistä, virtuaalitodellisuuslaitteella tulisi teoriassa saavuttaa binokulaarisesti 100 asteen horisontaalinen näkökenttä, mutta mitatusti tämä voi olla arviolta 94°. Pystysuunnassa voidaan saavuttaa noin 93° näkökenttä. Näin ollen käyttäjän binokulaarinen katselukenttä on noin 94° x 93°. (Davies 2016: 3; Kreylos 2016; Lang 2016a: 2.) Binokulaarinen tarkoittaa kahdella silmällä katsomista, jolloin molempien silmien verkkokalvoille muodostuu samanlainen kuva (Campos – Von Noorden 2002: 7).

HTC Vive -virtuaalitodellisuuslaseissa on myös käytössä fresnel-linssit. Toisin kuin Oculus Riftissä, nämä fresnel-linssit eivät ole hybridejä. Niiden takapinta on siis tasainen eli polttopiste pysyy samana koko linssin alueella. (HTC Vive Teardown 2016.) Linssijä voidaan liikuttaa vaakatasossa ja syvyysuunnassa. Horisontaalisuunnassa linssien väliseksi etäisyydeksi voidaan asettaa 60.8-74.6mm. Linssijä voi myös liikuttaa muutaman millimetrin syvyysuunnassa, joka vaikuttaa polttopisteeseen ja fresnel-linssien etäisyyteen käyttäjän kasvoista. Tällä on vaikutus näkökentän kokoon. (Davies 2016: 3; James 2016; Kreylos 2016.) HTC Viven tuotetiedot kertovat, että laitteella voidaan saavuttaa 110° näkökenttä (Vive n.d.), mutta käyttäjät ovat itse mitanneet vaakatason suurimmaksi binokulaariseksi kentäksi 110° ja pystysuunnan kentäksi 113°. Siten binokulaarinen näkökenttä on laajimmillaan noin 110° x 113°. (Davies 2016: 3; James 2016; Kreylos 2016.)

PlayStation VR -virtuaalitodellisuuslaseissa on käytössä tavanomaisemmat linssit. Niissä ei siis ole käytetty fresnel-tekniikkaa. Toisin kuin Oculus Riftissä ja HTC Vivessä, PlayStation VR:ssä linssien välistä etäisyyttä vain säädetään ohjelmiston avulla. Linssijä voidaan myös liikuttaa vain syvyysuunnassa lähemmäksi tai kauemmaksi käyttäjän kasvoista. Näin, valmistajan oman ilmoituksen mukaan, saavutetaan 100° binokulaarinen näkökenttä. (Davies 2016: 3; Lang 2016b: 2; PlayStation VR n.d.) Linssit ovat 14 mm paksuja ja niissä on kupolimainen rakenne, toisin kuin Oculus Riftissä ja HTC Vivessä (PlayStation VR Teardown 2016).

Oculus Riftissä ja HTC Vivessä käytetään fresnel-linssijä, joihin tyypillisesti sisältyy kuvausvirheitä eli aberraatioita. Yksi näistä on häikäisevä valo, etenkin korkeakontrastisissa kuvissa. Ongelmaan vaikuttaa osaltaan myös näyttöjen suuri kirkkaus. Fresnel-linssien urat ovat kuitenkin tarpeeksi pieniä, eikä niitä käytössä yleensä havaita. (James

2016; Lang 2016a: 2; Kreylos 2016.) Häikäisyongelmia ei ole raportoitu PlayStation VR:llä, koska siinä ei käytetä fresnel-linssitekniikkaa (Lang 2016b: 2).

Fresnel-linssi on optinen linssi, jonka perusajatus on säilyttää linssin ulkopinnalla oleva kaarevuussäde samalla, kun linssistä poistetaan optista materiaalia. Linssin etupinnan kaarevuuden säilyttäminen samanlaisena tapahtuu rajallisten ja kaltevien prismojen avulla, jotka asetetaan ennalta laskettuun kaltevuus- ja taivutuskulmaan fresnel-linssin pinnalle. (Davis – Kühnlenz 2007: 52.)

Fresnel-linsseillä on tiettyjä käyttötarkoituksia, joissa ne ovat hyviä. Ne voivat kerätä erittäin tehokkaasti tulevaa valoa, keskittäen tulevan paralleelin valon linssin polttopisteeseen. Tätä ominaisuutta käytetään apuna esimerkiksi aurinkoenergiateollisuudessa. Fresnel-linsseillä voidaan myös hajoavat eli divergoivat valonsäteet suunnata yhdensuuntaisiksi eli paralleleiksi valonsäteiksi. Lisäksi fresnel-linsseillä voidaan suurentaa katsottavaa kuvaa. (Davis – Kühnlenz 2007: 54–55.)

Fresnel-linsseillä on kuitenkin myös huonoja ominaisuuksia. Linssien rakenteen vuoksi, kaikki valo ei taitu halutulla tavalla, joka johtaa valon ”karkaamiseen”. Linsseissä olevat urat ja niiden koko vaikuttavat myös linssien optiseen laatuun. Mitä isompia urat ovat, sitä helpommin ne ovat havaittavissa linssien läpi katsoessa. Lisäksi, jos prismojen kaltevuus pienenee, niin suurempi määrä valonsäteitä ei osu haluttuun polttopisteeseen. (Davis – Kühnlenz 2007: 52–53.)

#### 4 Virtuaalitodellisuuslasit ja näköjärjestelmän toiminta

Vuonna 1992 Englannissa järjestettiin tutkimus, jossa tutkittiin binokulaarisen HMD-laitteen (pähän asetettava näyttölaite) lyhyen ajan käytön vaikutusta näköjärjestelmän toimintaan. Binokulaarisessa HMD-laitteessa silmille näytetyt kuvat ovat päällekkäin, muodostaen kolmiulotteisen stereoskooppisen vaikutelman. Kaksikymmentä henkilöä, joilla oli normaali tai normaaliksi korjattu näkö, osallistuivat tutkimukseen. Heiltä mitattiin näöntarkkuudet lähelle ja kauas, stereonäkö, foriat lähelle ja kauas, konvergenssin lähipiste ja akkommodaatio. (Mon-Williams – Rushton – Wann 1993: 388–389.) Forialla tarkoitetaan piilokarsastusta, joka on silmän normaali lepoasento ja tulee yleensä ilmi silloin, kun silmien välinen yhteistoiminta häiriytyy (Campos – Von Noorden 2002: 127). Tutkittavien tehtävänä oli ajaa virtuaalitodellisuudessa 10 minuutin ajan polkupyörällä. Polkupyörä oli kiinnitetty tutkimustilan lattiaan tukevasti. (Mon-Williams ym. 1993: 388–389.)

HMD-laitteena oli VPL Eyephone LX, jossa on kaksi 3” LCD-ruutua, yksi kummallekin silmälle. Linssijärjestelmänä oli kaksi kappaletta +18 dioptrian fresnel-linssiä, yhteensä siis +36 dioptriaa silmää kohden. Linssien ja näyttöjen väliin asetettiin puoliläpäisevä suodatinlinssi. Näytöt asetettiin lähelle linssien polttopisteitä. Näyttöjen tarkkuus vaakatasossa oli 360 pikseliä ja pystytasossa 240 pikseliä. Linssien keskipisteiden etäisyys oli 65 mm, tutkittavien pupillien välinen etäisyys oli keskimäärin 61 mm. Linssijä oli mahdollisuus liikuttaa syvyysuunnassa. HMD-laitteessa oli liikkeenseurantajärjestelmä, joka toimi noin 60ms viiveellä. HMD-järjestelmän kuvantuottotaajuus oli 12-25 Hz. HMD-laitteen tuottaman virtuaalisen kuvan kuvataso oli alle 50 cm etäisyydellä, ja näytöt olivat keskiöity 57mm päähän toisistaan. (Mon-Williams ym. 1993: 387, 389.)

Tutkimuksessa oli monta tekijää, jotka vaikuttivat näköjärjestelmään. Katsottavien kuvien huono laatu, kontrasti ja valaistus; linseistä ja järjestelmästä johtuva prismaattinen vaikutus; sekä akkommodaation ja konvergenssin aiheuttama rasitus. HMD-laite oli rakennettu niin, että käyttäjien piti akkommodoida kolme dioptriaa, jotta he pystyivät pitämään kuvat terävinä ja fuusioituina verkkokalvoilla. (Mon-Williams ym. 1993: 389.)



Tutkittavien näöntarkkuusarvot parhaalla mahdollisella korjauksella olivat 1.2 ennen tutkimusta. Tutkimuksen jälkeen neljältä tutkittavalta mitattiin yhtä näöntarkkuusriviä huomppi näöntarkkuus. -0.25 dioptrian lisäys palautti näöntarkkuuden entiselle tasolle. Näistä neljästä tutkittavasta, kolme tutkittavaa raportoivat näkönsä hämärtyneen. Heillä oli myös vaikeuksia tarkentaa katseitaan. Oireet katosivat noin viiden minuutin kuluttua. Näkökyvyn alenemisen arveltiin johtuvan lisääntyneestä fiksaatiodisparaatiosta, tai pienestä akkommodaatiospasmista. (Mon-Williams ym. 1993: 389–390.) Fiksaatiodisparaatioissa silmien verkkokalvoille tulevat kuvat eivät osu tarkalleen vastaaville verkkokalvoalueille, mutta katsottava kohde näkyy kuitenkin yhtenä (Campos – Von Noorden 2002: 21). Akkommodaatiospasmiä tukee -0.25 dioptrian korjaus, mitatun fiksaatiodisparaation lisääntyminen kahdella neljästä tutkittavasta, sekä mitatun fiksaatiodisparaation kasvu yhdeksällä muulla tutkittavalla, joilla binokulaarinen näöntarkkuus ei alentunut. (Mon-Williams ym. 1993: 389–390.)

Tutkittavien lähiforiat muuttuivat hieman HMD-laitteen käytön jälkeen. Kaukoforioita mitattaessa huomattiin merkitsevä muutos esoforiseen suuntaan. Yhden tutkittavan lähiforia muuttui exoforiseen suuntaan. Yksi tutkittava, jolla oli esoforiaa sekä lähelle että kauas ennen tutkimusta, koki suuren muutoksen esoforiseen suuntaan tutkimuksen jälkeen, viisi prismadioptriaa kummallakin etäisyydellä. Muiden tutkittavien foriat palautuivat normaaleihin arvoihinsa viidessä minuutissa, mutta tällä tutkittavalla kesti 40 minuuttia. Esoforinen muutos kertoo häiriöstä akkommodaatio-vergenssijärjestelmässä. Yhdeksäntoista tutkittavaa kahdestakymmenestä koki foriamuutoksen niin häiritseväksi, että prismakorjaus olisi helpottanut heidän näköoireitaan. Tämä tulos kertoo siitä, että virtuaalitodellisuus ja HMD-laite asettivat tutkittavien näköjärjestelmät niin suuren rasituksen alaiseksi, että pientä fiksaatiodisparaatiota esiintyi. (Mon-Williams ym. 1993: 390.)

Suurimmalla osalla tutkittavista konvergenssin lähipisteen etäisyys kasvoi tutkimuksen jälkeen. Tulos oli merkitsevä. Tuloksen arvellaan johtuneen siitä, että akkommodaatio- ja vergenssijärjestelmä olivat jo suuren rasituksen alaisena. Stereonäköä mitatessa vain kahden tutkittavan arvot muuttuivat. Ensimmäisen tutkittavan tulos putosi 15":stä 30":een. Toisen tutkittavan tulos sen sijaan putosi 60":stä 480":aan. Tämä tutkittava oli sama henkilö, jonka esoforia kasvoi erittäin paljon ja tasoittui muita tutkittavia hitaammin. Näin ollen tulos todennäköisesti johtui muista rasitteista, eikä ollut ensisijainen oire. (Mon-Williams ym. 1993: 390.)

Tutkittavia haastateltiin ennen tutkimusta päänsäryn, kahtena näkemisen, hämärtyneen näkemisen ja arkojen silmien oireista. Yksikään tutkittava ei ilmoittanut kokevansa näitä oireita ennen tutkimusta. Tutkimuksen jälkeen kaksitoista tutkittavaa raportoi joitakin näistä oireista. Neljä tutkittavaa raportoi hämärtyneestä näöstä. Kolme tutkittavaa raportoi päänsärystä pään etuosassa, joista yksi raportoi myös hetkellisestä kahtena näkemisestä. Kolme tutkittavaa kärsi pahoinvoinnista, joista yksi tutkittava kärsi aroista silmistä. Yksi tutkittava raportoi väsyneistä silmistä ja toinen matkapahoinvoinnista. Viiden minuutin kuluttua oireet loppuivat kaikilta paitsi kahdelta tutkittavalta, jotka olivat raportoineet päänsärystä. Näiden kahden tutkittavan päänsäryt jatkuivat iltaan asti. Tuloksista voidaan päätellä, että pieni fiksaatiodisparaatio on hyvä mittari silmien liikuttajalihasten rasituksesta. (Mon-Williams ym. 1993: 390.)

Tutkijat painottavat, että HMD-laitteita tulisi olla mahdollista säätää niin, että linssien keskiväli tai näyttöjen keskiväli olisi optimaalisesti käyttäjän näkölinjalla. Ne tulisi aina säätää jokaisen käyttäjän kohdalla oikein, jotta käyttäjät eivät kokisi suuria määriä rasitusta. Tutkijat ovat huolissaan oireista ja niiden vaikutuksista näkökykyyn heti käytön jälkeen ja pidemmällä aikavälillä. Tutkijat toivoivat yhteistyötä laitevalmistajien ja näkökyvyn asiantuntijoiden välillä, jotta akkommodaatio- ja konvergenssijärjestelmien kanssa ilmeneviä ongelmia voitaisiin lieventää tai välttää kehittämällä virtuaalitodellisuuslaitteiden ominaisuuksia. (Mon-Williams ym. 1993: 390–391.)

Myöhemmässä tutkimuksessaan Mon-Williams, Rushton ja Wann (1994) toistivat samat mittaukset isommalle tutkimusjoukolle uudemmilla laitteilla. Viisikymmentä tutkittavaa pelasivat videopeliä Visette 2000 HMD-laitteella, joka oli bi-okulaarinen. Bi-okulaarinen HMD-laite muodostaa kaksi täysin samanlaista kuvaa silmille, jolloin stereoskopiaa ei saavuteta. Katsottu kuva on edelleen kolmiulotteinen, mutta litteä. Tällä pyritään välttämään akkommodaation ja vergenssin ristiriita. HMD-laitteessa on +10.8 dioptrian polymeerilinssit molemmille silmille, ja niiden keskiväliä pystyy liikuttamaan 58-70 mm välillä. HMD-laitteen näytössä on 756 pikselin vaakasuunnan ja 244 pikselin pystysuunnan erotustarkkuus. Näkökenttä vaakasuunnassa on 60°. HMD-laitteessa on pään liikkeiden seurantajärjestelmä, joka toimii 8-16 ms viiveellä. Videopelin kuvan virkistystaajuus on noin 12 Hz. Tutkittavat pelasivat videopeliä kolmessa eri ryhmässä; 5 minuuttia, 10 minuuttia tai 30 minuuttia. (Mon-Williams – Rushton – Wann 1994: 255, 257.)

Tutkittavilta mitattiin näöntarkkuus, lähi- ja kaukoforiat, stereonäkö, akkommodaatio, konvergenssin lähipiste, pupillin koko ja pupillien keskiväli. Kaikilla tutkittavilla oli vähintään 0.5 näöntarkkuusarvo. Yhdellä tutkittavista oli karsastusta. Tutkittavien annettiin itse säätää linssien keskiväli parhaimmiksi kokemilleen etäisyyksille, koska huomattiin, että tarkan pupillien keskivälin asettaminen linssien keskiväliksi aiheutti esoforiaa. Tutkittavat asettivat linssien keskiväliksi keskimäärin 1.7 mm pienemmän etäisyyden kuin heidän pupillien keskiväli oli. Tutkijat arvelivat tämän johtuvan konvergenssin tarpeesta ja linssien tuottamasta prismasta. (Mon-Williams ym. 1994: 257–259.)

Merkittäviä muutoksia näkösuorituksissa ei havaittu minkään ryhmän sisällä. Ainoastaan yksittäistapauksia nousi esille. Yksi tutkittavista koki merkitsevän muutoksen exoforiseen suuntaan 30 minuutin tutkimuksen jälkeen. Toinen tutkittava koki merkitsevän muutoksen esoforiseen suuntaan 30 minuutin tutkimuksen jälkeen. Muita oireita heillä ei esiintynyt. Exoforinen muutos voi selittyä sillä, että tutkittava asetti linssien keskivälin liian pieneksi, tuottaen liikaa prismaattista vaikutusta tutkittavan näköjärjestelmälle. Muutos hävisi viiden minuutin kuluttua tutkimuksesta. Esoforinen muutos voi selittyä sillä, että tutkittava ei saanut asetettua linssijä tarpeeksi lähelle toisiaan, jolloin linssit eivät tuottaneet tarpeeksi prismavaikutusta helpottaakseen tutkittavan näköjärjestelmää. (Mon-Williams ym. 1994: 259.)

Viiden minuutin tutkimusryhmässä raportoitiin kevyttä hämmentymistä. Kymmenen minuutin tutkimusryhmässä kaksi tutkittavaa raportoi hämmentyneisyydestä ja kaksi muuta tutkittavaa väsyneistä silmistä ja kevyestä silmien rasituksesta tutkimuksen jälkeen. Kolmenkymmenen minuutin tutkimusryhmässä yksi tutkittava raportoi hämmentyneisyydestä ja toinen tutkittava raportoi silmien tarpeesta tarkentaa heti tutkimuksen jälkeen. Kaikki oireet vähenivät viiden minuutin kuluessa. (Mon-Williams ym. 1994: 259.)

Tutkimuksessa havaittiin, että näköjärjestelmän konvergenssiä ja sen tarvetta olisi hyvä tutkia ja seurata. HMD-laitteen kuva saattaa aktivoita akkommodaatiovergenssiä, ja HMD-laite itsessään proksimaalista vergenssiä. Tästä voi johtua muutos konvergenssin tarpeeseen, joka voi johtaa linseistä johtuvaan prismavaikutukseen. Näköjärjestelmä saattaa yrittää korjata prismavaikutuksen konvergoimalla lisää, ja tämä johtaa esoforian lisääntymiseen kuten kahdessa tutkittavassa nähtiin. Tutkijat painottavat HMD-laitteiden linssien tärkeyttä ja silmien välistä refraktiotasapainoa. Verrattuna tutkijoiden aikaisempaan tutkimukseen (1993), Mon-Williams ym. haluavat korostaa, että tutkimuksissa käytetyt HMD-laitteet olivat hyvin erilaisia. Tutkimustuloksista voidaan tehdä johtopäätelmä,

että HMD-laitteita voidaan käyttää ilman binokulaarisia muutoksia. (Mon-Williams ym. 1994: 259–260.)

Silmän toiminnan muutoksia virtuaalitodellisuuslaitteiden käytön jälkeen tutkittiin myös 1990-luvun lopulla. Tutkimuksessa käytettiin kolmea erilaista HMD-laitetta (ks. taulukko 1). HMD-laitteiden linssien väliset etäisyydet jätettiin taulukon mukaisiksi, vaikka niitä olisikin voitu muuttaa. Vain yksi HMD-laite näytti stereoskooppista kuvaa tutkimuksen aikana, toiset kaksi näyttivät bi-okulaarista kuvaa. Tutkittavia oli 41. Heiltä mitattiin kaukoforiat ja pupillien keskiväli. (Howarth 1999: 59, 63–64.)

	<b>Virtual i-glasses</b>	<b>Virtuality</b>	<b>Division</b>
3D Scenario	Yes	Yes	Yes
Stereoscopic display	No, bi-ocular	No, bi-ocular	Yes, 46.4° overlap
Inter-ocular distance	60 mm	70 mm	64 mm
Field of view (h x v)	30° x 23.6°	60° x 46.8°	105° x 41°
IOD adjust	No	Possible (not used)	Software configured
Focus adjust	No, spectacles ok	Yes	No, some spectacles ok

Taulukko 1. HMD-laitteet ja niiden ominaisuudet Howarthin (1999) tutkimuksessa (mukaillen Howarth 1999: 63).

Havaittiin, että kaksi HMD-laitetta aiheuttivat keskimääräisesti merkitsevää exoforista muutosta tutkittavissa. Yksi HMD-laite, Virtuality, aiheutti keskimääräisesti merkitsevää esoforista muutosta tutkittavissa. Suurin osa tutkittavista olivat kaikissa kolmessa tutkimusryhmässä, joten tulokset eivät todennäköisesti johtuneet tutkittavista, vaan HMD-laitteiden asetuksista. Tutkimuksessa tutkittiin pupillien keskivälin ja forian yhteyttä. Merkitsevää yhteyttä ei havaittu pupillien keskivälin ja forian välillä. (Howarth 1999: 64–65.)

HMD-laitteiden linssien keskivälillä ja käyttäjän pupillien keskivälillä ei ole merkitsevää yhteyttä muuttuneen forian kanssa. Sen sijaan HMD-laitteen linssien keskivälillä ja HMD-laitteen ruutujen keskivälillä on. Jos HMD-laitteen linssit ja ruudut eivät ole asetettu oikein, odotettavissa on foriamuutosta HMD-laitteen ruutujen ja linssien keskipisteiden erojen suuntaan. Jos HMD-laitteen linssit ja ruudut ovat asetettu oikein, odotettavissa

voi olla esoforista muutosta laitemyopian takia. Laitemyopiolla tarkoitetaan silmän mykiön taittovoiman lisääntymistä, kun silmän läheisyydessä on laite tai esine. (Howarth 1999: 65–66.)

Vuonna 2009 tutkittiin HMD-laitteen käytön vaikutusta lasten näköjärjestelmään. Tutkimuksessa oli 60 lasta, iältään 5–16 vuotta. Keski-ikä oli 11 vuotta. Tutkittavat jaettiin kahteen ryhmään. Ensimmäisessä tutkimustilanteessa ryhmä katsoi 30 minuuttia piirrettyjä elokuvia bi-okulaarisella HMD-laitteella nimeltä ”Binocular Viewer”. Toisessa tutkimustilanteessa ryhmä katsoi 30 minuuttia piirrettyjä elokuvia piirtoheittimellä, jonka oli tarkoitus simuloida HDTV:tä. Toinen tutkimustilanne toimi kontrollina tutkimukselle. Kolmannessa tutkimustilanteessa 13–16 -vuotiaat tutkittavat katsoivat 80 minuuttia piirrettyjä elokuvia HMD-laitteella. Tutkimustilanteet järjestettiin vähintään viikon päähän toisistaan. (Ames – Kozulin – McBrien 2009: 845–847.)

HMD-laitteen näkökenttä on 12° vinosuunnassa, näytön erotustarkkuus on 320 pikseliä vaakasuunnassa ja 240 pikseliä pystysuunnassa. Näytön virkistystaajuus on 60 Hz. HMD-laitteessa on kolme asetusta linssien keskiväljen asetukseen, ja kuvataso on asetettu metriin. HMD-laitteessa ei ollut pään liikkeiden seurantajärjestelmää. HMD-laite on bi-okulaarinen ja tutkimuksen aikana käytetty kuvamateriaali ei ollut stereoskooppista. (Ames ym. 2009: 847.)

Tutkittavilta mitattiin näöntarkkuus, stereonäöntarkkuus, konvergenssin lähipiste, kaukoforia, lähiforia, akkommodaatio-konvergenssi suhde (AKA, eng. AC/A), konvergenssi-akkommodaatio suhde (eng. CA/C). He myös täyttivät oirekyselyn, VR Symptom Questionnaire (VRSQ), joka mittaa virtuaaliodellisuuden ja sen laitteiden aiheuttamia oireita. Kyselyä muokattiin nuoremmille tutkittaville sopivaksi. (Ames ym. 2009: 847–848.)

Tutkimuksessa tuli ilmi, että HMD-laitteen käytön jälkeen tutkittavat lapset kokivat tilastollisesti merkitsevää silmien arkuutta, vaikeuksia keskittyä, väsymisen tunnetta ja unettavuuden tunnetta. HDTV-tutkimustilanteen jälkeen tutkittavat kokivat tilastollisesti merkitsevää unettavuuden tunnetta. Tutkimustilanteiden välillä ei kuitenkaan ollut merkitseviä eroja oireiden määrässä tai oireiden asteissa. (Ames ym. 2009: 849–850.)

Havaittiin, että 30 minuuttia HMD-laitteella aiheutti tilastollisesti merkittäviä muutoksia kaukonäöntarkkuudessa, lähinäöntarkkuudessa, stereonäöntarkkuudessa, ja konver-

genssi-akkommodaation suhteessa heti katselun jälkeen. Kymmenen minuuttia katse-  
lusta vain lähinäöntarkkuus ja konvergenssin lähipisteissä havaittiin merkittäviä muutok-  
sia HMD-laitteella. Kolmenkymmenen minuutin HDTV-tutkimustilanne aiheutti tilastolli-  
sesti merkittäviä muutoksia lähinäöntarkkuudessa, stereonäöntarkkuudessa ja kaukokofo-  
riassa heti katselun jälkeen. Tilastollisesti merkittäviä muutoksia ei ollut enää kymmenen  
minuutin jälkeen. (Ames ym. 2009: 850–853.)

Tutkimustilanteessa, jossa tutkittavat käyttivät HMD-laitetta 80 minuuttia, tutkittavat ko-  
kivat tilastollisesti merkitsevää väsymistä, pitkästyneisyyttä, unettavuutta ja väsyneiden  
silmien tunnetta heti HMD-laitteen käytön jälkeen. Kymmenen minuutin kuluttua tutkitta-  
vat kokivat enää tilastollisesti merkitsevää väsymistä ja pitkästyneisyyttä. Ero 30 minu-  
utin ja 80 minuutin tutkimustilanteissa, joka oli merkitsevä, oli unettavuuden tunne heti  
HMD-laitteen käytön jälkeen. (Ames ym 2009: 852–853.)

80 minuutin HMD-laitteen käytön jälkeen tutkittavien näköjärjestelmissä havaittiin tilas-  
tollisesti merkitsevää muutosta esoforiaan kauas, lähinäöntarkkuuden heikentymistä ja  
heikentynyttä konvergenssin lähipistettä. Kymmenen minuutin kuluttua vain kaukoforian  
muutos esoforiseen suuntaan oli enää merkitsevä. 30 minuutin ja 80 minuutin tutkimus-  
tilanteiden välillä ei havaittu merkitseviä eroja. (Ames ym. 2009: 852–853.)

Tutkimuksessa tuli ilmi, että oireet, joita HMD-laite aiheuttaa, ovat vähäisiä ja määrältään  
samanlaisia kuin mitä HDTV-tutkimustilanteessa. Lähinäöntarkkuuden muutokset olivat  
yleisin oire tutkimuksessa. Tutkijat arvelevat lähinäöntarkkuuden muutosten johtuneen  
laitemyopiasta tai sopimattomasta akkommodatiivisesta vasteesta. Akkommodatiivisen  
vasteen sopimattomuus lienee epätodennäköisempää kolmesta syystä: koska HMD-lait-  
teen näytön erotustarkkuus oli riittävän korkea ja se oli hyvä ärsyke akkommodaatiolle;  
elokuvien kuvataso oli suunnilleen lasten toonisen akkommodaation tasolla; HMD-laite  
ei ollut interaktiivinen. Tutkimuksen johtopäätös on, että tutkimuksessa käytetty bi-oku-  
laarinen HMD-laite ei rasita näköjärjestelmää enempää kuin HD-televisio, ja siksi sopii  
myös lapsille käytettäväksi. (Ames ym. 2009: 853–855.)

#### 4.1 Akkommodaatio ja vergenssi

Konvergenssi on silmien liikettä, joka tapahtuu, kun tarkastellaan lähellä olevaa koh-  
detta. Kun silmät konvergoivat, silmien katselukulma muuttuu ja kasvattaa näköakselien

leikkauspisteen kulmaa. Tavallisesti konvergoidessa molemmat silmät ja näköakselit liikkuvat yhtä paljon. Jos katsottava kohde on hieman lähempänä yhtä näköakselia kuin se on toista, liikkuu kauemman näköakselin omaava silmä enemmän konvergoidakseen. (Campos – Von Noorden 2002: 86–87.) Konvergenssi tapahtuu yhdessä kahden muun prosessin kanssa: akkommodaation ja pupillien supistumisen (Campos – Von Noorden 2002: 85; Elliot 2014: 171). Divergenssi on konvergenssin vastaliikettä, jossa näköakselien leikkauspisteen kulma vähentyy. Konvergenssi on ainoa vergenssiliike, joka voi olla myös tahdonalaista. Silloin kun henkilö konvergoi tavallisesti, konvergenssi on refleksi, joka voidaan jakaa neljään komponenttiin: tooninen konvergenssi, eli asentomuutos silmien anatomisesta lepoasennosta silmien fysiologiseen lepoasentoon; akkommodatiivinen konvergenssi, eli akkommodaatiosta syntynyt konvergenssi jota voidaan määrittää AC/A-arvolla; fuusionaalinen konvergenssi, joka on akkommodatiivisen konvergenssin liikkeiden hienosäätäjä; ja proksimaalinen konvergenssi, joka tapahtuu lähellä olevien kohteiden tietoisuudesta. (Campos – Von Noorden 2002: 89–90, 92, 98.)

Akkommodaatio on mekanismi, jolla kuva verkkokalvolla pyritään saamaan tarkaksi muuttamalla silmän refraktiivista taittovoimaa. Akkommodaatio tapahtuu muuttamalla silmän mykiön kaarevuutta ja paksuutta. Akkommodaation laukaiseva ärsyke on epätarkka kuva verkkokalvolla. Epätarkka kuva voi johtua katsottavan kohteen etäisyydestä ja silmän refraktion yhteensopimattomuudesta. (Campos – Von Noorden 2002: 85–86.)

Vuonna 1998 järjestettiin tutkimus, jossa tutkittiin HMD-laitteen lyhyen käytön vaikutusta akkommodaatioon. Kolmetoista tutkittavaa, iältään 13–44 vuotta, katsoivat noin kaksi tuntia pitkän elokuvan HMD-laitteella. Kontrollina tutkimukselle oli tunnin tauko ja saman elokuvan katsominen tavalliselta televisiolta. Tutkittaville tehtiin tarvittavat mittaukset yhteensä neljä kertaa. HMD-laitteena oli bi-okulaarinen Sonyn valmistama prototyyppilaitte. Bi-okulaarisessa laitteessa stereoskopiaa ei saavuteta, koska silmille näytetyt kuvat ovat identtiset. HMD-laitteen näkökenttä on noin 24°. HMD-laitteessa on kaksi näyttöä, joiden erotustarkkuudet ovat 300 pikseliä vaakasuunnassa ja 340 pikseliä pystysuunnassa. Näyttöjä voitiin liikuttaa hieman mukavamman katselukokemuksen saamiseksi. (Blackmon – Neveu – Stark 1998: 278–281.)

Tutkimuksessa ei havaittu merkitsevää eroa akkommodaatiolaajuuden kohdalla. Merkitsevää muutosta akkommodaatioissa ei havaittu myöskään sumutettua kohdetta katsoessa. Akkommodaatiojoustossakaan ei havaittu merkitsevää eroa. Ainoastaan akkommodaation viiveessä havaittiin merkitsevä ero. Akkommodaatio rentoutui 0.1 sekuntia

myöhemmin HMD-laitteen käytön jälkeen kuin se rentoutui kontrollitesteissä. Tutkijat arvelevat tuloksen johtuvan presbyopiasta eikä näkörasituksesta. Akkommodaation rentoutumisen viive saattaa johtua mykiön jäykistymisestä. Tutkijat eivät löytäneet akkommodaatioon vaikuttavia tekijöitä bi-okulaarisessa HMD-laitteessa. (Blackmon ym. 1998: 282–288.)

Vuonna 1998 järjestettiin tutkimus, jossa tutkittiin akkommodaation ja vergenssin välistä yhteyttä, ja niistä johtuvia näkörasitteita binokulaarisen virtuaalitodellisuuslaitteen käytön yhteydessä. Tähän mennessä tiedettiin, että 1990-luvulla julkaistut virtuaalitodellisuuslaitteet vaativat käyttäjältään jatkuvaa akkommodatiivista työtä pitääkseen kuvan terävänä. Yhdistettynä vaihtelevaan vergenssiin, näköjärjestelmän akkommodaatio- ja vergenssijärjestelmä ei toimi normaalisti kuten luonnollisessa ympäristössä. Tutkimuksen tavoitteena oli löytää, onko ristiriitainen akkommodaatio ja vergenssi riittävä aiheuttamaan näönrasitusta, ja mitkä ovat ne olosuhteet ja kynnyksarvot jotka saattavat aiheuttaa ongelmia. (Mon-Williams – Wann 1998: 42–43.)

Tutkimuksessa käytettiin 3D-MAX vuorokuvalaseja. Vuorokuvalasit muodostavat kolmiulotteisen, mahdollisesti stereoskooppisen näkymän, näyttämällä silmille kuvia vuoron perään niin nopeasti, että ihmisen aistijärjestelmä havaitsee ne yhdeksi. Tutkimuksessa käytettiin yhtä monitoria, jonka erotustarkkuus oli 1024 pikseliä vaakasuunnassa ja 768 pikseliä pystysuunnassa. Monitorin virkistystaajuus oli 120 Hz, ja se sijaitsi 40 cm:n päässä tutkittavista, aiheuttaen 2.5 dioptrian akkommodatiivisen tarpeen. (Mon-Williams – Wann 1998: 43–44.)

Tutkimustilanteita oli neljä erilaista, joista jokainen kesti 10 minuuttia. Ensimmäisessä tutkimustilanteessa tutkittaville näytettiin bi-okulaarista kuvaa, joka ei ole stereoskooppinen. Toisessa tutkimustilanteessa tutkittaville näytettiin binokulaarista kuvaa, joka oli stereoskooppinen. Kuvissa esitettyjen kohteiden etäisyydet vaihtelivat viiden ja kymmenen senttimetrin etäisyydellä toisistaan. Kolmannessa tutkimustilanteessa tutkittavat pelasivat videopeliä. Katsottujen kohteiden etäisyydet vaihtelivat yli kuudesta metristä jopa 40 senttimetriin. Neljännessä tutkimustilanteessa tutkittavat pelasivat samaa videopeliä kuin kolmannessa tutkimustilanteessa, mutta joutuivat keskittymään monitorin keskellä olevaan virtuaaliseen ristiin, jonka etäisyys vaihteli äärettömästä 40 senttimetriin noin joka kolmas sekunti. Neljättä tutkimustilannetta kontrolloitiin kolmella tutkittavalla, jotka keskittyivät fyysiseen kohteeseen, jonka etäisyys vaihteli samalla tavalla kuin virtuaalinen risti. (Mon-Williams – Wann 1998: 44.)



Tutkittavia oli kaksikymmentäkahdeksan. Tutkittavilla oli normaali binokulaarinen näkö, hyvä stereonäkö sekä normaali akkommodaatio- ja konvergenssilaaajuus. Tutkittavilla oli vähintään 0.5 näöntarkkuus. Tutkittavat jaettiin neljään seitsemän hengen ryhmään mahdollisimman tasaisesti forioiden ja näkökyvyn mukaan. Näöntutkimukset tutkimustilanteen jälkeen suoritettiin tietämättä, mikä tutkimustilanne oli ollut kyseessä. Tutkittavilta kysyttiin heidän sairashistoriansa ja näköoireet. Oireita olivat päänsärky, kahtena näkeminen, hämärtynyt näkö, arat silmät ja näönrasitus. Oireet arvioitiin asteikolla 0–10. Tutkittavilta mitattiin näöntarkkuus, kaukoforia, lähiforia, ja fiksaatiodisparaatio kauas sekä lähelle. (Mon-Williams – Wann 1998: 44–45.)

Tutkimustilanteissa yhdestä kolmeen ei havaittu tilastollisesti merkittäviä muutoksia. Tutkijat pitivät kuitenkin tärkeämpänä sitä, oliko tutkittavien näkökyvyssä klinisiä muutoksia. Tutkimustuloksia ja niiden arvoja tarkasteltiin yksittäisten muutosten osalta, jotka olivat merkittäviä kliinisessä ympäristössä. Kliinisesti merkittäviksi tuloksiksi laskettiin näöntarkkuuden lasku 0.1 logMARia, 0.5 prismadioptrian muutos fiksaatiodisparaatiossa kauas, 1.0 prismadioptrian muutos fiksaatiodisparaatiossa lähelle sekä 4 prismadioptrian muutos foriassa. (Mon-Williams – Wann 1998: 45–46.)

Edellä mainittujen kriteereiden perusteella ensimmäisessä tutkimustilanteessa ei havaittu klinisiä muutoksia. Toisessa tutkimustilanteessa kahdella tutkittavalla oli esoforista muutosta fiksaatiodisparaatiossa kauas. Kolmannessa tutkimustilanteessa yhdellä tutkittavalla oli merkitsevä muutos exoforiassa. Näiden tutkittavien muut tulokset eivät muuttuneet merkitsevästi. (Mon-Williams – Wann 1998: 46.)

Neljännessä tutkimustilanteessa havaittiin tilastollisesti merkittäviä muutoksia. Ainoastaan lähiforiassa ei havaittu tilastollisesti merkitsevää muutosta. Tutkittavien kaukonäöntarkkuus laski keskimäärin 0.04 logMARia. Tutkittavien kaukoforia muuttui keskimäärin 3.7 prismadioptriaa exoforiseen suuntaan. Tutkittavien fiksaatiodisparaatio kauas muuttui keskimäärin 1.2 prismadioptriaa esoforiseen suuntaan. Tutkittavien fiksaatiodisparaatio lähelle muuttui keskimäärin 0.6 prismadioptriaa esoforiseen suuntaan. Foria- ja fiksaatiodisparaatiomuutokset tapahtuivat riippumatta siitä, oliko tutkittavalta mitattu aikaisemmin exoforiaa tai ei. Näiden tulosten lisäksi kahdella tutkittavalla oli ongelmia fuusioida virtuaalista ristiä, kun se liikkui 0.3 Hz taajuudella. Yksi heistä arvioi, että risti pysyi

yhtenä ainoastaan 25% tutkimuksen ajasta. Toinen tutkittavista arvioi, että risti pysyi yhtenä noin puolet tutkimuksen ajasta. Kaikki tutkittavat myös raportoivat näköoireista, joista 38.5% oli käytetyn asteikon suurimmilla arvoilla. (Mon-Williams – Wann 1998: 46)

Neljännän tutkimustilanteen arvoja tarkasteltiin myös kliinisesti merkittävien tulosten osalta. Kuusi tutkittavaa seitsemästä osoitti kliinisesti merkittäviä muutoksia. Tutkittava joka ei osoittanut muutoksia, oli sama, joka fuusioi ristiä vain 25% tutkimuksen ajasta. Kolmen tutkittavan kaukoforia muuttui kliinisesti merkitsevästi exoforiseen suuntaan. Vastaavasti, näiden kolmen tutkittavan fiksaatiodisparaatio sekä lähelle ja kauas muuttui esoforiseen suuntaan. Kahden muun tutkittavan fiksaatiodisparaatio kauas muuttui esoforiseen suuntaan, mutta heidän kaukoforioissaan ei havaittu merkittäviä muutoksia. Näistä yhden tutkittavan lähipuolen fiksaatiodisparaatio lähelle muuttui esoforiseen suuntaan. Yhdenkään tutkittavan kohdalla ei havaittu merkitsevää muutosta näöntarkkuudessa tai lähiforiassa. Kolmen tutkittavan kontrolliryhmässä ei havaittu binokulaarisen näköjärjestelmän muutoksia. (Mon-Williams – Wann 1998: 46–47.)

Virtuaalitodellisuuslaitteiden tuottama stereoskooppinen kuva ei välttämättä aiheuta ongelmia näköjärjestelmälle. Tutkijoiden mukaan normaali näköjärjestelmä on tarpeeksi vahva ollakseen aiheuttamatta ongelmia stereoskooppisia kuvia näyttävän näyttöjärjestelmän kanssa, jos niitä ei käytetä liian pitkiä aikoja. Tutkimuksessa kuitenkin todistettiin, että jatkuva muutos ja ristiriita akkommodaatiossa ja vergenssissä johtaa ongelmiin binokulaarisessa näköjärjestelmässä. Tutkijat ovat myös sitä mieltä, että fiksaatiodisparaatio on hyvä menetelmä tutkia näköjärjestelmän rasitusta ja oireita. (Mon-Williams – Wann 1998: 47–48.)

Forioiden ja silmien rasitusten oireiden tuloksista voidaan päätellä, että näköjärjestelmä on rasituksen alaisena HMD-laitteita käyttäessä. Lyhyen ajan seurauksena todennäköisemmin voidaan pitää silmä- ja päänsärkyjä, jos katsottavien kohteiden tasot vaihtelevat paljon. Pitkän ajan vakavat seuraukset vaikuttavat epätodennäköisiltä. Kuitenkin jokainen binokulaarista näköä käyttävä järjestelmä tulisi arvioida erikseen sen omien ominaisuuksien mukaan. (Mon-Williams – Wann 1998: 47–48.)

Liian voimakkaat ärsykkeet voivat aiheuttaa sen, että näköjärjestelmä ei kykene sopeutumaan tilanteeseen. Tutkimuksen pilottitesteissä neljännän tutkimustilanteen ristiä liikutettiin 1 Hz:n taajuudella. Tällöin tutkittavat eivät kyenneet fuusioimaan sitä, mutta heidän

näköjärjestelmissään ei myöskään havaittu muutoksia. Sen sijaan varsinaisessa tutkimustilanteessa 0.3Hz:n taajuudella liikkuvan ristin pystyi fuusioimaan viisi tutkittavaa, joka kertoo näköjärjestelmän kyvystä sopeutua. Tästä ei kuitenkaan vielä voi päätellä, johtuuko näköjärjestelmän rasitus sopeutumisesta vai akkommodaatio- ja vergenssijärjestelmän ristiriidasta. (Mon-Williams – Wann 1998: 47–48.)

Vuonna 2008 järjestetyssä tutkimuksessa tutkittiin akkommodaation ja vergenssin suhdetta näkösuoritukseen ja näönrasitukseen. Tutkijat rakensivat oman 3D-näytön ja järjestelmän, jolla saavutettiin binokulaarinen näkö ja stereoskopia. 3D-näytössä on kolme eri kuvatasoa, 31.1 cm, 39.4 cm ja 53.6 cm päässä linseistä. Dioptrialinen ero kuvatasojen välillä on 0.67 D seuraavaan. Näytön erotustaajuus on 1920 pikseliä vaakasuunnassa ja 1200 pikseliä pystysuunnassa. Virkistystaajuus on 41Hz. Järjestelmään asetettiin tutkittavien pupillien keskiväli ja näytöllä olevat kuvat asetettiin samanlaiseksi. (Akeley – Banks – Girshick – Hoffman 2008: 1, 5–6.)

Tutkimuksessa oli neljä tutkimustilannetta. Ensimmäisessä tutkimustilanteessa tutkittiin tutkittavien nopeutta fuusioida stereoskooppinen kuva, kun akkommodaatio ja vergenssi eivät täsmää. Akkommodaatiotarvetta ja vergenssitarvetta muutettiin tutkimuksen aikana. Havaittiin, että kuvat fuusioitiin nopeammin, kun akkommodaatio- ja vergenssitarpeissa ei ollut eroa. Kun akkommodaatio- ja vergenssitarve muuttuivat yhdessä, kuvat fuusioitiin nopeammin kuin jos akkommodaatio- ja vergenssitarve olisivat muuttuneet erikseen. (Akeley ym. 2008: 9–11.)

Toisessa tutkimustilanteessa tarkasteltiin stereonäöntarkkuutta, kun akkommodaatio ja vergenssi ovat ristiriidassa. Näytön tarkkuutta nostettiin 3840 pikseliin vaakasuunnassa ja 2400 pikseliin pystysuunnassa. Tämän seurauksena virkistystaajuus laski 12 Hz:iin. Parhaimmat stereonäöntarkkuudet saavutettiin, kun ristiriita oli pienimmillään. Huonoimmillaan stereonäöntarkkuus oli, kun vergenssitarve oli kaukana verrattuna akkommodaatiotarpeeseen. Kuten tutkijat odottivat, akkommodaatio- ja vergenssitarpeiden erojen kasvaessa stereonäöntarkkuus laski. (Akeley ym. 2008: 11–12.)

Kolmannessa tutkimustilanteessa tutkittiin kuinka akkommodaatio- ja vergenssitarve vaikuttavat syvyysnäköön. Tutkimuksessa käytettiin myös tavallista CRT-näyttöä, jota liikutettiin tarvittavan akkommodaatiiovasteen saamiseksi. Tutkittavat käyttivät suodatinlaseja, jotta saavutettiin haluttu kuva ja tilanne. Havaittiin, että akkommodaatio- ja vergenssitarpeiden ollessa samat, syvyysnäkö oli tarkka ja käyttäytyi lähes ihanteellisesti.

Tavallisella CRT-näytöllä havaittiin syvyysnäön tavanomaista akkommodatiivista vauasta. Kun akkommodaatio- ja vergenssitarteet eivät täsmänneet, syvyysnäkö ei ollut yhtä tarkka. (Akeley ym. 2008: 12–16.)

Neljännessä tutkimustilanteessa tutkittiin akkommodaatio- ja vergenssitarteiden erojen vaikutusta näönrasitukseen ja epämukavuuteen. Tutkittaville annettiin tehtäväksi kohdistaa katse esitettyihin kuviin, jotka sijaitsivat joko samalla tai eri kuvatasolla akkommodaatio- ja vergenssitarteiden kanssa. Tutkimustilanteessa oli kaksi mittaustilannetta. Ensimmäisessä mittaustilanteessa akkommodaatio- ja vergenssitarteet pysyivät samana jokaisen kuvanvaihdoksen kanssa. Toisessa mittaustilanteessa akkommodaatiotarve vaihteli satunnaisesti ja vergenssitarte pysyi samana. Mittaustilanteet kestivät 45 minuuttia, joiden aikana näytettiin 1230 kuvaa. Kun akkommodaatio- ja vergenssitarteet eivät olleet samalla tasolla, vergenssitarte oli keskitasolla, 39.4 cm, ja akkommodaatiotarve vaihteli. Ero tarpeiden välillä oli korkeintaan 0.67 D.

Tutkittavat täyttivät myös kyselyn, jossa kysyttiin silmien väsymisestä, näön tarkkuudesta, niskan ja selän arkuudesta, silmien voinnista ja pään voinnista. Tutkittavat täyttivät myös toisen kyselyn, jonka kysymykset olivat: kumpi mittaustilanteista oli väsyttävämpi, kumpi mittaustilanteista oli silmille rasittavampi, kumpi mittaustilanne aiheutti enemmän päänsärkyä ja kumpi mittaustilanteista oli miellyttävämpi. Mittaustilanteet toistettiin kaikille paitsi kahdelle tutkittavalle käänteisessä järjestyksessä seuraavina päivinä, jolloin he vastasivat kyselyihin uudestaan. (Akeley ym. 2008: 16–19.)

Havaittiin, että kummatkin mittaustilanteet aiheuttivat väsymystä ja/tai epämukavuutta. Akkommodaatio- ja vergenssitarteiden ollessa ristiriidassa tutkittavat kokivat merkittävästi enemmän silmien väsymisen, näön epätarkkuuden, silmien voinnin ja pään voinnin oireita. Niskan ja selän arkuuteen liittyvä kysymys oli kontrollikysymys, eikä sen kohdalla ollut merkittävää eroa. Mittaustilanne, jossa akkommodaatio- ja vergenssitarteet olivat ristiriidassa, koettiin epämiellyttävämmäksi kuin mittaustilanne, jossa ne eivät olleet ristiriidassa. Tämä näkyi jälkimmäisen kyselyn tuloksissa. Mittaustilanne, jossa ei ollut akkommodaatio- ja vergenssitarteiden ristiriitaa aiheutti kyselyn mukaan vähemmän silmien ärsytystä ja vähemmän päänsärkyä. Se oli myös tutkittavien mielestä mukavampi kuin toinen mittaustilanne. (Akeley ym. 2008: 19–20.)

Tutkimuksessa havaittiin yhteys akkommodaation ja vergenssin tarpeilla. Akkommodaation ja vergenssin ollessa ristiriidassa ihmisen näköjärjestelmä rasittuu nopeammin ja

suoriutuu tietyistä tehtävistä hitaammin, kuin jos akkommodaatio- ja vergenssitarpeet täsmäisivät. Ihmisen näköjärjestelmä tarkentaa stereoskooppisen kuvan hitaammin, stereonäöntarkkuus laskee, syvyysnäössä esiintyy ongelmia, silmät väsyvät nopeammin ja yleistä epämukavuutta esiintyy enemmän. (Akeley ym. 2008: 25–26.)

Akeley ym. (2008) tutkimuksessa oli kuitenkin ongelmia. Yksi ongelma oli tutkittavien henkilöiden määrä. Pääasiallisia tutkittavia oli kolme, vain kahdessa tutkimustilanteessa tutkittavia oli enemmän. Jos tutkittavia olisi ollut enemmän, tulokset olisivat luotettavimpia. Lam ym. (2011) päättivät tutkia akkommodaation ja vergenssin yhteistoimintaa Akeley ym. (2008) tavoin. Lam ym. (2011) käyttivät kuitenkin HMD-laitetta ja heillä oli enemmän tutkittavia, kymmenen henkilöä. (Akeley ym. 2008: 9–20; Lam – So – Ting – Wong – Yip 2011: 545–549.)

Tutkimuksessa oli kaksi etäisyyttä akkommodaatiolle ja vergenssille: 2.5 dioptriaa ja 0.5 dioptriaa, jotka ovat vastaavasti 40 cm ja 200 cm etäisyydellä, sekä 2.5 MA (kulmametriä) ja 0.5 MA, jotka ovat vastaavasti 40 cm ja 200 cm etäisyydellä. Näitä etäisyyksiä yhdistämällä tutkimuksessa oli neljä eri tilannetta. Kahdessa tilanteessa akkommodaatio ja vergenssi sopivat yhteen, kahdessa tilanteessa ne eivät sopineet yhteen. Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia stereoskooppisen kuvan fuusiointiaikoja eri tilanteissa. Tutkimuksessa oli tarkoituksena myös selvittää fuusionaalisten reservien ja forian määrän vaikutus fuusiointiaikaan. Viimeisenä tutkimustavoitteena oli selvittää, voiko henkilö oppia fuusioimaan stereoskooppisia kuvia nopeammin. (Lam ym. 2011: 548–549.)

HMD-laitteen erotustarkkuus on 688 pikseliä vaakasuunnassa ja 480 pikseliä pystysuunnassa. Yhden silmän näkökenttä HMD-laitteella on 30°. Tutkittavien tehtävänä oli ilmoittaa ilmoitusnappia käyttämällä, kun he näkivät esitetyn kuvan yhtenä tai kahtena. Tutkittavat suorittivat yhteensä 120 tehtävää neljässä eri tilanteessa. (Lam ym. 2011: 549–551.)

Tutkimustuloksista saatiin selville, että akkommodaatio- ja vergenssitarpeiden ollessa samat, niin stereoskooppiset kuvat fuusioitiin nopeammin tietyissä tilanteissa. Akkommodaatiotarpeen ollessa 2.5 dioptriaa, fuusiointi tapahtui merkitsevästi nopeammin 40 cm:n vergenssitarpeen etäisyydelle kuin 200 cm:n vergenssitarpeen etäisyydelle. Kun vergenssitarve oli 0.5 MA, fuusiointi tapahtui merkitsevästi nopeammin 200 cm:n akkom-

modaatiotarpeen etäisyydelle kuin 40 cm:n akkommodaatiotarpeen etäisyydelle. Jos akkommodaatiotarve oli 0.5 dioptriaa tai vergenssitarve oli 2.5 MA, merkitsevää eroa ei havaittu eri tilanteiden välillä. (Lam ym. 2011: 551–554.)

Tutkimustuloksista saatiin selville myös, että fuusionaalisilla reserveilla on merkitsevä vaikutus fuusiointikykyyn ja -nopeuteen. Tulosten mukaan henkilöt, joilla on pienempi NRK lähietäisyydelle, fuusioivat stereoskooppisen kuvan hitaammin kuin henkilöt, joilla on suurempi NRK lähietäisyydelle. Forian määrällä kauas tai lähelle ei havaittu olevan merkitystä fuusiointiajan kanssa. Havaittiin myös, että henkilöt pystyvät oppimaan fuusioimaan stereoskooppisia kuvia nopeammin. Toisen tutkimustilanteen fuusiointiajat olivat merkitsevästi nopeampia kuin ensimmäisen tutkimustilanteen. (Lam ym. 2011: 552, 554–556.)

#### 4.2 Virtuaalitodellisuuslasien näkökentän ja viiveen vaikutus aistijärjestelmään

Ihmisen yhden silmän näkökenttä on arviolta 60° ylöspäin, 60° sisäänpäin, 70° alaspäin ja noin 100° ulospäin. Monokulaarinen näkökenttä on siis vaakatasossa laajuudeltaan noin 160° ja pystysuunnassa noin 130°. Binokulaarisesti ihmisen näkökenttä on vaakatasossa laajuudeltaan noin 200° ja pystytasossa noin 130°. (Benjamin 2006: 146.)

Virtuaalitodellisuuden ollessa kyseessä, vallitseva mielipide tällä hetkellä on, että laaja näkökenttä voi maksimoida ”immersion” ja läsnäolon tunteen, jonka käyttäjä kokee. Vastaavasti pieni näkökenttä voi heikentää käyttäjän immersiota ja läsnäolon tunnetta. (Abi-Rached – Duh – Furness – Lin – Parker 2002: 1.)

Riippuen suoritettavasta tehtävästä, laaja tai kapea näkökenttä on näköjärjestelmälle sopiva. Esimerkiksi lukemisesta voidaan suoriutua hyvin pienemmällä näkökentällä ja monokulaarisesti, kun taas simulaatio voi vaatia laajempaa näkökenttää. (Cakmakci – Roland 2006: 199; Patterson – Winterbottom 2007: 562–564.)

Näkökentän laajuuden on myös havaittu vaikuttavan käyttäjien kokemaan ”simulaatiopahoinvointiin”. Abi-Rached ym. (2002) raportoivat, että laajemmalla näkökentällä oli suora yhteys käyttäjien kokemiin pahoinvointikokemuksiin. (Abi-Rached ym. 2002: 8.) Näkökentän laajuuden kasvaessa pahoinvointi lisääntyi. Kuitenkin näkökentän laajentuessa käyttäjät kokivat myös läsnäolon tunteen kasvavan virtuaalitodellisuudessa. Myös Patterson ja Winterbottom (2007) päätyivät samanlaisiin tuloksiin. He myös toteavat, että

täyden ”immersion” saa aikaan vasta yli 60° näkökentällä, jos halutaan suoriutua suunnistusta ja suuntausta vaativista tehtävistä. Sen sijaan objektien tunnistamiseen ja kohdistamiseen voi riittää 40° näkökenttä. (Abi-Rached ym. 2002: 8; Patterson – Winterbottom 2007: 564.)

Vuonna 1997 tehdyssä tutkimuksessa tutkittiin näkökentän ja HMD-laitteiden viiveen aiheuttamia vaikutuksia. Käytetyn laitteen näkökenttä on 126° vaakasuunnassa ja 74° pystysuunnassa. Noin 40° näkökentästä on binokulaarisesti päällekkäistä. Näytön erotustarkkuus on 479 pikseliä vaakasuunnassa ja 234 pikseliä pystysuunnassa. Näytön ja laitteiden kuvan virkistystaajuus oli aina yli 30 Hz. HMD-laitteessa on liikkeiden seurantajärjestelmä. Liikkeenseurantajärjestelmässä oli alkuperäinen 67ms viive kuvanpäivityksessä, eli virtuaalinen kuva reagoi käyttäjän liikkeisiin 67ms myöhemmin. Tätä viivettä muutettiin tutkimuksessa niin, että viive oli 67ms, 167ms, 267ms tai 367ms. Myös HMD-laitteen näkökenttää voitiin säätää. Yhdessä tutkimustilanteessa se puolitettiin. (DiZio P. – Lackner, J. R. 1997: 893–895.)

Tutkimuksessa havaittiin, että jo alkuperäisellä viiveellä käyttäjät kokivat merkittävästi pahoinvointia. Viiveen kasvaessa pahoinvoinnin määrä ja oireet lisääntyivät. Näkökentän puolittuessa pahoinvoinnin määräkin saatiin puolitettua. Tutkittavien pahoinvoinnin oireet vähenivät 15 minuutin kuluessa tutkimuksesta, mutta oireet palasivat täyteen tehoonsa kahdessa minuutissa, jos he menivät virtuaalitodellisuuteen uudestaan lyhyen tauon jälkeen. (DiZio P. – Lackner, J. R. 1997: 895–896.)

## 5 Virtuaalitodellisuuslasit ja pahoinvointi

### 5.1 Matkapahoinvointi

Matkapahoinvointiherkkyyttä on voitu mitata sille laaditun strukturoidun kyselyn avulla. Vuonna 1998 laadittiin uusi, helpotetumpi ja päivitetty matkapahoinvointiherkkyyks-kysely (MSSQ, Motion Sickness Susceptibility Questionnaire) vanhemman ja epäselvemmän kyselyn tilalle (ks. taulukko 2). (Golding 1998: 507.)

9. Over the last 10 years, how often have you Felt Sick or Nauseated?

	Never	Rarely	Sometimes	Frequently	Always
Cars					
Buses					
Trains					
Aircraft					
Small Boats					
Ships, e.g. Channel Ferries					
Swings					
Roundabouts: playgrounds					
Big Dippers, Funfair Rides					
	0	1	2	3	4

10. Over the last 10 years, how often have you Vomited?

	Never	Rarely	Sometimes	Frequently	Always
Cars					
Buses					
Trains					
Aircraft					
Small Boats					
Ships, e.g. Channel Ferries					
Swings					
Roundabouts: playgrounds					
Big Dippers, Funfair Rides					
	0	1	2	3	4

Taulukko 2. Osa Motion sickness susceptibility questionnaire -kyselyn kysymyksistä. (mukaillen Golding 1998: 516)



Uusi kysely todettiin useiden testien jälkeen yhtä luotettavaksi kuin vanha kysely, ja myös huomattavasti helpommaksi tulkita kuin vanha kysely. Vanhaa kyselyä varten moni kyselyn täyttäjää joutui turvautumaan ulkopuoliseen apuun tai ainakin kuluttamaan enemmän aikaa jokaisen kohdan tulkitsemiseen. Uuden kyselyn avulla voidaan myös ennustaa, kuinka herkkä käyttäjä on liikkeelle ja sen aiheuttamalle pahoinvointille. Sen sijaan kyselyllä on vaikea arvioida käyttäjiä, joilla on hyvä kyky sietää matkapahoinvoinnin tuntemuksia. (Golding 1998: 510–513.)

Vielä uudempi liikkeen aiheuttamaa pahoinvointia mittaava kysely kehitettiin vuonna 2001. MSAQ-kysely (Motion Sickness Assessment Questionnaire) (ks. taulukko 3) jakaa pahoinvoinnin kokonaispahoinvointiin ja neljään eri ”ulottuvuuteen”: gastrointestinaalinen ulottuvuus, keskeinen ulottuvuus, ääreisulottuvuus ja unettavuusulottuvuus. Kyselyä tehdessä havaittiin ja lopuksi todettiin, että matkapahoinvointi koostuu näiden eri ulottuvuuksien oireista. Kysely todettiin luotettavaksi välineeksi mitata matkapahoinvointia verrattuna sen aikaisiin kyselyihin. (Gianaros – Levine – Muth – Mordkoff 2001: 115–119.)

#### MOTION SICKNESS ASSESSMENT QUESTIONNAIRE (MSAQ).

---

**Instructions.** Using the scale below, please rate how accurately the following statements describe your experience

Not at all Severely  
 1—2—3—4—5—6—7—8—9

- |                                  |                                    |
|----------------------------------|------------------------------------|
| 1. I felt sick to my stomach (G) | 9. I felt disoriented (C)          |
| 2. I felt faint-like (C)         | 10. I felt tired/fatigued (S)      |
| 3. I felt annoyed/irritated (S)  | 11. I felt nauseated (G)           |
| 4. I felt sweaty (P)             | 12. I felt hot/warm (P)            |
| 5. I felt queasy (G)             | 13. I felt dizzy (C)               |
| 6. I felt lightheaded (C)        | 14. I felt like I was spinning (C) |
| 7. I felt drowsy (S)             | 15. I felt as if I may vomit (G)   |
| 8. I felt clammy/cold sweat (P)  | 16. I felt uneasy (S)              |
- 

Taulukko 3. Motion Sickness Assessment Questionnaire. Pahoinvoinnin aste saadaan pisteyttämällä oireet asteikon mukaan. Kokonaispahoinvointi saadaan jakamalla kokonaispisteet 144:llä ja kertomalla 100:lla. Osa-alueen pahoinvointi saadaan jakamalla osa-alueen pisteet osa-alueen maksimipistemäärällä ja kertomalla 100:lla. G: Gastrointestinal (gastrointestinaalinen); C: Central (keskeinen); P: Peripheral (ääreinen); S: Sopite-related (unettavuuteen liittyvä). (mukaillen Gianaros ym. 2001: 117)

## 5.2 Simulaatiopahoinvointi ja virtuaalitodellisuuslasit

Simulaatiopahoinvoinnilla tarkoitetaan epämukavuuden tunteita samalla kun käyttäjä on virtuaalitodellisuudessa tai epämukavuuden tunteita käytön jälkeen. Sillä on yhtäläisyyksiä matkapahoinvoinnin kanssa. On myös havaittu suora yhteys simulaatiopahoinvoinnin ja virtuaalitodellisuuden välillä. Molemmat ovat visuaalisesti aiheutettuja pahoinvoinnin lähteitä. (Kolasinski 1995: 1–2.)

Simulaatiopahoinvoinnin oireisiin kuuluu mm. yleistä epämukavuutta, apatiaa, uneliaisuutta, päänsärkyä, hämmentyneisyyttä, väsymystä, hikoilua, syljen erityksen lisääntymistä, pahoinvointia ja oksentamista. Myös asentoon liittyvää epätasapainoa, oireiden takaumia ja yökkäilyä voi esiintyä. Yksikään näistä oireista ei kuitenkaan esiinny muita yleisemmin. Myöskään yhtä ja ainoaa syytekijää simulaatiopahoinvoinnille ei ole löydetty (Berbaum – Kennedy – Lane – Lilienthal 1993: 204–205; Kolasinski 1995: 4.)

Simulaatiopahoinvointi ja matkapahoinvointi ovat luonteeltaan samankaltaisia. Molemmat aiheuttavat saman tyyppisiä oireita. Ero näiden kahden välillä on kuitenkin se, että matkapahoinvointi vaatii käyttäjältään aina liikettä tapahtuakseen. Simulaatiopahoinvointia sen sijaan voi esiintyä ilman, että käyttäjä liikkuu. Sen takia simulaatiopahoinvoinnin arvellaankin johtuvan kasautuvista liikevihjeistä ja muista visuaalista vihjeistä. (Berbaum ym. 1993: 205; Kolasinski 1995: 5.)

Kolasinski (1995) toteaa, että simulaatiopahoinvoinnin yleisesti arvellaan johtuvan havaittujen vihjeiden ristiriidasta. Vihjeiden ristiriita ilmenee, kun aistien välillä tai aistien sisällä on riittävästi eroavaisuuksia. Hän toteaaakin, että simulaatiopahoinvoinnin pohjalla nämä aistit ovat näköjärjestelmä ja tasapainojärjestelmä. Ristiriitaa ilmenee, kun simulaatio näyttää liikettä, mutta käyttäjä ei itse koe sitä. Tämä tulee esille silloin, kun simulaatio tapahtuu paikallaan pysyvässä laitteessa. (Kolasinski 1995: 7.)

Vuonna 1993 Kennedy, Lane, Berbaum ja Lilienthal kehittivät kyselyn simulaatiopahoinvoinnista (SSQ, Simulator Sickness Questionnaire). Kyselyssä on 16 oiretta, jotka kyselyn täyttävä arvostelee asteikolla 0-3, jossa 0 = ei oiretta, 1 = vähäinen oire, 2 = merkittävä oire, 3 = vakava oire (ks. taulukko 4). Näiden tulosten perusteella saadaan kolme eri alueen arvot: pahoinvointi, silmän liikkeiden epämukavuus ja hämmentyneisyys. Näiden lisäksi arvoista saadaan esille kokonaistulos, joka kuvaa käyttäjän yleistä simulaatiopa-

hoinvointia ja sen haitta-astetta. Eri pahoinvoinnin alueiden arvojen tulokset toimivat vertailukohteina toisten pahoinvoinnin alueiden arvoihin. (Berbaum ym. 1993: 203, 211–212.)

Instructions: Circle how much each symptom below is affecting you right now.

1. General discomfort	None	Slight	Moderate	Severe
2. Fatigue	None	Slight	Moderate	Severe
3. Headache	None	Slight	Moderate	Severe
4. Eye strain	None	Slight	Moderate	Severe
5. Difficulty focusing	None	Slight	Moderate	Severe
6. Salivation increasing	None	Slight	Moderate	Severe
7. Sweating	None	Slight	Moderate	Severe
8. Nausea	None	Slight	Moderate	Severe
9. Difficulty concentrating	None	Slight	Moderate	Severe
10. "Fullness of the Head"	None	Slight	Moderate	Severe
11. Blurred vision	None	Slight	Moderate	Severe
12. Dizziness with eyes open	None	Slight	Moderate	Severe
13. Dizziness with eyes closed	None	Slight	Moderate	Severe
14. Vertigo	None	Slight	Moderate	Severe
15. Stomach awareness	None	Slight	Moderate	Severe
16. Burping	None	Slight	Moderate	Severe

Taulukko 4. Simulator Sickness Questionnaire (mukaillen Berbaum ym. 1993)

On tutkittu, kuinka HMD-laitteen käyttö vaikuttaa henkilön hyvinvointiin, kun laitetta käytetään henkilökohtaisena katselujärjestelmänä. Vuonna 1997 tehdyssä tutkimuksessa verrattiin HMD:n ja näyttöpäätteen aiheuttamia pahoinvointioireita. Oireet ja niiden määrät mitattiin SSQ:lla. HMD:ssä näytetyn kuvan näkökenttä oli 30° vaakasuunnassa ja 23.6° pystysuunnassa. Näyttöpäätteen kuvan näkökenttä oli noin 17° vaaka- ja pystysuunnassa. Kuvat, joita tutkittavat katsoivat, olivat staattisia eivätkä seuranneet käyttäjän pään liikkeitä. (Costello – Howarth 1997: 107–108.)

Tutkimuksessa selvitettiin mitä tapahtuu, kun tasapainojärjestelmä havaitsee pään liikettä, mutta visuaalinen järjestelmä ei sitä havaitse. Tämä tapahtuu silloin, kun henkilö käyttää HMD-laitetta, jossa pään liikkeiden seurantaominaisuus ei ole käytössä ja katsottava kuva kääntyy samalla, kun henkilö kääntää päätään. Tutkimuksessa tuli esille, että näyttöpäätteellä tapahtuva katsominen aiheuttaa huomattavasti vähemmän pahoinvointioireita kuin HMD-laitteella katsominen. Yleinen epämukavuus, väsymys, päänsärky ja pahoinvointi nousivat esille näiden kahden katselutavan välillä. (Costello – Howarth 1997: 107, 110–111.)

Kuze ja Ukai (2008) tekivät tutkimuksen, jossa mitattiin liikkuvista kuvista aiheutuvaa näön kuormitusta. Tutkimuksessa käytettiin neljää eri tapaa katsella liikkuvaa kuvaa: (1) videopelin pelaaminen HMD:llä tai TV:llä, (2) kuvien katselua kuvanvakauksen kanssa tai ilman kuvanvakausta, (3) elokuvan katsomista värierottelulla tai ilman värierottelua, ja (4) elokuvan katsomista stereoskooppisesti vastavärimenetelmällä tai ilman stereoskopiaa. Tutkimuksessa haluttiin selvittää näön rasitusoireita ja arvioida niiden laatua subjektiivisella kyselyllä. Mitattuja oireita olivat: silmien rasitus, yleinen epämukavuus, pahoinvointi-, keskittymisen vaikeudet sekä päänsärky. (Kuze – Ukai 2008: 159–161.)

Tutkimuksessa tuli esille, että videopelin pelaaminen HMD-laitteella teki käyttäjät pahoinvoivemmiksi, aiheuttivat päänsärkyä ja aiheuttivat yleistä epämukavuutta enemmän kuin, jos videopeliä olisi pelattu TV:llä. TV aiheutti kuitenkin enemmän silmien rasitusoireita ja vaikeutti keskittymistä enemmän kuin HMD-laitte. Testissä, jossa katsottiin kuvan vakaajan kanssa ja ilman sitä otettuja kuvia, ilmeni, että heiluva kuva aiheutti pahoinvointia ja päänsärkyä vakaaseen kuvaan verrattuna. Testissä, jossa verrattiin elokuvan katsomista värierottelulla ja ilman sitä, havaittiin pieniä eroja mitatuissa oireissa. Tulokset eivät kuitenkaan olleet tilastollisesti merkittäviä. Viimeisessä testissä, jossa verrattiin elokuvan katsomista stereoskooppisesti ja ilman stereoskopiaa, havaittiin, että silmien rasitus, yleinen epämukavuus, keskittymisen vaikeudet ja päänsärky olivat merkitsevästi korkeammat, kun elokuvaa katsottiin stereoskooppisesti. (Kuze – Ukai 2008: 162–163.)

Tutkimuksen perusteella tultiin johtopäätökseen, että yleinen epämukavuus, pahoinvointi ja päänsärky tulisi ottaa huomioon, kun halutaan varmistaa käyttäjien turvallisuus ja näkömukavuus katseltaessa liikkuvia kuvia. Testissä, jossa verrattiin HMD-laitteen käyttöä ja TV:stä aiheutuvia oireita videopeliä pelatessa, vahvistettiin aikaisempien tutkimusten tuloksia, jotka osoittivat, että HMD-laitteet aiheuttavat yleistä epämukavuutta, pahoinvointia, päänsärkyä sekä kahtena näkemistä. (Kuze – Ukai 2008: 164–165.)

### 5.3 Vektio (koetun liikkeen illuusio) ja virtuaalitodellisuuslasit

Virtuaalitodellisuusympäristössä olemisen on myös huomattu aiheuttavan vektiota (eng. vection). Termi kehitettiin vuonna 1930 Fischerin ja Kornmüllerin toimesta artikkelissa ”*Optokinetisch ausgelöste Bewegungswahrnehmungen und optokinetischer Nystagmus*”, teoksessa *Journal für Psychologie und Neurologie*, 41. Vektiolla tarkoitetaan näköhavainnon kautta kuviteltua, sisäisesti havaittua liikettä, jolloin henkilö ei itse ole fyy-

sisessä liikkeessä. Esimerkiksi vektiota voi kokea paikallaan olevassa junassa, kun vie-  
reisellä raiteella oleva juna lähtee liikkeelle. Tällöin syntyy illuusio, jossa henkilö kokee  
sen junan liikkuvan, jossa hän itse istuu. (Campos – Hettinger – Keshavarz – Riecke  
2015: 1; Chung – Khoo – Kim – Nakamura – Palmisano: 2015: 1; Palmisano – Seno –  
Yamada 2012: 775)

Vuonna 1990 järjestettiin tutkimus, jossa tutkittiin vektion ja simulaatiopahoinvoinnin yh-  
teyttä toisiinsa. Tutkimukseen osallistui 18 miestä. Heille näytettiin kolme 15 minuutin  
kestoista lentosimulaatiota, joiden oli todettu aiheuttavan simulaatiopahoinvointia. Tut-  
kittavien tehtävänä oli kuvata kokemansa vektiio. Simulaatio näytettiin 10.5 jalkaa korke-  
alta, 21 jalkaa leveältä ja 15 jalan säteiseltä kaarevalta ruudulta, jonka näkökenttä oli 80°  
vaakasuunnassa ja 40° pystysuunnassa. (Berbaum – Dunlap – Hettinger – Kennedy –  
Nolan 1990: 173–175.)

Simulaatioiden sisäisiä ominaisuuksia säädettiin hieman tutkimusryhmien välillä. Tutki-  
muksessa haluttiin simuloida myös meripahoinvoinnin, myrskyisten säiden ja vertikaali-  
sia liikkeitä tuottavien generaattoreiden ominaisuuksia. Samoilla kuormitettiin myös ih-  
misen tasapainojärjestelmää. (Berbaum ym. 1990: 175–176)

Kahdeksastatoista tutkittavasta vain viidentoista tutkittavan tulokset kirjattiin ylös. Näistä  
10 tutkittavaa luokiteltiin pahoinvoiviksi matkapahoinvointikyselyn perusteella viimeisen  
simulaatiokokeen jälkeen. Havaittiin, että tutkittavat joko eivät havainneet vektiota tai ha-  
vaitsivat sitä erittäin paljon. Yhteyttä vektion ja simulaatiopahoinvoinnin välillä havaittiin  
vertaamalla pahoinvoiviksi luokiteltuja henkilöitä ja vektiota kokeneita henkilöitä. Vain  
yksi henkilö viidestä, joka ei kokenut vektiota, luokiteltiin pahoinvoivaksi. Sen sijaan kah-  
deksan henkilöä kymmenestä, jotka kokivat vektiota, luokiteltiin pahoinvoivaksi. Tämän  
tutkimuksen perusteella osoitettiin, että vektiolla ja simulaatiopahoinvoinnilla on keski-  
näinen yhteys. (Berbaum ym. 1990: 176–179.)

Vuonna 2017 järjestettiin tutkimus, jossa tutkittiin vektion ja simulaatiopahoinvoinnin yh-  
teyteen kuuluvaa ”kyberpahoinvointia” Oculus Rift -laitteella. Tutkimuksessa mitattiin  
vektiota kolmessa eri pään liikkeiden tilanteessa: ”kompensoiduissa”, ”kompensoimatto-  
missa” ja ”käänteisesti kompensoiduissa”. Tutkimuksessa käytettiin Oculus Riftin kehittä-  
jäversiota, jonka virkistystaajuus oli 60 Hz, näkökenttä binokulaarisesti noin 110° ja  
erottelutarkkuus 640 pikseliä vaakasuunnassa ja 800 pikseliä pystysuunnassa molem-  
mille silmille. Näkökenttää voitiin kaventaa noin 86°:aan simuloitujen aukkojen avulla.

Tutkimuksessa mitattiin pahoinvointioireita SSQ-kyselyllä. Tutkimukseen osallistui 13 koehenkilöä. (Kim – Mursic – Palmisano 2017: 1, 3.)

Tutkimustilanteissa käytiin läpi kolme eri tilannetta. ”Kompensoidussa” tilanteessa virtuaalitodellisuusjärjestelmässä näytettyä kuvaa käännettiin vastakkaiseen suuntaan tutkittavan pään kääntöliikkeeseen verrattuna. ”Käänteisesti kompensoidussa” tilanteessa virtuaalitodellisuusjärjestelmässä näytettyä kuvaa käännettiin samaan suuntaan kuin mihin tutkittavan pää kääntyi. ”Kompensoitamattomassa” tilanteessa virtuaalitodellisuusjärjestelmä ei muuttanut näytettyä kuvaa, vaan kuva reagoi ainoastaan käyttäjän pään liikkeisiin. (Kim ym. 2017: 3.)

Tutkimustilanteet pyrittiin pitämään 24 tuntia erillään toisistaan, jotta mahdollisella pahoinvoinnilla olisi aikaa laantua. Tutkimustilanteissa tutkittavien tehtävänä oli tehdä jatkuvia pään kääntöliikkeitä noin 0.6 Hz nopeudella ja noin  $\pm 30^\circ$  alueella. Testit tehtiin täydellä näkökentällä ja aukon rajoittamalla näkökentällä. Vektion tunnetta pyrittiin saamaan aikaan luomalla virtuaalitodellisuusjärjestelmään tilanne, jossa tutkittava koki istuvansa pyöreän pilven sisällä, jossa oli tuhansia liikkuvia rengasmaisia kohteita. Testien alussa tutkittavalle näytettiin tilanne, jonka aikana hänen kokemansa vektion määräksi ilmoitettiin luku ”50”. Tätä arvoa verrattiin myöhempiin tilanteisiin ja niistä koetun vektion määrän arvioimiseen. (Kim ym. 2017: 3–4.)

Tutkimuksessa tuli esille, että täydellä näkökentällä koettiin enemmän vektiota kuin keinotekoisien aukon rajaamalla näkökentällä. Kolmen eri tutkimustilanteen välillä havaittiin, että ”kompensoitu” tilanne aiheutti voimakkaampaa vektion tunnetta kuin ”kompensoitamaton” tilanne. ”Käänteisesti kompensoitu” tilanne ei aiheuttanut vahvempaa vektion tunnetta kuin ”kompensoitamaton” tilanne. (Kim ym. 2017: 4.)

Simulaatiopahoinvointikyselystä saatiin vastaukset kyberpahoinvoinnille. Simulaatiopahoinvointikyselyn osa-alueet olivat: kokonaismäärä, pahoinvointi, silmän liikkeiden epä-mukavuus ja hämmentyneisyys. Kolmen eri tilanteen välillä havaittiin eroja pahoinvoinnissa. ”Käänteisesti kompensoitu” tilanne aiheutti kaikissa neljässä osa-alueessa huomattavasti enemmän pahoinvointia kuin ”kompensoidussa” tilanteessa. ”Käänteisesti kompensoitu” tilanne aiheutti myös huomattavasti enemmän pahoinvointia kolmella osa-alueella ”kompensoitamattomaan” tilanteeseen nähden; ainoastaan hämmentyneisyyden kohdalla mittauksissa ei ollut merkittävää eroa. ”Kompensoidun” ja ”kompensoitamattoman” tilanteen välillä ei ollut juuri eroa. (Kim ym. 2017: 4–5.)

”Kompensiomattomassa” tilanteessa tutkittavat käänsivät päätään enemmän kuin muissa tilanteissa. ”Kompensoidun” ja ”käänteisesti kompensoidun” tilanteen välillä ei ollut eroa pään kääntämisessä. Pään kääntämisen taajuuksissa ei myöskään ollut eroja kaikkien eri mittaustilanteiden välillä. (Kim ym.: 2017: 4–5.)

Tutkimuksessaan Kim ym. löysivät korrelaation koetun vektion voimakkuuden ja näkökentän koon välillä. Tutkijat havaitsivat yhteyden myös koetun vektion voimakkuuden ja pään liikkeistä aiheutuvan kuvan havainnollistamisen välillä. Eri tavalla kompensoitujen tilanteiden perusteella Kim ym. ehdottavat, että kyberpahoivoinnista johtuvia oireita voidaan mahdollisesti helpottaa sammuttamalla virtuaalitodellisuuslaitteen pään liikkeiden seurantajärjestelmä. ”Käänteisesti kompensoidun” tilanteiden ja niistä saatujen tulosten perusteella he suosittelevat, että ohjelmistokehittäjien tulisi kiinnittää tarkkaa huomiota pään liikkeisiin ja niiden seurausten havainnollistamiseen HMD-laitteilla. ”Käänteisesti kompensoitua” tilannetta voidaan myös verrata tilanteeseen, jossa HMD-laitteen näytöllä olevan kuvan ja laitteen seurantajärjestelmien välinen viive on huomattavan pitkä. (Kim ym. 2017: 7.)

## 6 Virtuaalitodellisuuslasit ja tasapaino

### 6.1 Vestibulaarinen järjestelmä

Ihmisen sisäkorvassa on tasapainoelin, joka on vastuussa tasapainosta, liikkeestä ja suunnasta, sekä niiden aistimisesta. Tasapainoelin koostuu tunneleista, joiden sisällä ovat kuuloa ja tasapainoa aistivat sensorit. Näiden tunneleiden sisällä on nestettä, endolymfaa, jossa tasapainosensorit ovat. Perilymfa on nestettä, joka peittää tilan tunneleiden luun ja kalvon välissä. (Vilis 2015: 2.)

Tasapainojärjestelmä koostuu kahdesta osasta. Tasapainokivistä (otoliitit, eng. otolith organs), jotka aistivat suoraan kulkevaa kiihtyvyyttä ja maan painovoimaa suhteessa pään asentoon, sekä kaarikäytävästä, joka aistii pään kiertyvyyttä. Tasapainokivien sisällä on kahta erityyppistä pussia. Pussit sisältävät geeliä ja tasapainoa aistivia hiussoluja, jotka ovat yhteydessä kahdeksanteen aivohermoon. (Vilis 2015: 3.)

Silloin, kun liikettä ei tapahdu, hiussolut lähettävät tasaista sähkösignaalia kahdeksanteen aivohermon solukkoon. Mutta, kun ihmisen pää liikkuu, solujen sisällä oleva geeli liikkuu hitaasti aiheuttaen hiussolujen taipumisen vastakkaiseen suuntaan. Suunnasta riippuen hiussolujen lähettämä sähkösignaali kahdeksanteen aivohermoon joko kiihtyy tai hidastuu. Hiussolujen suuntautuminen määräytyy hiussolun korkeimman hiuksen, kinosiilin (eng. kinocilium) mukaan. Kun muut hiukset taipuvat kinosiiliä kohti, hiussolun signaalin esiintyvyys kiihtyy. Kun muut hiukset taipuvat kinosiilistä pois päin, signaalin esiintyvyys vähenee. Näitä hiussoluja esiintyy jokaiseen mahdolliseen suuntaan. Kiihtyvyyden suunta ja aistittu painovoima määräytyvät hiussoluista, jotka ovat taipuneet kinosiiliään kohti eniten. (Vilis 2015: 2–5.)

Ihmisellä on kolme kaarikäytävää molemmilla puolilla päätään. Yksi niistä on vaakataso suuntainen ja kaksi vertikaalisesti suuntautunutta. Kaarikäytävät ovat toisiinsa nähden kohtisuorissa suunnissa, ikään kuin muodostaen kuution kolme seinämää. Koska molemmilla pään puolilla on oma sarja kaarikäytäviä, vastakkaiset kaarikäytävät muodostavat parit keskenään. Kaarikäytävissä olevat hiussolut aktivoituvat tai ei-aktivoituvat liikkeen suunnasta riippuen. Eli kun yksi kaarikäytävä havaitsee liikettä ja sen hiussolut



aktivoituvat, vastakkaisen kaarikäytävän hiussolut eivät aktivoidu. Vain yhden parin hiussolut voivat vaihdella signaaliensa esiintyvyyttä kerrallaan, muissa ei tapahdu muutoksia samaan aikaan. (Vilis 2015: 6–7.)

## 6.2 Vestibulo-okulaarinen refleksi

Tasapainokivet ja korvakäytävät aktivoivat monia asentoon liittyviä refleksejä, jotka sijaitsevat jaloissa, vartalossa ja käsissä, pitäen ihmisen pystyssä. Ne ovat myös yhteydessä silmien lihaksiin. Vestibulo-okulaarinen refleksi (eng. vestibular ocular reflex, VOR) pyrkii pitämään verkkokalvolle heijastuneen kuvaan vakaana pään liikkeiden aikana. Tämä tapahtuu kääntämällä silmiä vastakkaiseen suuntaan kuin mihin pää liikkuu. Ihannetilanteessa näiden liikkeiden määrät kumoavat aina toisensa, jolloin saavutetaan vakaa verkkokalvokuva. (Vilis 2015: 7.)

Korvakäytävien kahdeksas aivohermorata on yhteydessä kuudenteen ja kolmanteen aivohermorataan, jotka ovat yhteydessä silmien liikuttajalihaksiin. Horisontaalisessa pään liikkeessä yhden puolen korvakäytävän hiussolut lähettävät enemmän sähkösignaaleja, nämä signaalit aktivoivat puoleisesti vastakkaisen puolen kuudetta ja saman puolen kolmatta aivohermorataa, jotka aktivoivat ja supistavat vastaavia silmän liikuttajalihaksia. Vastaavasti toisen puolen korvakäytävän hiussolut lähettävät vähemmän sähkösignaaleja vastaaviin kuudenteen ja kolmanteen aivohermorataan, jotka puolestaan lähettävät vähemmän signaaleja ja rentouttavat vastaavia, vastakkaisia silmän liikuttajalihaksia. Näin ollen silmä kääntyy vastakkaiseen suuntaan kuin pää ja pitää verkkokalvokuvan vakaana. (Vilis 2015: 7.)

Huimausta voi syntyä vestibulo-okulaarisen refleksin seurauksena. Kun liike on tasaista ja jatkuu pitkään, hiussolut suoristuvat ja niistä lähtevät sähkösignaalit tasoittuvat, joka sammuttaa vestibulo-okulaarisen refleksin. Tämän seurauksena kuva verkkokalvolla ei välttämättä pysy enää vakaana, josta voi seurata huimausta. Tämä tapahtuu herkemmin silloin, jos henkilön silmät ovat kiinni ennen kuin hiussolut suoristuvat ja ennen kuin henkilö avaa silmänsä. Visuaalinen palaute itsessäänkin voi pitää kuvan vakaana verkkokalvolla, mutta se käynnistyy hitaasti. Tätä kutsutaan optokineettiseksi vastineeksi (eng. optokinetic response). (Vilis 2015: 8.)

Huimausta voi välttää pitkään jatkuvan liikkeen aikana keskittymällä liikkumattomaan kohteeseen. Tällöin optokineettinen vaste kompensoi vestibulo-okulaarista refleksiä.

Mutta, jos nämä kaksi järjestelmää aiheuttavat ristiriitaisia signaaleja, seurauksena voi olla liikkeen aiheuttamaa pahoinvointia eli matkapahoinvointia. Esimerkiksi, jos henkilö on merellä olevan laivan hytissä, joka huojuu aalloilla, näköjärjestelmä kertoo hänen olevan paikallaan, mutta tasapainojärjestelmä kertoo hänen liikkuvan. Jotta pahoinvointia voisi välttää, tulisi nämä kaksi järjestelmää saada tuottamaan signaaleja samanaikaisesti. (Vilis 2015: 8–9.)

### 6.3 Optinen ”virtaus”

Optinen ”virtaus” (eng. optic flow, optical flow) on asia, jota henkilö käyttää hyödyksi päästäkseen päämääränsä. Siinä henkilö käyttää liikettä pääasiallisena tietolähteenään. Henkilön ollessa liikkeessä katse päämäärässään, hänen näkökenttäänsä muodostuu ns. optisen virtauksen kuvio, kun muut asiat hänen näkökentässään virtaavat häntä kohti ja hänen ohitseensa. (Goldstein 1999: 295.)

Optinen virtaus vähenee, mitä kauempana katsottavat kohteet ovat henkilöstä. Päämäärää tai katsottavaa kohdetta voidaan kutsua ”laajennuksen” keskipisteeksi (eng. focus of expansion). Se on kohde, jossa ei havaita liikettä, esimerkiksi suoran tien kaukaisin havaittava kohta. Laajennuksen keskipisteen sanotaan olevan aina keskittyneenä henkilön päämäärään ja näin ollen antavan muuttumatonta tietoa henkilön suunnasta. (Goldstein 1999: 295.)

Optinen virtaus on myös yhteydessä tasapainoon. Vuonna 1974 järjestettiin tutkimus, jossa hieman yli vuoden vanhoja lapsia asetettiin heiluvaan huoneeseen, jonka lattia pysyi paikallaan, mutta seinä ja katto liikkuvat eteen- tai taaksepäin. Näin saatiin simuloitua ihmisen omaa heiluntaliikettä. Heiluminen eteen- ja taaksepäin luo myös optisen virtauskuvion, kun ympärillämme olevat asiat liikkuvat meihin nähden lähemmäs tai kauemmas. (Goldstein 1999: 298.)

Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia optisen virtauksen yhteyttä tasapainoon. Havaittiin, että huoneen liikuessa eteenpäin, joka luo optisen virtauskuvion samalla tavalla kuin henkilön liikuessa eteenpäin, tutkittavat kompensoivat tätä heilumalla itse taaksepäin. Sama toteutui päinvastaisessa koeasetelmassa, kun huonetta heilutettiin taaksepäin. Tämä ilmiö ei toteudu pelkästään lapsilla, vaan myös aikuiset heiluvat optisen virtauskuvion mukaisesti sitä vastaan, pitääkseen yllä tasapainoansa. (Goldstein 1999: 298–299.)

Vuonna 1998 järjestetyssä tutkimuksessa tutkittiin, miten optisen virtauksen aiheuttamat signaalit eroavat verrattuna tasapainojärjestelmän signaaleihin. Optinen virtaus voi yksinäänkin aiheuttaa vekiota, ja tästä voi syntyä ristiriita ihmisen havaintojärjestelmässä. Tutkittavat käyttivät HMD-laitetta ja istuivat tuolissa. Tuolia liikutettiin tai ei liikutettu, jotta saatiin stimuloitua haluttuja signaaleja. HMD-laitteella näytettiin tilanne, jossa tutkittavat liikkuvat virtuaalisessa ympäristössä suoraan. HMD-laitteessa on liikkeenseurantajärjestelmä. HMD-laitteen näytön erotustarkkuus on 768 pikseliä vaakasuunnassa ja 556 pikseliä pystysuunnassa. Vaakasuunnan näkökenttä on 84° ja pystysuunnan on 65°. Videokuvan virkistystaajuus on noin 6 Hz. Tutkittavien tehtävänä oli arvioida kuljettuja etäisyyksiä virtuaaliodellisuusympäristössä, kun tuotettiin haluttuja signaaleja. (Harris – Jenkin – Zikovitz 1998: 1–3.)

Tutkimuksessa tuli esille, että tutkittavat arvioivat kuljetun etäisyyden lähes täydellisesti, kun heillä oli käytössään pelkästään näkövihjeet, eli optisen virtauksen aiheuttamat signaalit. Sen sijaan, jos tutkittavilla oli pelkästään tasapainojärjestelmän signaalit käytettävissä, he yliarvioivat kuljetun etäisyyden. Samanlaista yliarviointia kuljetussa etäisyydessä tapahtui, jos käytössä oli sekä näkövihjeet että tasapainojärjestelmän vihjeet. Tuloksista tutkijat päättelivät, että optinen virtaus yksinään ei ole dominoiva järjestelmä arvioitaessa kuljettua matkaa. Optinen virtaus on kuitenkin tarkka järjestelmä, jos sillä ei ole kilpailevia signaaleja. (Harris ym. 1998: 3–6.)

#### 6.4 Asentoon liittyvä vakaus ja virtuaaliodellisuuslasit

Vuonna 2002 tutkittiin HMD-laitteen käytön aiheuttamia vaikutuksia tasapainoon, pahoinvointien oireisiin ja niiden jälkivaikutuksiin. Tutkimukseen osallistui 60 henkilöä. Heistä muodostettiin kolme tutkimusryhmää. Ensimmäinen ryhmä katsoi elokuvan tavalliselta televisiolta 250 senttimetrin etäisyydeltä. Toinen ryhmä katsoi saman elokuvan Olympuksen EyeTrek FMD-700 HMD-laitteen kanssa. Kolmas ryhmä pelasi rallipeliä FMD-700 HMD-laitteella stereoskooppisesti. Elokuva katsovat ryhmät istuivat pää- ja käsituellisissa tuoleissa. Videopeliä pelannut ryhmä istui toimistotuoleissa ilman pää- ja käsitukea. (Häkkinen – Puhakka – Vuori 2002: 1–2.)

Olympus FMD-700 -laitteen näkökenttä vaakasuunnassa on 28.5°, pystysuunnassa 21.1° ja vinosuunnassa 35.5°. Ilmoitettu konvergenssietäisyys HMD-laitteella oli 2.6 metriä. Keskellä näkyvän kuvan virtuaalisen tason ilmoitettiin olevan yli 2.5 metrin

etäisyydellä ja reunoilla näkyvän kuvan virtuaalisen tason ilmoitettiin olevan 1.0 metrissä. Tutkimusta varten HMD-laitetta muokattiin, jotta se sallisi stereoskooppisen näkymän. (Häkkinen ym. 2002: 2.)

Tutkittavien näkö mitattiin ennen tutkimuksia. Näöntutkimuksessa määritettiin kauko-näöntarkkuus, lähinäöntarkkuus, stereonäkö, akkommodaatio, konvergenssin lähipiste, vaakatason lähiforia, AKA-arvo ja refraktio. Tutkittavat täyttivät SSQ-kyselyn ennen tutkimuksia ja tutkimusten jälkeen. Tutkittavilta mitattiin asentoon liittyvä vakaus ja huojuminen AccuSway -tasapainolaudalla ennen ja jälkeen tutkimusten. SSQ-kysely ja asennon huojuminen mitattiin tutkimustilanteen jälkeen kuusi kertaa, noin 3-4 minuutin välein. (Häkkinen ym. 2002: 2–3.)

Asennon huojuminen mitattiin sekä silmät auki että silmät kiinni. Tuloksissa huomattiin, että tutkittavat oppivat nopeasti ylläpitämään tasapainoaan kahden ensimmäisen mittauksen aikana. Videopelin pelaaminen HMD-laitteella tuotti enemmän huojumista kuin elokuvan katsominen HMD-laitteella tai televisiolla. Huojuminen tasoittui 30 minuutin kulluttua. Tutkimuksen tuloksissa tulee esille, että silmät auki mitattu huojuminen on suurempaa kuin silmät kiinni mitattu huojuminen. Tutkijat arvelevat sen johtuvan tutkimusjärjestyksestä: huojumista mitattiin aina ensin silmät auki. Aikaisemmat tutkimukset viittaavat siihen, että silmät kiinni mitatun huojumisen tulisi olla suurempaa. (Häkkinen ym. 2002: 2–3.)

Simulaatiopahoinvointikyselyissä tutkijat käyttivät sekä absoluuttisia arvoja että suhteellisia arvoja. Absoluuttiset arvot ovat SSQ-arvot heti tutkimuksen jälkeen. Suhteelliset arvot saatiin vähentämällä ennen tutkimuksia mitatut SSQ-arvot tutkimusten jälkeen mitatuista SSQ-arvoista. Videopelin pelaaminen HMD-laitteella aiheutti suurimmat pahoinvointioireet. Myös elokuvan katsominen HMD-laitteella kohotti pahoinvointiarvoja. Erot eivät kuitenkaan olleet tilastollisesti merkittäviä näiden kahden ryhmän kesken, jonka takia tutkijat käyttivät myös suhteellisia arvoja. (Häkkinen ym. 2002: 3–4.)

Yleisellä tasolla videopelin pelaaminen HMD-laitteella aiheutti tilastollisesti merkitsevästi pahempia oireita kuin elokuvien katsominen. HMD-laitteella katsotun elokuvan ja televisiosta katsotun elokuvan välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa. SSQ-kyselyn osaluilla, pahoinvointia aiheutti eniten videopelin pelaaminen HMD-laitteella. Erot tasoituivat yhden minuutin jälkeen television katseluun verrattuna, ja kahdenkymmenen minuutin jälkeen HMD-laitteella katsottuun elokuvaan verrattuna. Yllätyksenä tuli esille, että

HMD-laitteella katsottu elokuva aiheutti vähemmän oireita kuin televisiolla katsottu elokuva. (Häkkinen ym. 2002: 3–4.)

Silmien epämukavuuteen liittyvät oireet olivat merkitsevästi erilaisia HMD-laitteella katsotun elokuvan ja HMD-laitteella pelatun videopelin välillä. Oireet olivat pahimmillaan heti tutkimuksen jälkeen. Myös televisiolla katsotun elokuvan ja HMD-laitteella pelatun videopelin välillä oli merkitsevä ero heti tutkimuksen jälkeen. HMD-laitteella pelaaminen aiheutti myös enemmän hämmentyneisyyteen liittyviä oireita kuin HMD-laitteella katsottu elokuva ja televisiolla katsottu elokuva. (Häkkinen ym. 2002: 5.)

lällä ja sukupuolella raportoitiin myös olevan vaikutuksia saatuihin tuloksiin. Naispuoliset tutkittavat raportoivat hieman enemmän pahoinvointiin liittyviä oireita. Iältään vanhemmat tutkittavat raportoivat pahempia silmien epämukavuuteen liittyviä oireita kuin nuoremmat tutkittavat. Aikaisemmalla HMD-laitteiden kokemuksella ei havaittu olevan eroa tutkimustuloksia vertailtaessa. (Häkkinen ym. 2002: 4–5.)

Tutkimuksessa ei havaittu yhteyttä asennon huojumisen ja käyttäjien kokeman hämmentyneisyyden välillä, kuten aikaisemmat lentosimulaattoreihin perustuvat tutkimukset olivat osoittaneet. Tutkijat arvelivat tämän johtuvan vestibulaarisen stimulaation puutoksesta. Merkitsevä yhteys havaittiin ainoastaan HMD-laitteella katsotun elokuvan ja huojumisen välillä heti tutkimuksen jälkeen. Tulosta on kuitenkin vaikea arvioida, koska HMD-laitteella katsotun elokuvan pahoinvointiin liittyvät oireet olivat vähäiset. (Häkkinen ym. 2002: 5.)

Tutkimuksen johtopäätökset olivat, että HMD-laitteella pelatun videopelin jälkeen on havaittavissa pientä asennon huojumista. Tutkijat suosittelivatkin, että sensomotorisesti haastavia tehtäviä tulisi välttää 10–30 minuuttia HMD-laitteen käytön jälkeen. Tutkijat myös huomasivat suhteellisten SSQ-arvojen käytön hyödyn, kun halutaan saada selkeämpi kuva tehtävän ja tutkimuksen aiheuttamista seurauksista. Havaittiin myös sukupuolen vaikutus pahoinvointiin, joka saattaa johtua siitä, että naiset ovat herkempiä matkapahoinvoinnille tai siitä, että miehet vähättelevät omia oireitaan. Havaittiin myös, että ikä vaikuttaa silmien epämukavuuteen ja niiden oireisiin. Vanhemmat käyttäjät saattavat kokea suurempaa näön rasittumista. Lopuksi tutkijat toteavat, että HMD-laitteilla ja niiden käyttämisellä ei ole yhtä ainoaa oireoppia, vaan oireet riippuvat suoritettavasta tehtävästä ja käytetyistä teknologiasta. (Häkkinen ym. 2002: 5–6.)

DiZion ja Lacknerin (1997) tutkimuksessa havaittiin, että asennon huojuminen sivulle tuplaantui ja huojumisen teho viisinkertaistui verrattuna normaaliin, kun tutkittavat käyttivät HMD-laitetta (DiZio P. – Lackner, J. R. 1997: 895–896). On kuitenkin muistettava, että Häkkisen ym. (2002) ja DiZion ja Lacknerin (1997) tutkimuksissa käytettiin erilaisia laitteita. DiZion ja Lacknerin HMD-laitteessa oli monta kertaa suurempi näkökenttä kuin Häkkisen ym. tutkimuksessa, 126° ja 74° (DiZio P. – Lackner, J. R. 1997: 894) verrattuna 28.5° ja 21.1°. (Häkkinen ym. 2002: 2.) Myös tutkimustilanteissa ja virtuaalitodellisuusympäristöissä oli eroja. Tästä voidaan kuitenkin päätellä, että näkökentällä voi olla yhteys asennon vakauteen.

Näkökentän vaikutusta tasapainoon tutkittiin vuonna 2001 tehdyssä tutkimuksessa. Tutkimuksessa käytettiin projektoria, joka loi laajan näkökentän käyttäjän eteen asetettuun kupuun. Kuvun suurin näkökenttä oli 180° vaakasuunnassa ja pystysuunnassa. Esitetyn kuvan erotustarkkuus oli 640 pikseliä vaakasuunnassa ja 480 pikseliä pystysuunnassa. Tutkimuksessa mitattiin tasapainon muuttumista 30°, 60°, 90°, 120°, 150° ja 180° näkökentillä. (Duh – Furness – Kenyon – Lin – Parker 2001: 1–3.)

Tutkimuksen tuloksista saatiin selville, että näkökentän kasvaessa huojuminen ja tasapainon menetys lisääntyivät. Suurimmat tasapainon muutokset tapahtuivat 120°–150° välillä yksinkertaisen ympäristön testeissä, ja 90°–120° välillä kaupunkiympäristön testeissä. Näkökentän kasvaessa käyttäjän ääreisnäkö saa enemmän tietoa, joka voi johtaa asennon muutoksiin. Tästä voi myös päätellä, että laajempi näkökenttä aiheuttaa enemmän koettua liikettä käyttäjissä. Tutkimuksessa havaittiin myös, että monimutkaisemmat ympäristöt vaikuttavat tasapainoon. Ero yksinkertaisen ja monimutkaisen ympäristön välillä eivät kuitenkaan olleet tilastollisesti merkittäviä. Tutkimusjoukon sisältä löydettiin myös kaksi eri ryhmää, ns. ”vakaa” ryhmä ja ”epävakaa” ryhmä. Ryhmien erona oli heidän kokemansa asennon epävakauden määrä tietyillä näkökentän laajuuksilla. ”Epävakaa” ryhmä huojui enemmän kuin ”vakaa” ryhmä. (Duh ym. 2001: 3–6.)

## 7 Yhteenveto ja pohdinta

Opinnäytetyössä oli tarkoituksena löytää ja tunnistaa ne aistijärjestelmät, jotka ovat käytössä virtuaalitodellisuuslaseja käyttäessä. Tavoitteena oli myös tarkastella aistijärjestelmien toimintaa virtuaalitodellisuuslaitteiden käytön aikana ja jälkeen. Viimeisenä tavoitteena opinnäytetyössä oli löytää tapoja, joilla aistijärjestelmien toimintaa ja poikkeavuuksia voidaan mitata.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella virtuaalitodellisuuslasit ja -laitteet voivat rasittaa ihmisen eri aistijärjestelmiä. Aistijärjestelmät, jotka ovat käytössä ja mahdollisen rasituksen alaisia, ovat näköjärjestelmä ja tasapainojärjestelmä. Näköjärjestelmästä käytössä ja mahdollisen rasituksen alaisena ovat akkommodaatio ja vergenssi.

Akkommodaatio ja vergenssi toimivat normaalisti yhdessä. Virtuaalitodellisuuslaitteiden, sekä muiden 3D-tekniikkaa käyttävien ja binokulaarista näköä vaativien laitteiden käytön aikana akkommodaation ja vergenssin välinen toiminta häiriintyy. Virtuaalitodellisuuslasien käytön aikana akkommodaatio ja vergenssi joutuvat toimimaan erillään. Näköjärjestelmä kuitenkin yrittää saada akkommodaatiota ja vergenssiä toimimaan yhdessä. Tästä ristiriidasta voi seurata näön rasitusta ja pahoinvointia. Akkommodaation ja vergenssin välisen eron kasvaessa, kasvaa myös todennäköisyys näön rasitukselle ja pahoinvoinnille. Akkommodaation ja vergenssin erojen jatkuva toisto ja erojen vaihteluvälien tiheys vaikuttavat myös näön rasitukseen ja pahoinvointiin.

Virtuaalitodellisuuslaitteiden käyttö saattaa vaikuttaa käyttäjän forioihin, fiksaatiodisparaatioon ja stereonäön toimintaan. Käyttäjän foriat saattavat lisääntyä tai vähentyä riippuen virtuaalitodellisuuslaitteen linssi- ja katselujärjestelmästä, ja kuinka ne ovat aseteltu käyttäjälleen. Huonosti aseteltu linssi- ja katselujärjestelmä rasittavat käyttäjänsä näköjärjestelmää. Fiksaatiodisparaatio johtuu virtuaalitodellisuuslaitteen aiheuttamasta rasituksesta. Stereonäkö ja sen muutokset johtuvat myös rasituksesta. Akkommodaation ja vergenssin tarpeiden ollessa lähellä toisiaan stereonäöntarkkuus ja stereonäön toiminnan nopeus ovat parempia verrattuna suurempiin akkommodaation ja vergenssin tarpeiden eroihin. Riippuen käytetyistä virtuaalitodellisuuslaitteista, muutokset forioissa, fiksaatiodisparaatioissa ja stereonäössä voivat olla merkittäviä ja haitallisia. On kuitenkin epätodennäköistä, että muutokset olisivat pysyviä.

Virtuaalitodellisuuslaitteiden käyttö saattaa vaikuttaa myös akkommodaatioon. Opinnäytetyössä tarkastellussa kirjallisuudessa löytyi viitettä, että virtuaalitodellisuuslasien käyttö voi aiheuttaa akkommodaatiospasmiä. Akkommodaatiospasmi voi johtua vääränlaisesta linssi- ja katselujärjestelmästä käyttäjälle, tai jatkuvasta akkommodaatiotarpeesta. Paremmilla virtuaalitodellisuuslaitteen asetuksilla akkommodaatiospasmin esiintyvyyttä voi todennäköisesti vähentää tai poistaa kokonaan. Kirjallisuudessa löytyi myös viitettä akkommodaation rentoutumisen viiveestä. Tulokset tästä olivat kuitenkin kyseenalaisia, koska viive oli vähäistä, niukasti merkitsevää, ja sitä esiintyi pääasiassa vanhemmilla tutkittavilla. Viive saattoi johtua mykiön joustavuuden heikkenemisestä eikä virtuaalitodellisuuslaitteiden käytöstä.

Käyttäjä saattaa myös sopeutua akkommodaatio- ja vergenssitarpeiden aiheuttamiin näköjärjestelmän rasitukseen, jonka seurauksena rasituksen oireet vähenevät tai lakkaavat lisääntymästä. Jos akkommodaation ja vergenssin välinen ristiriita aiheuttavat näköjärjestelmän rasitusta, antamalla käyttäjälle aikaa sopeutua rasitus saattaa vähentyä. Tällöin käyttäjä vaatii myös pidemmän ajan sopeutua takaisin normaaliin ympäristöön, kun hän lopettaa virtuaalitodellisuuslaitteen käytön. Jos näköjärjestelmän rasitus johtuu käyttäjän suurimman sopeutumiskyvyn saavuttamisesta, ajan lisäämisellä ei pitäisi olla helppotavaa vaikutusta. Päinvastoin, rasitus ja oireet todennäköisesti lisääntyvät ajan kuluessa.

Virtuaalitodellisuuslaitteiden näyttöjen ominaisuuksilla on havaittu vaikutus näköjärjestelmään ja sen rasitukseen. Näyttöjen kuvan laatu, kontrasti, valaistus ja virkistystaajuus voivat aiheuttaa näönrasituksen oireita. Jotta oireita ei ilmaantuisi, tulisi näiden tekijöiden olla näköjärjestelmälle vähintään siedettävällä tasolla. Valaistuksen ja kontrastin ei pitäisi olla liian matala tai liian korkea, kuvan laadun tulisi olla tarpeeksi terävä, ja virkistystaajuuden tulisi olla tasolla, jolla käyttäjä ei havaitse kuvien välkehdintää.

Toinen aistijärjestelmä, joka on käytössä ja mahdollisen rasituksen alaisena virtuaalitodellisuuslaitteita käyttäessä, on tasapainojärjestelmä. Tasapainojärjestelmästä vestibulaarinen järjestelmä ja vestibulo-okulaarinen refleksi ovat kaksi suurta vaikuttajaa virtuaalitodellisuuslaitteiden käyttäjälle. Vestibulaarinen järjestelmä havaitsee liikettä ja pään asentoja. Vestibulo-okulaarinen refleksi pitää verkkokalvokuvan vakaana pään liikkeen aikana.



Opinnäytetyön kirjallisuudessa tarkastellaan tasapainojärjestelmän roolia virtuaalitodellisuuslaitteita käyttäessä. Virtuaalitodellisuuslaitteiden käytön aikana tai pian käytön jälkeen käyttäjä voi kokea enemmän huojumista kuin mitä normaalisti. Huojuminen voi olla myös vahvempaa kuin normaalisti. Huojumisen määrään vaikuttaa myös käytetty virtuaalitodellisuuslaite ja sen ominaisuudet. Laajemmat virtuaalitodellisuuslaitteiden näkökentät aiheuttavat todennäköisemmin huojumista.

Virtuaalitodellisuuslaitteiden käytöllä on havaittu selkeä suhde käyttäjien kokemaan pahoinvointiin. Pahoinvoinnin tyyppi on liikkeestä tai havaitusta liikkeestä aiheutuvaa matkapahoinvointia tai simulaatiopahoinvointia. Nämä kaksi pahoinvoinnin tyyppiä ovat melko samankaltaisia esiintymistavaltaan, oireiltaan ja oireiden voimakkuuksiltaan.

Opinnäytetyön kirjallisuudessa esiintyi monia eri virtuaalitodellisuuslaitteita, jotka aiheuttivat pahoinvointia. Yksikään virtuaalitodellisuuslaite ei ollut ominaisuuksiltaan samanlainen toisen kanssa. Pahoinvoinnin ilmaantuminen ja oireiden määrät vaihtelivat virtuaalitodellisuuslaitteiden ja tutkimustilanteiden välillä runsaasti. Tarkastellusta kirjallisuudesta voi tehdä johtopäätöksen, että käyttäjien kokema pahoinvointi ja sen määrä riippuvat käyttäjästä ja hänen sietokyvystään, virtuaalitodellisuuslaitteiden ominaisuuksista ja virtuaalitodellisuusympäristöstä.

Tekijät, jotka aiheuttavat tai vaikuttavat koettuun pahoinvointiin, ovat sidoksissa virtuaalitodellisuuslaitteiden ominaisuuksiin. Virtuaalitodellisuuslaitteiden näkökentällä on havaittu yhteys pahoinvoinnin kanssa. Pienemmillä virtuaalitodellisuuslaitteiden näkökentillä on raportoitu vähemmän ja heikompia pahoinvointien oireita kuin suuremmilla virtuaalitodellisuuslaitteiden näkökentillä. Näkökentän pienentämisen on havaittu helpottavan koettua pahoinvointia.

Virtuaalitodellisuuslaitteiden kuvan päivityksen viiveillä on yhteys pahoinvointiin. Jos virtuaalitodellisuuslaitteen liikkeenseurantajärjestelmässä esiintyy viivettä, viive voi johtaa pahoinvointiin. Mitä suurempi viive on, sitä suurempi todennäköisyys käyttäjällä on kokea pahoinvointia.

Tasapainojärjestelmän ja näköjärjestelmän yhteisinä tekijöinä ovat optinen ”virtaus” ja vektio, joka on koetun liikkeen illuusio. Molemmat tekijät liittyvät kumpaankin aistijärjestelmään. Optinen virtaus antaa ihmiselle tietoa hänen päämäärästään ja liikkeestä. Sillä

on yhteys tasapainoon ja arvioituu liikkeeseen. Vektiolla on yhteys tasapainoon ja pahoinvointiin. On havaittu, että henkilöt, jotka kokevat herkemmin vektiota, ovat myös herempiä kokemaan simulaatiopahoinvointia.

Opinnäytetyön kirjallisuudessa tuli esille useita eri tapoja mitata aistijärjestelmien muutoksia. Optisen alan ammattilaisille tuttuja mittaustapoja ovat näöntarkkuuden mittaaminen, forioiden mittaaminen lähelle ja kauas, akkommodaatiolaajuuden mittaaminen, stereonäöntarkkuuden mittaaminen, fiksaatiodisparaation mittaaminen, konvergenssin lähipisteen mittaaminen, sekä silmäsärystä ja näköoireista kysyminen. Kirjallisuudesta tuli kuitenkin esille uusia tapoja mitata aistijärjestelmien muutoksia. Näitä ovat MSSQ-kysely, MSAQ-kysely ja SSQ-kysely.

MSSQ-kyselyllä voidaan selvittää henkilön todennäköisyys kokea matkapahoinvointia ennen suoritettavia toimenpiteitä. MSAQ-kyselyllä voidaan selvittää koetun matkapahoinvoinnin ja oireiden asteet, sekä matkapahoinvoinnin luonne. SSQ-kyselyllä voidaan selvittää koetun simulaatiopahoinvoinnin ja oireiden asteet, sekä simulaatiopahoinvoinnin luonne. SSQ-kysely ottaa huomioon myös näköjärjestelmän ja sen oireet, toisin kuin MSAQ-kysely. Nämä kolme työkalua ovat hyviä välineitä pahoinvoinnin mittaamiseen ja luokitteluun.

Virtuaalitodellisuuslasit ja niissä käytetyt tekniikat ovat kehittyneet muutaman viime vuoden aikana suurin harppauksin. Sen myötä myös virtuaalitodellisuuslasien ominaisuudet ovat kehittyneet. Jos nykypäivän virtuaalitodellisuuslaseja verrataan vanhempiin virtuaalitodellisuuslaseihin, voidaan puhua moninkertaisista eroista näyttöjen erotustarkkuuksissa, näkökenttien ko'oissa ja virkistystaajuuksissa.

Nykyaikaisista virtuaalitodellisuuslaseista ja niissä käytetyistä tekniikoista tiedetään jonkin verran. Osa nykyaikaisten virtuaalitodellisuuslasien linssityypeistä ovat tiedossa. Osa virtuaalitodellisuuslaseista käyttää fresnel-linssejä, osa käyttää tavanomaisempia, kaarevia, linssejä, ja osa käyttää hybridifresnel-linssejä. Virtuaalitodellisuuslaseissa käytettyjen linssien materiaalit ja taittovoimat eivät kuitenkaan ole tiedossa. Joidenkin nykyaikaisten virtuaalitodellisuuslasien valmistajat kertovat, mille tasolle virtuaalitodellisuuslasien optiikka asettaa kuvatason. Esimerkiksi Oculus Riftin optiikka asettaa kuvatason suunnilleen 1.3 metrin päähän (Developer Center – Documentation and SDKs | Oculus: n.d.).

Opinnäytetyössä olevan kirjallisuuden virtuaaliodellisuuslaitteiden ominaisuudet vaihtelivat erittäin paljon. Tämä johtuu osittain siitä, että kirjallisuutta oli usealta eri vuodelta. Joidenkin kirjallisuuskatsauksessa käytettyjen tutkimusten välillä eroa oli kymmeniä vuosia. Siinä ajassa tekniikka on ehtinyt muuttua. Tekniikassa ja virtuaaliodellisuuslaitteissa ei ollut mitään normia tai mittapuuta. Nykyajan virtuaaliodellisuuslasit ovat ominaisuuksiltaan ja tekniikaltaan lähempänä toisiaan. Opinnäytetyössä ei kuitenkaan verrattu uudempien virtuaaliodellisuuslasien ominaisuuksien vaikutusta opinnäytetyön aiheeseen liittyen. Olisi mielenkiintoista nähdä tutkimuksia, joissa verrataan uusien virtuaaliodellisuuslasien käyttöä toisiinsa.

Opinnäytetyön toteutuksessa pyrittiin noudattamaan hyviä tieteellisiä käytäntöjä. Opinnäytetyössä on pyritty rehellisyyteen, tarkkuuteen sekä yleiseen huolellisuuteen esitellessä tuloksia, arvioidessa tuloksia ja tallentaessa tuloksia. Lähdeviitteet on pyritty merkitsemään asiaankuuluvan tavan mukaisesti. (Tutkimuseettinen neuvottelukunta 2012: 6.)

Opinnäytetyössä pyrittiin kiinnittämään huomiota sen luotettavuuteen ja eettisyyteen. Luotettavuuteen on saattanut vaikuttaa valitun kirjallisuuden vieras kieli ja uudet termit. Suurin osa kirjallisuudesta oli englanninkielistä. Luotettavuuteen saattaa vaikuttaa myös portaaleiden, arkistojen ja käyttäjätunnusten takana olevien lähteiden saatavuus. Kaikki materiaali ei ole vapaasti saatavilla, vaan osa materiaalista vaatii käyttäjätunnusten käytön. Opinnäytetyön yhteistyökumppani toimitti käyttäjätunnukset, joilla opinnäytetyössä käytettyä kirjallisuutta saatiin käyttöön. Tästä huolimatta kaikkea toivottua materiaalia ei voitu arvioida. Osa mahdollisista lähteistä ja kirjallisuudesta jäivät tarkastelematta, koska käyttäjätunnuksilla ei ollut riittävää oikeutta kirjallisuuteen, käyttäjätunnuksia ei hyväksytty tai kirjallisuutta ei ollut. Tällaisissa tapauksissa opinnäytetyössä pyrittiin etsimään korvaavia lähteitä, tai turvautumaan jo tehtyihin katsauksiin aiheesta. Toissijaisen tiedon käyttämistä pyrittiin pitämään mahdollisimman vähäisenä.

Jatkotutkimusaiheena haluaisin ehdottaa tutkimusta nykyaikaisten virtuaaliodellisuuslasien käytön vaikutuksista näköjärjestelmään. Olisi mielenkiintoista tarkastella nykyaikaisten virtuaaliodellisuuslasien ominaisuuksien ja tekniikan muutosten vaikutuksia näköjärjestelmässä. Tämän voisi toteuttaa kvantitatiivisella tutkimuksella tarkastelemalla vaikutuksia lyhyen käytön ajan.

Opinnäytetyössä tarkastellut tutkimukset käsittelivät vain virtuaaliodellisuuslasien lyhytaikaista käyttöä, joten olisi myös mielenkiintoista nähdä pidemmän ajan käytön vaikutuksia aistijärjestelmään. Tämä tutkimus vaatisi vähemmän tutkittavia, mutta se tulisi toteuttaa pidemmällä aikavälillä. Luonteeltaan tutkimus olisi todennäköisesti kvalitatiivinen.

## Lähteet

Abi-Rached, Habib – Duh, Henry B.L. – Furness, Thomas A. – Lin, James Jeng-Weei – Parker, Donald E. 2002. Effects of Field of View on Presence, Enjoyment, Memory, and Simulator Sickness in a Virtual Environment. *Virtual Reality*, 2002. Proceedings. IEEE. Myös verkkodokumentti. <<http://ieeexplore.ieee.org/document/996519/>>. Luettu 22.2.2017. (Koko artikkeli vaatii käyttöoikeuden)

Akeley, Kurt – Banks, Martin S. – Girshick, Ahna R. – Hoffman, David M. 2008. Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *Journal of Vision* 2008, Vol. 8, Issue 3, 33. Pages 1–30. Myös verkkodokumentti. <<http://jov.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2122611>>. Luettu 15.3.2017.

Ames, Shelly L. – Kozulin, Peter – McBrien, Neville A. 2009. Effects of a Head-Mounted-Display on the Oculomotor System of Children. *Optometry and Vision Science*. Volume 86, No 7, pp. 845–856. Myös verkkodokumentti. <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19543140>>. Luettu 19.3.2017. (Koko artikkeli vaatii käyttöoikeuden)

AMOLED (Active Matrix OLED): introduction and basics | OLED-Info n.d. OLED-Info. Verkkodokumentti. <<http://www.oled-info.com/amoled>>. Luettu 5.2.2017.

Bains, Chris – Colditz, Graham – Glasziou, Paul – Irwing, Les 2001. Systematic reviews in health care: A practical guide. New York: Cambridge University Press. Verkkodokumentti. <<http://catdir.loc.gov/catdir/samples/cam031/00065170.pdf>>. Luettu 2.2.2017.

Benjamin, William J. 2006. *Borish's Clinical Refraction*. Toinen painos. Butterworth Heinemann Elsevier Inc.

Berbaum, Kevin S. – Dunlap, William P. – Hettinger, Lawrence J. – Kennedy, Robert S. – Nolan, Margaret D. 1990. Vection and Simulator Sickness. *Military Psychology*, vol 2, issue 3, p. 171–181. Taylor & Francis Ltd. Lawrence Erlbaum Associates. Myös verkkodokumentti. <[http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/s15327876mp0203\\_4?journalCode=hmlp20](http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/s15327876mp0203_4?journalCode=hmlp20)>. Luettu 27.2.2017. (Koko artikkeli vaatii käyttöoikeuden)

Berbaum, Kevin S. – Kennedy, Robert S. – Lane, Norman E. – Lilienthal, Michael G. 1993. Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, vol 3, issue 3, p. 203–220. Lawrence Erlbaum Associates. Myös verkkodokumentti. <[http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/s15327108ijap0303\\_3](http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/s15327108ijap0303_3)>. Luettu 27.2.2017. (Koko artikkeli vaatii käyttöoikeuden)

Blackmon, Ted – Neveu, Charles – Stark, Lawrence 1998. Evaluation of the effects of a head-mounted display on ocular accommodation. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*. January 1998, Vol. 7 Issue 3, p278. Myös verkkodokumentti. <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6788128/>>. Luettu 15.3.2017. (Koko artikkeli vaatii käyttöoikeuden)

Buckley, Sean 2015. This Is How Valve's Amazing Lighthouse Tracking Technology Works. Gizmodo. Verkkodokumentti. <<http://gizmodo.com/this-is-how-valve-s-amazing-lighthouse-tracking-technol-1705356768>>. Luettu 20.2.2017.

Cakmakci, Ozan – Rolland, Jannick 2006. Head-Worn Displays: A Review. *Journal of Display Technology*, Vol. 2, No 3. Myös verkkodokumentti. <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1677544/>>. Luettu 22.2.2017. (Koko artikkeli vaatii käyttöoikeuden)

Campos, Jennifer L. – Hettlinger, Lawrence J. – Keshavarz, Behrang – Riecke, Bernhard E. 2015. Vection and visually induced motion sickness: how are they related? *Frontiers in Psychology*. Volume 6. Article 472. PubMed. PMC. Myös verkkodokumentti. <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4403286/>>. Luettu 27.2.2017.

Campos, Emilio C.; Von Noorden, Gunter K. 2002. *Binocular Vision and Ocular Motility Theory and Management of Strabismus*. Kuudes painos. Mosby Elsevier.

Chung, Charles Y.L. – Khoo, Sieu K. – Kim, Juno – Nakamura, Shinji – Palmisano, Stephen 2015. The: Oculus Rift: a cost-effective tool for studying visual-vestibular interactions in self-motion perception. *Frontiers in Psychology*. Volume 6. Article 248. PubMed. PMC. Myös verkkodokumentti. <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4358060/>>. Luettu 27.2.2017.

Cardboard – Android-sovellus 2016. Google Play. Verkkodokumentti. <<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.samples.apps.cardboarddemo&hl=fi>>. Luettu 5.2.2017.

Costello, P.J. – Howarth, P.A. 1997. The occurrence of virtual simulation sickness symptoms when an HMD was used as a personal viewing system. *Displays*. Volume 18, Issue 2, p. 107–116. ScienceDirect. Elsevier. Myös verkkodokumentti. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141938297000115>>. Luettu 26.2.2017.

Davies, Alex 2016. Oculus Rift Vs. HTC Vive Vs. PlayStation VR. Tom's Hardware. Verkkodokumentti. <<http://www.tomshardware.com/reviews/vive-rift-playstation-vr-comparison,4513.html>>. Luettu 4.2.2017.

Davis, Arthur – Kühnlenz, Frank 2007. *Optical Design using Fresnel Lenses. Basic Principles and some Practical Examples*. *Optik & Photonik*, Volume 2, Issue 4. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. Wiley Online Library. Myös verkkodokumentti. <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/opph.201190287/pdf>>. Luettu 21.2.2017.

Developer Center – Documentation and SDKs | Oculus n.d. Binocular Vision, Stereoscopic Imaging and Depth cues. Verkkodokumentti. <[https://developer3.oculus.com/documentation/intro-vr/latest/concepts/bp\\_app\\_imaging/](https://developer3.oculus.com/documentation/intro-vr/latest/concepts/bp_app_imaging/)>. Luettu 20.3.2017.

DiZio, P. – Lackner, J. R. 1997. Circumventing side effects of immersive virtual environments. *HCI International*, 1997, vol. 2, p. 893–896. Myös verkkodokumentti. <[http://www.brandeis.edu/graybiel/publications/docs/158\\_circumventing\\_side\\_eff.pdf](http://www.brandeis.edu/graybiel/publications/docs/158_circumventing_side_eff.pdf)>. Luettu 14.3.2017.

D’Orazio, Dante – Savov, Vlad 2015. Valve’s VR headset is called the Vive and it’s made by HTC. *The Verge*. Verkkodokumentti. <<http://www.theverge.com/2015/3/1/8127445/htc-vive-valve-vr-headset>>. Luettu 4.2.2017

Duh, Henry Been-Lirn – Furness, Thomas A. – Kenyon, Robert V. – Lin, James J.W. – Parker, Donald E. 2001. Effects of Field of View on Balance in an Immersive Environ-

ment. Virtual Reality, 2001. Proceedings, IEEE. Myös verkkodokumentti. <<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/913791/>>. Luettu 14.3.2017. (Koko artikkeli vaatii käyttöoikeuden)

Elliot, David B. 2014. Clinical Procedures In Primary Eye Care. Neljäs painos. Elsevier Saunders Ltd.

Gear VR | Samsung n.d. Verkkodokumentti. <<http://www.samsung.com/fi/wearables/gear-vr-r323/>>. Luettu 5.2.2017.

Gervautz, Michael – Mazuryk, Tomasz 1996. Virtual Reality – History, Applications, Technology and Future. Institute of Computer Graphics. Vienna University of Technology, Austria. Myös verkkodokumentti. <<https://www.cg.tuwien.ac.at/research/publications/1996/mazuryk-1996-VRH/TR-186-2-96-06Paper.pdf>>. Luettu 2.2.2017.

Gianaros, Peter J. – Levine, Max E. – Mordkoff, J. Toby – Muth, Eric R. 2001. A Questionnaire for the Assessment of the Multiple Dimensions of Motion Sickness. Aviat Space Environ Med. 2001 Feb; 72(2): 115–119. PMC. Author manuscript in PMC 2010. Myös verkkodokumentti. <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2910410/>>. Luettu 26.2.2017.

Golding, John F. 1998. Motion sickness susceptibility questionnaire revised and its relationship to other forms of sickness. Brain Research Bulletin. Volume 47, Issue 5, 15 Noember 1998, Pages 507–516. Elsevier Science Inc. Myös verkkodokumentti. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0361923098000914>>. Luettu 26.2.2017.

GSMarena team 2014. IFA 2014: Samsung Galaxy Note 4, Note Edge, Gear VR and Gear S hands-on. GSMarena. Verkkodokumentti. <[http://www.gsmarena.com/samsung\\_ifa\\_2014-review-1126.php](http://www.gsmarena.com/samsung_ifa_2014-review-1126.php)>. Luettu 4.2.2017.

Harris, Laurence – Jenkin, Michael – Zikovitz, Daniel C. 1998. Vestibular cues and virtual environments. Virtual Reality Annual International Symposium, 1998. Proceedings, IEEE 1998. Myös verkkodokumentti. <<http://ieeexplore.ieee.org/document/658469/>>. Luettu 14.3.2017. (Koko artikkeli vaatii käyttöoikeuden)

History of Virtual Reality n.d. Virtual Reality Society. Verkkodokumentti. <<http://www.vrs.org.uk/virtual-reality/history.html>>. Luettu 3.2.2017.

HTC Vive | OLED-Info n.d. OLED-Info. Verkkodokumentti. <<http://www.oled-info.com/htc-vive>>. Luettu 5.2.2017.

HTC Vive Teardown 2016. iFixit. Verkkodokumentti. <<https://www.ifixit.com/Teardown/HTC+Vive+Teardown/62213>>. Luettu 21.2.2017.

Howarth, Peter Alan 1999. Oculomotor changes within virtual environments. Applied Ergonomics. Volume 30, Issue 1, February 1999. Elsevier Science. Myös verkkodokumentti. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000368709800043X>>. Luettu 18.3.2017. (Koko artikkeli vaatii käyttöoikeuden)

Häkkinen, Jukka – Puhakka, Monika – Vuori, Tero 2002. Postural Stability and Sickness Symptoms after HMD Use. Systems, Man and Cybernetics, 2002 IEEE International Conference. IEEE. Myös verkkodokumentti. <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1167964/>>. Luettu 10.3.2017. (Koko artikkeli vaatii käyttöoikeuden)

Ibrahim, Dogan 2012. Using LEDs, LCDs and GLCDs in Microcontroller Projects. United Kingdom: Wiley.

James, Paul 2016. HTC Vive Review: A Mesmerising VR Experience, if You Have the Space. Road to VR. Verkkodokumentti. <<http://www.roadtovr.com/htc-vive-review-room-scale-vr-mesmerising-vr-especially-if-you-have-the-space-steamvr/>>. Luettu 4.2.2017.

Kim, Juno – Mursic, Rebecca – Palmisano, Stephen 2017. Vection and cybersickness generated by head-and-display motion in the Oculus Rift. Displays 46 (2017), 1–8. ScienceDirect. Elsevier. Myös verkkodokumentti. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141938216300713>>. Luettu 8.3.2017.

Kolasinski, Eugenia M. 1995. Simulator Sickness in Virtual Environments. U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences 5001 Eisenhower Avenue, Alexandria, Virginia. Myös verkkodokumentti. <<http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA295861>>. Luettu 26.2.2017.

Kreylos, Oliver 2016. Optical Properties of Current VR HMDs. Verkkodokumentti. <<http://doc-ok.org/?p=1414>>. Luettu 21.2.2017.

Kumparak, Greg 2014. A Brief History Of Oculus. TechCrunch Verkkodokumentti. <<https://techcrunch.com/2014/03/26/a-brief-history-of-oculus/>>. Luettu 4.2.2017.

Kuze, J. – Ukai, K. 2008. Displays. Volume 29, Issue 2, March 2008. Health and Safety Aspects of Visual Displays. ScienceDirect. Elsevier. Myös verkkodokumentti. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141938207000984>>. Luettu 26.2.2017.

Lam, Andrew K. C. – So, Richard H. Y. – Ting, Patrick – Wong, W. S. – Yip, Romeo 2011. Benefits of Matching Accommodative Demands to Vergence Demands in a Binocular Head-Mounted Display: A Study on Stereo Fusion Times. Presence: Teleoperators & Virtual Environments. December 2011, Vol. 20, Issue 6, p. 545–558. Myös verkkodokumentti. <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6797589/>>. Luettu 16.3.2017. (Koko artikkeli vaatii käyttöoikeuden)

Lang, Ben 2016a. Oculus Rift Review: Prologue to a New Reality. Road to VR. Verkkodokumentti. <<http://www.roadtovr.com/oculus-rift-review-prologue-to-a-new-reality/>>. Luettu 4.2.2017.

Lang, Ben 2016b. PlayStation VR Review: Console VR Has Arrived. Road to VR. Verkkodokumentti. <<http://www.roadtovr.com/playstation-vr-review-psvr-console-vr-has-arrived/>>. Luettu 4.2.2017.

McWerthor, Michael 2014. Sony announces Project Morpheus, a virtual reality headset coming to Playstation 4. Polygon. Verkkodokumentti. <<http://www.polygon.com/2014/3/18/5524058/playstation-vr-ps4-virtual-reality>>. Luettu 4.2.2017.

Mon-Williams, Mark – Rushton, Simon – Wann, John P. 1993. Binocular vision in a virtual world: visual deficits following the wearing of a head-mounted display. Ophthalmic & Physiological Optics. The Journal of the College of Optometrists. Volume 13, Issue 4. Pages 387–391. Myös verkkodokumentti. <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-1313.1993.tb00496.x/epdf>>. Luettu 10.3.2017.



Mon-Williams, Mark – Rushton, Simon – Wann, John P. 1994. Binocular vision in a binocular world: a new generation head-mounted displays avoid causing visual deficit. *Displays*. Volume 15, Issue 4, pages 255-260. Myös verkkodokumentti. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0141938294900736>>. Luettu 10.3.2017. (Koko artikkeli vaatii käyttöoikeuden)

Mon-Williams, Mark – Wann, John P. 1998. Binocular Virtual Reality Displays: When Problems Do and Don't Occur. *Human Factors*, vol. 40, No 1., pp. 42–49. Myös verkkodokumentti. <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.850.1184&rep=rep1&type=pdf>>. Luettu 11.3.2017.

Oculus n.d. Verkkodokumentti. <<https://www.oculus.com/rift/>>. Luettu 20.2.2017.

Oculus VR Tracking n.d. Developer Center – Documentation and SDKs. Verkkodokumentti. <[https://developer3.oculus.com/documentation/intro-vr/latest/concepts/bp\\_app\\_tracking/](https://developer3.oculus.com/documentation/intro-vr/latest/concepts/bp_app_tracking/)>. Luettu 20.2.2017.

Oculus Rift | OLED-Info n.d. OLED-Info. Verkkodokumentti. <<http://www.oled-info.com/oculus-rift>>. Luettu 5.2.2017.

Oculus Rift: Step Into the Game 2012. Kickstarter. Verkkodokumentti. <<https://www.kickstarter.com/projects/1523379957/oculus-rift-step-into-the-game>>. Luettu 4.2.2017.

Oculus Rift CV1 Teardown 2016. iFixit. Verkkodokumentti. <<https://www.ifixit.com/Teardown/Oculus+Rift+CV1+Teardown/60612>>. Luettu 21.2.2017.

Oculus VR 2014. Oculus Joins Facebook. Oculus Blog. Verkkodokumentti. <<https://www3.oculus.com/en-us/blog/oculus-joins-facebook/>>. Luettu 4.2.2017.

Oculus VR 2016. Oculus Rift is Shipping. Oculus Blog. Verkkodokumentti. <<https://www3.oculus.com/en-us/blog/oculus-rift-is-shipping/>>. Luettu 4.2.2017.

Palmisano, Stephen – Seno, Takeharu – Yamada, Yuki 2012. Directionlessvection: A new illusory self-motion perception. *i-Perception* (2012) volume 3, p. 775–777. PubMed. PMC. Myös verkkodokumentti. <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3589905/>>. Luettu 27.2.2017.

Patterson, Robert – Winterbottom, Marc D. 2007. Perceptual Issues in the Use of Head-Mounted Visual Displays. Air Force Research Laboratory. Human Effectiveness Directorate. Warfighter Readiness Research Division. PubMed. Myös verkkodokumentti. Google Scholar. <<http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA464094>>. Luettu 22.2.2017.

PlayStation n.d. Verkkodokumentti. <<https://www.playstation.com/fi-fi/explore/playstation-vr/>>. Luettu 4.2.2017.

PlayStation VR Teardown 2016. iFixit. Verkkodokumentti. <<https://www.ifixit.com/Teardown/PlayStation+VR+Teardown/69341>>. Luettu 21.2.2017.

PlayStation VR | Tekniset tiedot n.d. Verkkodokumentti. <<https://www.playstation.com/fi-fi/explore/playstation-vr/tech-specs/>>. Luettu 5.2.2017.

Ralph, Nate 2015. These headsets promise a taste of VR without breaking the bank. Verkkodokumentti. <<https://www.cnet.com/news/these-headsets-promise-a-taste-of-vr-without-breaking-the-bank/>>. Luettu 31.3.2017.

Roine, Risto 1999. Systemaattiset kirjallisuuskatsaukset terveydenhuollon menetelmien arvioinnissa. Tieteestä käytäntöön. Systemaattiset kirjallisuuskatsaukset terveydenhuollossa. FinOHTAn raportti 11. Semberg, Virpi – Teikari, Martti – Varonen, Helena (toim.) Helsinki: Stakesin monistamo.

Salminen, Ari 2011. Mikä kirjallisuuskatsaus? Johdatus kirjallisuuskatsauksen tyyppeihin ja hallintotieteellisiin sovelluksiin. Vaasan yliopiston julkaisuja. Opetusjulkaisuja 62. Julkisohtaminen 4. Verkkodokumentti. <[http://www.uva.fi/materiaali/pdf/isbn\\_978-952-476-349-3.pdf](http://www.uva.fi/materiaali/pdf/isbn_978-952-476-349-3.pdf)>. Luettu 1.2.2017.

Samsung Galaxy S7 | OLED-Info n.d. OLED-Info. Verkkodokumentti. <<http://www.oled-info.com/samsung-galaxy-s7>>. Luettu 5.2.2017.

Smith, Jake 2016. 2016's five best virtual reality headsets. ZDNet. Verkkodokumentti. <<http://www.zdnet.com/article/2016s-five-best-virtual-reality-headsets/>>. Luettu 4.2.2017.

Sony Playstation VR | OLED-Info n.d. OLED-Info. Verkkodokumentti. <<http://www.oled-info.com/sony-playstation-vr>>. Luettu 5.2.2017.

Statt, Nick 2014. Facebook has Oculus, Google has Cardboard. cnet. Verkkodokumentti. <<https://www.cnet.com/news/facebook-has-oculus-google-has-cardboard/>>. Luettu 4.2.2017.

Templier, Francois 2014. OLED Microdisplays. Wiley.

Tutkimuseettinen neuvottelukunta 2012. Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkausepäilyjen käsitteleminen Suomessa. Myös verkkodokumentti. <[http://www.tenk.fi/sites/tenk.fi/files/HTK\\_ohje\\_2012.pdf](http://www.tenk.fi/sites/tenk.fi/files/HTK_ohje_2012.pdf)>. Luettu 21.3.2017.

Vilis, Tutis 2015. The Physiology of the Senses, Lecture 10 – Balance. Verkkodokumentti. <<http://www.tutis.ca/Senses/L10Balance/L10Balance.pdf>>. Luettu 2.3.2017.

Vive n.d. Verkkodokumentti. <<https://www.vive.com/eu/product/>>. Luettu 5.2.2017.

Vive Ready Computers n.d. Verkkodokumentti. <<https://www.vive.com/us/ready/>>. Luettu 20.2.2017