

Kuura Ahola

VÄRISOKEUS JA AVUSTAVAT TEKNOLOGIAT

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaattitutkielma
Marraskuu 2023

TIIVISTELMÄ

Kuura Ahola: Värisokeus ja avustavat teknologiat
Kandidaattitutkielma
Tampereen yliopisto
Tietojenkäsittelytieteiden tutkinto-ohjelma
Marraskuu 2023

Värisokeuden eri tyypit vaikuttavat noin 4,5 prosenttiin populaatiosta. Värisokeudella on useita esiintymismuotoja, jotka vaikuttavat eri tavoin värinäköön. Värisokeat henkilöt kokevat monenlaisia saavutettavuusesteitä värisokeuden tyypistä sekä vakavuusasteesta riippuen. Tavanomaisen värinäön omaavat henkilöt kuitenkin tuntevat ja huomioivat heikosti värisokeuden esiintymistyyppien laajan kirjon. Verkkopalveluiden suunnittelijoiden on erityisen tärkeä tuntee värisuunnittelun perusteita sekä värisokeuden ongelmia mahdollisimman saavutettavien palveluiden takaamiseksi. Erityisesti graafisten käyttöliittymien yleistyttyä värisuunnittelun saavutettavuus värisokeuden näkökulmasta on aiempaakin ajankohtaisempi aihe, koska teknologian nopea kehitys luo edellytyksiä saavutettavuuden parantamiseksi tuoden kuitenkin mukanaan myös uusia haasteita.

Tutkielma on kirjallisuuskatsaus, jonka tavoitteena on antaa lukijalle yleiskuva värisokeuden laajasta kirjosta ja värisokeille käyttäjille suunnatuista avustavista teknologioista sekä näiden avustavien teknologioiden erilaisista toimintatavoista. Lisäksi esitellään tavanomaisen värinäön omaaville henkilöille ja erityisesti suunnittelijoille tarjottuja värisuunnittelun saavutettavuutta edistäviä ja värisokeuden ymmärtämistä edistäviä teknologioita. Lähteinä tutkielmassa on käytetty yhteensä 21 värisokeuteen, avustaviin teknologioihin sekä saavutettavuuteen liittyvää tutkimusartikkelia sekä verkkolähdettä.

Tutkielman tuloksina aiemmista tutkimuksista löytyi useita värisokeille, muille aiheesta kiinnostuneille sekä suunnittelijoille sopivia teknologioita, jotka vastaavat värisokeiden henkilöiden kohtaamiin haasteisiin sekä saavutettavuuden värisuunnitteluhaasteisiin. Useimmat näistä teknologioista ovat rajoittuneet tukemaan yleisimpiä värisokeuden esiintymistyyppejä. Useita avustavia teknologioita kohtaan on esitetty myös kriittisiä näkökulmia. Tulokset voidaan kokea osittain puutteellisina, sillä avustavien teknologioiden tutkimusta on lähestytty aiemmassa kirjallisuudessa pääasiassa teknisestä näkökulmasta ja varsinainen käyttäjäkokemustutkimus on vielä vähäistä.

Avainsanat: saavutettavuus, värisokeus, värisuunnittelu, simulaatiot

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

Sisällysluettelo

1 Johdanto.....	1
2 Tutkimusmenetelmä.....	2
3 Värisokeus.....	3
3.1 Värisokeuden syyt ja levinneisyys.....	3
3.2 Värisokeuden tyypit.....	4
3.3 Värisokeuden vaikutukset.....	6
4 Värisokeita avustavat teknologiat.....	7
4.1 Diagnostiset teknologiat.....	7
4.2 Värien erottamista tehostavat teknologiat.....	8
4.3 Värien tunnistamista edistävät teknologiat.....	10
5 Ymmärtämistä ja suunnittelua tukevat teknologiat.....	12
5.1 Värisokeutta simuloivat teknologiat.....	12
5.2 Muut värisuunnittelussa avustavat teknologiat.....	13
6 Keskustelu.....	14
7 Yhteenveto.....	15
Lähdeluettelo.....	16

1 Johdanto

Värisokeus on sateenvarjotermi, joka kuvaa monia perinnöllisiä sekä erilaisista syistä aiheutuneita värinäön heikentymiä. Värisokeus vaikuttaa noin 4,5 prosenttiin koko populaatiosta, noin 8 prosenttiin miehistä ja 0,5 prosenttiin naisista. (Colour Blind Awareness, 2022a) Kyseessä on merkittävän kokoinen ryhmä kokonaispopulaatiosta.

Tavanomaisen värinäön omaavien henkilöiden ymmärrys värisokeudesta vaihtelee ja parhaimmillaankin värisokeuden aiheuttamat erot värinäössä ymmärretään heikosti. Aiemmassa tutkimuksessa on havaittu suuren osan verkkosuunnittelijoista olevan tietoisia värisokeuden olemassa olost, mutta huomioivan sen aiheuttamat käytettävyystarpeet työssään vain joskus tai eivät koskaan. (MacAlpine & Flatla, 2016)

Aiempi tutkimus värisokeuteen liittyen keskittyy pääosin kuvaamaan värisuunnittelun haasteita yleisellä tasolla tai ratkaisemaan tietyn haasteen yksittäisen teknologian avulla. Avustavista teknologioista on haastava löytää yhtenäistä tietoa, joka tukisi näiden teknologioiden sekä värisokeuden ymmärtämistä ja auttaisi oikean avustavan teknologian valitsemisessa tulevia käyttötapauksia harkitessa. Tämän tutkielman on tarkoituksena vastata tähän tarpeeseen kokoamalla yhteen tietoa ja resursseja värisokeita käyttäjiä avustavista teknologioista sekä värien saavutettavuutta edistävästä teknologioista tavanomaisen värinäön omaaville henkilöille ja erityisesti suunnittelijoille. Ydinkysymyksenä on, millaisia avustavia teknologioita värisokeuden tueksi tarjotaan. Kysymystä tarkastellaan tässä tutkielmassa sekä värisokeiden käyttäjien tukitarpeiden että tavanomaisen värinäön omaavien käyttäjien ja kehittäjien ymmärryksen kehittämisen näkökulmista huomioiden myös värisokeuden erilaiset tyypit.

Tutkielmassa kysymyksen ”millaisia avustavia teknologioita värisokeuden tueksi tarjotaan” löytyi useita vastauksia, joihin tutkielman lukujen jako perustuu. Teknologioita tarjotaan sekä värisokeille käyttäjille että tavanomaisen värinäön omaaville käyttäjille sekä kehittäjille. Värisokeille käyttäjille tarjotaan värejä tehostavia sekä niiden tunnistamista avustavia teknologioita, tavanomaisen värinäön omaaville käyttäjille sekä kehittäjille pääasiassa värisokeutta simuloivia teknologioita.

Tutkielma on jaettu viiteen päälukuun. Luvussa 2 kuvataan lyhyesti tutkimusmenetelmä. Tutkielman 3. luku pyrkii kuvaamaan värisokeutta sekä värisokeiden henkilöiden kohtaamia haasteita. Tavoitteena on antaa lukijalle yleiskuva värisokeudesta ja siitä aiheutuvien haasteiden laajuudesta avustavien teknologioiden tarpeen ymmärtämistä ajatellen. Avustavia ja tukevia teknologioita käsittelevät luvut on jaettu luvuksi 4 ja luvuksi 5. Luku 4 käsittelee värisokeille

käyttäjille suunnattuja teknologioita sekä teknologioiden käyttötapauksia ja luku 5 tavanomaisen värinäön omaaville käyttäjille sekä kehittäjille tarjottuja ymmärrystä ja saavutettavuutta edistäviä teknologioita. Tutkielman päättää keskustelu ja lyhyt yhteenveto.

2 Tutkimusmenetelmä

Tämä tutkielma on kirjallisuuskatsaus, ja tämän luvun tarkoituksena on esitellä käytettyjä tiedonhakumetodeja sekä työssä käytettyjä lähteitä. Pääasiallisena hakupalveluna aloitin lähteiden hakemisen Andor-palvelusta, myöhemmin tein myös tarkentuneita hakuja Google Scholar -palveluun. Käytin hauissa useita värisokeuteen, suunnitteluun sekä saavutettavuuteen liittyviä hakusanoja yhdistellen termejä erilaisiksi kokonaisuuksiksi. Käytettyjä hakutermejä olivat esimerkiksi ”color blindness”, ”accessibility”, ”user experience” ja ”color design”. Alkuvaiheessa ongelmaksi muodostui hakutermin ”color blindness” monitieteellisyys, samaa termiä voidaan käyttää viitatessa sekä värisokeuteen että yhteiskuntatutkimuksessa rodulliseen värisokeuteen. Hakujen rajautuessa tiukemmin selkeämpien ja tiiviimpien hakutermin löytyessä haku alkoi tuottaa myös relevantteja tuloksia. Lähteitä etsittiin myös relevanttien tutkimusten viittausten avulla.

Hauissa karsin pois tulokset, jotka eivät olleet aiheeni kannalta relevantteja vaan viittasivat esimerkiksi toiseen alaan tai kokonaan toiseen termin käyttötarkoitukseen, sekä tulokset, jotka lähestyivät värisokeuteen liittyviä avustavia teknologioita todella teknisestä kehitysnäkökulmasta. Tutkielmassa on käytetty 21 lähdettä, joista viisi on verkkojulkaisuja ja 16 artikkelia.

Yhdeksän mainituista 21 lähteestä liittyy tietyn avustavan työkalun (Geddes et al. 2022), algoritmin tai sovelluksen (Bandyopadhyay & Rathod, 2017; Lee & dos Santos, 2011; MacAlpine & Flatla, 2016) kehittämiseen tai esittelee tietyn sovelluksen, algoritmin tai avustavan työkalun (Lowry, 2019; Halder et al., 2015; Ryobi Systems, 2020; S & Singla, 2021; Yasin et al., 2022) toimintaa. Kaksi näistä yhdeksästä lähteestä on verkkolähteitä (Lowry, 2019; Ryobi Systems, 2020).

Kuusi 21 lähteen joukosta liittyy yleisemmin värisokeuteen ja värisokeuden vaikutuksiin (Barry et al., 2017; Colour Blind Awareness, 2022a; Colour Blind Awareness, 2022b; Napoli & Chiasson, 2018; Stoianov et al. 2019; Valero et al. 2020). Kahdessa näistä kuudesta on teknologioihin sitoutuva näkökulma fyysisten värifiltterien sekä videopelien näkökulmasta (Napoli & Chiasson, 2018; Valero et al., 2020). Kaksi näistä kuudesta on verkkolähteitä (Colour Blind Awareness, 2022a; Colour Blind Awareness, 2022b).

Lopuista lähteistä kolme on suunnitteluohjeisiin tai värisuunnitteluun laajemmin liittyvää lähdettä (Geddes, 2023; Richardson et al., 2014; WCAG, 2023), joista yksi

(WCAG, 2023) on verkkolähde. Yksi lähde on värisokeuden huomioiva käyttäjätutkimus (Tigwell, 2021), yksi käyttötapausesimerkki värisokeuteen liittyvästä teknologiasta (Wright, 2022) ja yksi värisokeuteen liittyviä teknologioita laajemmin käsittelevä lähde (Elrefaei, 2018).

3 Värisokeus

Värisokeus on useita sekä perinnöllisiä että aiheutuneita värinäön heikentymiä kuvaava sateenvarjotermi (Colour Blind Awareness, 2022a). Värinäön heikentymät eli värisokeus vaikuttaa kaikkiin henkilöihin, joilla on vaikeuksia erottaa värejä, jotka suurin osa populaatiosta pystyy helposti erottelemaan (MacAlpine & Flatla, 2016).

Tämä tutkielmaluku esittelee lukijalle värisokeuden syitä ja levinneisyyttä, värisokeuden erilaisia tyyppejä sekä värisokeuden vaikutuksia tavoitteena antaa lukijalle perustason ymmärrys värisokeudesta ja sen värisokeille henkilöille aiheuttamista haasteista.

3.1 Värisokeuden syyt ja levinneisyys

Värisokeudelle on useita syitä. Yleisin syy on äidiltä peritty geneettinen mutaatio, mutta lisäksi värisokeus voi aiheutua esimerkiksi silmän- tai päänalueen trauman, ikääntymisen, tiettyjen lääkkeiden tai joidenkin sairauksien, esimerkiksi diabeteksen, aiheuttamana. (Colour Blind Awareness, 2022a; Elrefaei, 2018) Aiheutunut värisokeus voi olla esimerkiksi lääkkeiden aiheuttamana väliaikaista tai esimerkiksi päänalueen trauman seurauksena vaikuttaa henkilöön pysyvästi (MacAlpine & Flatla, 2016).

Perinnöllisen tyyppin värisokeus vaikuttaa noin kahdeksaan prosenttiin valkoihoisista miehistä sekä puoleen prosenttiin valkoihoisista naisista (Colour Blind Awareness, 2022b; Wright, 2022; Valero et al., 2020). Koska yleisin syy värisokeudelle on perinnöllinen, esiintymistiheydessä on populaatiokohtaista vaihtelua, esimerkiksi Skandinavian alueella värisokeus vaikuttaa 10-11 prosenttiin miehistä (Colour Blind Awareness, 2022b). Kattavampia statistiikkoja perinnöllisen värisokeuden vaikutusten kattavuudesta on haastavaa löytää, samoin kuin tilastoja aiheutuneen värisokeuden vaikutuksen laajuudesta. Aiheutuneen värisokeuden on kuitenkin arvioitu vaikuttavan noin kolmeen prosenttiin populaatiosta (Colour Blind Awareness, 2022a).

Seuraavaksi keskitytään perinnöllisen värisokeuden esiintymismuotoihin, koska perinnöllisen värisokeuden esiintymismuodoista löytyy aiheutunutta värisokeutta enemmän aiempaa tutkimusta, ja perinnöllisen värisokeuden esiintymismuodot pystytään rajaamaan selkeämmin kuin aiheutuneen värisokeuden moninaiset vaikutukset. Myös myöhemmissä luvuissa käsiteltävät avustavat teknologiat

keskittyvät perinnöllisen värisokeuden esiintymismuotoihin, sillä aiheutunutta värisokeutta ei ole huomioitu teknologioita kehittäessä.

3.2 Värisokeuden tyypit

On olemassa erilaisia värisokeuden esiintymismuotoja, joista suurin osa liittyy joko punaisen, vihreän tai sinisen valon taajuuden näkemiseen (Colour Blind Awareness, 2022a). Ihmisen värinäöstä vastaavat kolmen tyyppiset tappisolut, jotka mahdollistavat erottelun punaisten ja vihreiden värien välillä sekä keltaisten ja sinisten värien tunnistamisen (MacAlpine & Flatla, 2016; Elrefaei, 2018). Tavanomainen värinäkö eli trikromaattinen värinäkö käyttää kaikkia kolmea tappisolutyyppeä (Colour Blind Awareness, 2022b). Perinnöllinen värisokeus vaikuttaa tappisoluihin heikentäen henkilön kykyä erotella värejä toisistaan (MacAlpine & Flatla, 2016). Vakavammissa tapauksissa yksi tai useampi solutyyppi puuttuu kokonaan (MacAlpine & Flatla, 2016; Elrefaei, 2018) ja lievemmissä värisokeuden esiintymismuodoissa yhden tai useamman tyyppin tappisolut toimivat puutteellisesti (MacAlpine & Flatla, 2016). Suunnilleen puolella värisokeista henkilöistä on keskivaikea tai vaikea värisokeus, ja toisella puolella lievä esiintymistyyppi (Colour Blind Awareness, 2022b).

Yhden tappisolutyypin puuttumisesta johtuvat värisokeustyyppit ovat deuteranopia, protanopia ja tritanopia. Vakavien yhden tappisolutyypin puuttumisesta johtuvien värisokeustyyppien simulaatioon voi visuaalisesti tutustua kuvassa 1. Lievemmistä puutteellisesta tappisolujen toiminnasta johtuvat tyypit ovat vastaavasti deuteranomalia, protanomalia sekä tritanomalia. (Elrefaei, 2018) Puutteellisesta tappisolujen toiminnasta lievemmat värisokeustyyppit vaikuttavat henkilön värinäköön aiheuttaen heikentymän, joka voi vastata lähes tavanomaista värinäköä tai lähes täyttä tappisolutyypin puuttumisesta johtuvaa värisokeustyyppiä (Colour Blind Awareness, 2022a). Yleisesti deuteranopia, deuteranomalia, protanopia sekä protanomalia on tunnettu puna-vihersokeuksina ja tritanopia sekä tritanomalia sini-keltävärisokeutena (Elrefaei, 2018). Tritanopia ja tritanomalia ovat huomattavasti puna-vihersokeustyyppistä harvinaisempia (Elrefaei, 2018; Colour Blind Awareness, 2022b).

Perinnöllisen värisokeuden esiintymismuodoista harvinaisin on akromatopsia, joka mahdollistaa vain harmaasävyjen näkemisen (Colour Blind Awareness, 2022a; Wright, 2022). Akromatopsia vaikuttaa noin yhteen 33,000 henkilön populaatiossa (Colour Blind Awareness, 2022a; Wright, 2022).



Kuva 1. Yhden tappisolutyypin puuttumisesta johtuvia värisokeustyyppieä esittävät simulaatiokuvat verrattuna tavanomaiseen värinäköön. (Colour Blind Awareness, 2022b)

Protanopia ja protanomalia aiheuttavat vaikeuksia erottaa toisistaan esimerkiksi tummia oransseja sekä tummia punaisia sävyjä, sekä keskivihreitä ja keskioransseja. (Elrefaei, 2018). Deuteranopia ja deuteranomalia vastaavasti aiheuttavat vaikeuksia esimerkiksi keskipunaisten ja keskivihreiden, kirkkaiden vihreiden ja keltaisten sekä vaaleansinisten ja violettien sävyjen erottamisessa (Elrefaei, 2018). Tritanopia ja tritanomalia voivat aiheuttaa vaikeuksia esimerkiksi vaaleansinisten ja harmaiden, oranssien ja punaisten sekä vihreiden ja sinisten erottamisessa (Elrefaei, 2018; Colour Blind Awareness, 2022a). Eri värisokeustyyppit on lajiteltu syyn ja aiheutuvien sekoittumien perusteella taulukossa 1.

Taulukko 1. Yhden tappisolutyypin puuttumisesta tai puutteellisesta toiminnasta johtuvien perinnöllisten värisokeustyyppien kuvaus (MacAlpine & Flatla, 2016; Elrefaei, 2018; Colour Blind Awareness, 2022a).

Värisokeus- tyyppi	Syy	Sekoittuvia väripareja
Deuteranopia	M-tyypin tappisolut (vihreä) puuttuvat.	Keskipunaiset ja keskivihreät; kirkkaat vihreät ja keltaiset; vaaleansiniset ja violetit
Protanopia	L-tyypin tappisolut (punainen) puuttuvat.	Tummat oranssit ja tummat punaiset; keskivihreät ja keskioranssit
Tritanopia	S-tyypin tappisolut (sininen) puuttuvat.	Vaaleansiniset ja harmaat; oranssit ja punaiset; vihreät ja siniset
Deuteranomalia	M-tyypin tappisolut (vihreä) toimivat puutteellisesti.	Vakavuudesta riippuen samat kuin deuteranopiassa.
Protanomalia	L-tyypin tappisolut (punainen) toimivat puutteellisesti.	Vakavuudesta riippuen samat kuin protanopiassa.
Tritanomalia	S-tyypin tappisolut (sininen) toimivat puutteellisesti.	Vakavuudesta riippuen samat kuin tritanopiassa.

Aiheutunut värisokeus usein aiheuttaa sini-keltatyypin perittyä värisokeutta muistuttavia haasteita, mutta voi aiheuttaa myös sini-kelta- ja puna-vihertyyppisten värisokeuksien kaltaisen sekoituksen tai akromatopsiaa eli täyttä värisokeutta. (MacAlpine & Flatla, 2016)

3.3 Värisokeuden vaikutukset

Koska elämän eri osa-alueet vaativat usein kykyä tunnistaa oikein tai erottaa toisistaan värejä (Barry et al., 2017), värisokeus voi vaikuttaa elämän kaikkiin osa-alueisiin (Stoianov et al., 2019). Myös lisääntynyt graafisten käyttöliittymien käyttö on nostanut esiin useita värien saavutettavuuteen liittyviä käyttöä rajoittavia ongelmia (Lee & dos Santos, 2011). Kykyä tunnistaa tai erottaa värejä voidaan tarvita esimerkiksi karttojen lukemisessa, kommunikaatiossa, taustavärillisen tekstin lukemisessa, videopeleissä, lääkkeiden tunnistamisessa sekä useissa kemian alan töissä (Barry et al., 2017; Napoli & Chiasson, 2018; Wright, 2022; Stoianov et al. 2019).

Tavanomaisen värinäön omaavien henkilöiden ymmärrys värisokeudesta vaihtelee usein täydestä tietämättömyydestä heikkoon käsitykseen värisokeuden vaikutuksista (MacAlpine & Flatla, 2016). Värisokeus voi vaikuttaa merkittävästi esimerkiksi elämänlaatuun, tunteisiin sekä mahdollisiin urapolkuihin (Barry et al., 2017). Jopa noin 40 prosenttia oppilaista valmistuu koulusta epätietoisena omasta värisokeudestaan (Colour Blind Awareness, 2022a). Kouluissa värisokeat lapset jäävät helposti jälkeen oppiaineissa, joissa värejä käytetään oleellisena työkaluna tai

osana opetusta (Barry et al., 2017). Valitettavasti vastaavia tilastoja värisokeuden diagnosoinnista Suomessa ei ole saatavilla.

Noin 60 % värisokeista henkilöistä kokee jokapäiväisessä elämässään haasteita, joiden laajuutta myös henkilön itsensä voi olla vaikea ymmärtää (Colour Blind Awareness, 2022a). Tällaisia värisokeuden aiheuttamia haasteita voivat olla esimerkiksi vaikeudet lukea tieteellisiä grafiikoita, ongelmat ruuan kuten lihan tai banaanien kypsyyden arvioimisessa, vaikeudet erottaa verta esimerkiksi virtsasta ja ongelmat tunnistaa elektroniikan tilaa merkkivalojen ollessa usein vihreitä ja punaisia (Stoianov et al., 2019; Halder et al., 2015). Nämä esimerkit esittelevät laajan kirjon haasteita eri elämän osa-alueilla. Punavihersokea henkilö, jonka punavihersokeus on keskivaikealla tasolla, pystyy keskimäärin tunnistamaan 24 tavanomaisesta väriliidun väristä tarkasti viisi (Colour Blind Awareness, 2022a).

4 Värisokeita avustavat teknologiat

Nykyaikainen kehitys teknologian ja tietojenkäsittelyn kentillä voi olla oleellista värisokeille suunnattujen avustavien työkalujen kehittämisessä (Lee & dos Santos, 2011) ja nopean kehityksen myötä värisokeille käyttäjille onkin nykyään saatavilla useita avustavia teknologioita (S & Singla, 2021). Valitettavasti suurin osa kehitetyistä työkaluista ei ota huomioon värisokeuden vakavuuden ja tyyppin vaihtelevuutta (Lee & dos Santos, 2011).

Verkkoalustoille on kehitetty värisokeita avustavia teknologioita, jotka pääosin voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: diagnostisiin, simuloiviin ja värien tunnistusta tai värikorjaamista edistäviin (Elrefaei, 2018). Tavanomaisen värinäön omaaville käyttäjille suunnattuja simuloivia ja muita työkaluja käsittelen luvussa 5. Tässä luvussa käsittelen värien tunnistusta sekä värikorjaamista edistävät teknologiat, jotka jaetaan edelleen kahdeksi alakategoriaksi johtuen teknologioiden erilaisista tavoitteista. Värien tunnistamista tehostavat teknologiat (alaluku 4.2) viittaavat teknologioihin, joiden tavoitteena on auttaa värisokeaa käyttäjää tunnistamaan mikä väri on kyseessä, ja värien erottamista tehostavat (alaluku 4.3) viittaa teknologioihin, joiden tavoite on auttaa värisokeaa käyttäjää hahmottamaan kokonaisuus kontrastia tai värejä muuntamalla. Värisokeuden tunnistamiseen suunniteltuja teknologioita käsitellään alaluvussa 4.1.

4.1 Diagnostiset teknologiat

Verkkopalveluina ja puhelinsovelluksina tarjotaan useita värinäön testaamiseen käytettyjä palveluita (Elrefaei, 2018; Napoli & Chiasson, 2018). Näitä palveluita voidaan paitsi käyttää itsenäisesti lukuisilla nettisivuilla ja erilaisissa puhelinsovelluksissa, myös hyödyntää tutkimuksissa osallistujien seulonnan apuvälineenä (Napoli & Chiasson, 2018). Julkisesti verkossa saatavilla olevia

palveluita vastaava asiantuntijoille suunnattu tietokoneistettu sovellus värisokeuden diagnosointiin on myös luotu (Yasin et al., 2022).

Tietokoneistetut diagnostiset teknologiat, sekä asiantuntijakäyttöön luotu että julkisesti saatavilla olevat, pohjautuvat ennen verkkopalveluiden kehittämistä luotuihin värisokeuden diagnosointiin käytettyihin työkaluihin, kuten esimerkiksi yleisesti värisokeuden diagnosoinnissa käytettävään Ishiharan testiin (Elrefaei, 2018; Napoli & Chiasson, 2018; Yasin et al., 2022). Ishiharan testissä käyttäjän tulee tunnistaa viivoista tai pisteistä muodostettuja toisten värien sekaan piilotettuja väreistä koostuvia numeroja ja kirjaimia (Yasin et al., 2022).

Tietokoneistettuja diagnostisia teknologioita työkaluina käyttäessä on tärkeää huomioida, että tulokset saattavat vaihdella valotuksen, kontrastin ja laitteen väriasetusten myötä (Elrefaei, 2018).

4.2 Värien erottamista tehostavat teknologiat

Tässä tutkielmassa käytetään termiä ”värien erottamista tehostavat”, sillä tämän tyyppiset avustavat teknologiat edistävät väri-informaation tulkitsemista, mutta eivät mahdollista värinäön korjaamista (S & Singla, 2021). Värisokean käyttäjän näkemä väriskaala on rajoittunut, eikä värisokeutta parantavaa hoitoa tai digitaalista ratkaisua ole löydetty. (Valero et al., 2020). Tämä tarkoittaa, että erilaiset värejä muuntavat ja filteröivät työkalut voivat tukea värisokean henkilön kykyä erottaa värit vain henkilön havaitseman väriskaalan sisällä, eivät luoda kykyä nähdä värejä kyseisen skaalan ulkopuolelta (Valero et al., 2020). Eli esimerkiksi puna-vihertyypin värisokea henkilö ei voi avustavien teknologioiden avulla nähdä punaista tai vihreää väriä enempää kuin hänen värinäkönsä sallii, mutta avustavat teknologiat voivat edistää punaisen ja vihreän värin erottamista toisistaan muuntamalla värejä värisokealle katsojalle selkeämpään suuntaan. Tätä demonstroi Ryobi Systemsin (2020) julkaisema Visolve-sovelluksen avulla tuotettu kuva, jossa vertaillaan alkuperäistä kuvaa, muunnettua kuvaa sekä tritanopian omaavan henkilön näkemiä vastaavia alkuperäistä sekä muunnettua kuvaa.



Kuva 2. Esimerkki, jossa Visolve-sovellusta on käytetty edistämään värien erottamista. Kuvissa alkuperäinen kuva ja tritanopiaa simuloiva kuva sekä Cisolve-sovelluksella muunnettu kuva alkuperäisenä ja tritanopiaa simuloivana. (Ryobi Systems, 2020)

Värisokeiden henkilöiden avuksi on ehdotettu useita eri tekniikoita (Elrefaei, 2018) ja monia erilaisia värinäön kompensatiometodeja onkin kehitetty (S & Singla, 2021). Varhaiset digitaaliset avustavat teknologiat uudelleenvärivät koko prosessoidun kuvan, mikä vaikutti kaikkiin kuvan väreihin (S & Singla, 2021).

Uudemmat menetöt perustuvat koneoppimiseen ja algoritmeihin. Nämä menetöt keskittyvät säilyttämään prosessoidussa kuvassa mahdollisimman luonnolliset värit edistäen kuitenkin eri värien erottumista kuvassa eli kyseiset menetöt muokkaavat kuvassa pääosin niitä värejä, joiden erottamisessa tietty värisokeustyyppi tarvitsee tukea (Elrefaei, 2018; S & Singla, 2021). Erilaiset nykyaikaisia metodeja hyödyntävät sovellukset, kuten DaltonSim ja Visolve, muuntavat helposti sekoitettavien värien kontrastia ja värikylläisyyttä helpottaen värien erottamista erilaisia algoritmeja hyödyntäen. (Lee & dos Santos, 2011; S & Singla, 2021; Wright, 2022)

Nykyaikaisten metodien avulla värien prosessointia erottamisen tehostamiseksi voidaan tehdä kaikki värisokeustyytit huomioon ottaen, mutta samat algoritmit eivät pysty auttamaan kaikkia värisokeustyyppisiä tehokkaasti vaan eri värisokeustyyppisiä

ajatellen tulee luoda nimenomaisen värisokeustyypin haasteet huomioivia algoritmeja (Elrefaei, 2018). Osa tarjolla olevista työkaluista tukee vain joitakin värisokeuden tyypeistä. Mainituista avustavista sovelluksista DaltonSim-sovellus tukee vain yleisimpiä puna-vihervärisokeustyyppejä, protanomaliaa ja deuteranomaliaa, mutta ei huomioi harvinaisempia kelta-sinivärisokeustyyppejä tai täyttä värisokeutta, ja Visolve tarjoaa tukea puna-viher- ja sinikeltävärisokeille (Lee & dos Santos, 2011; Ryobi Systems, 2020).

Värien muuntamiseen kehitetyistä algoritmeista esimerkiksi LMS-algoritmi on kehitetty tukemaan useampaa värisokeuden tyyppiä, kun taas algoritmit kuten CBFS ja LAB Color Correntor tukevat vain yksittäistä puna-vihervärisokeustyyppejä ja Shifting color -algoritmi on kehitetty tukemaan tritanopiaa (Elrefaei, 2018). Vaikka esimerkiksi LMS-algoritmin mainitaan tukevan puna-vihervärisokeustyyppeiden lisäksi myös tritanopiaa, se voi joissakin tapauksissa luoda uusia sekoittuvia värikohtia kuvissa tritanopian tapauksessa (Elrefaei, 2018).

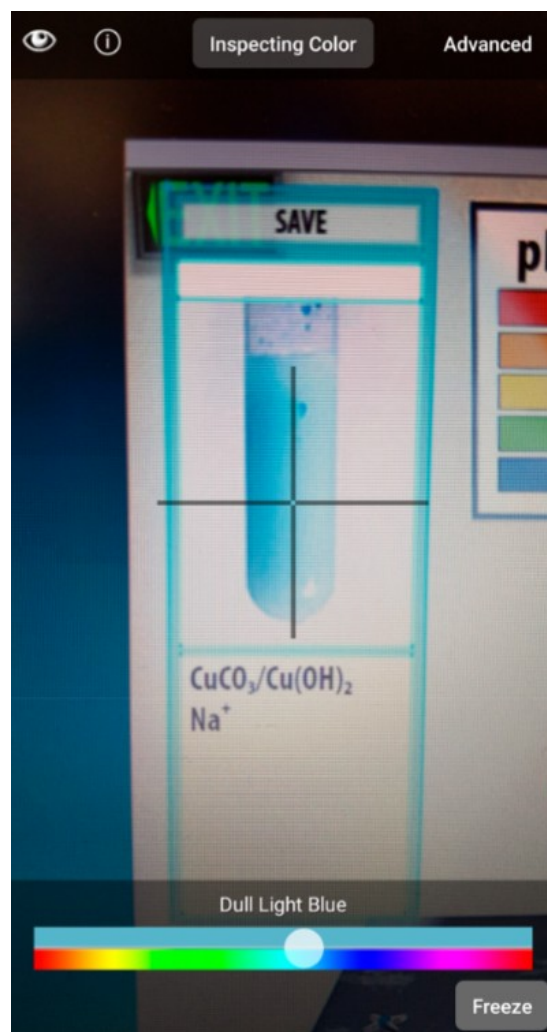
Väriä muuntavien työkalujen hyödyllisyydestä värisokeille henkilöille on tehty tutkimusta vähäisesti ja avustavista teknologioista keskusteltaessa on hyvä huomata, että useilla värisokeilla henkilöillä on negatiivinen näkemys väriä muuntavista filtereistä (Geddes, 2023). Värisokeita avustavien teknologioiden arviointimetodina käytetään usein Ishihara-testitulosten vertailua ilman avustavaa teknologiaa sekä avustavan teknologian kanssa (Geddes, 2023; Geddes et al., 2022). Ishihara-testi on pääasiassa kehitetty värisokeuden tunnistamiseen avustavien työkalujen tehokkuuden arvioinnin sijaan (Geddes et al., 2022). Kyseinen testausmetodi osoittaa, että usein avustavilla työkaluilla pyritään enemmän korjaamaan värisokeutta kuin vähentämään esteellisyyttä (Geddes, 2023).

4.3 Värien tunnistamista edistävät teknologiat

Värejä käytetään nykyään laajasti informaation välittämisessä (Halder et al., 2015), joten myös värien tunnistaminen on tietyissä olosuhteissa oleellista käyttäjälle pelkän värien toisistaan erottamisen sijaan. Suuri osa värisokeille suunnatuista värisokeita käyttäjiä avustaviin teknologioihin liittyvästä tutkimuksesta keskittyy alaluvussa 4.2 kuvattuihin värien erottamista korostaviin ominaisuuksiin. Joissakin tilanteissa käyttäjän voi kuitenkin olla oleellista nimenomaan tunnistaa mikä väri on kyseessä. Esimerkiksi laboratorio-olosuhteissa kemian alalla suoritetaan useita tehtäviä, joissa värin muuttumisen tarkkailu on oleellinen osa tehtävän onnistunutta suorittamista, tätä ajatellen on kehitetty ja hyödynnetty useita värien tunnistamista edistäviä teknologioita (Bandyopadhyay & Rathod, 2017; Wright, 2022). Myös peleissä ja verkkosivuilla värejä käytetään informaation välittämisessä avuksi monipuolisesti.

Sovelluksia kuten Titration ColorCam, ColorAssistant Lite ja Color Blind Pal app on mahdollista käyttää apuna värien tunnistamisessa (Bandyopadhyay & Rathod,

2017; Wright, 2022). Kyseiset sovellukset käyttökohteesta ja sovelluksesta riippuen antavat käyttäjälle palautetta äänen, värinäilytysten ja/tai tekstin perusteella avustamaan erilaisissa tehtävissä analysoiden värejä kuvista tai käyttäen laitteen kameraa havainnointivälineenä (Bandyopadhyay & Rathod, 2017; Wright, 2022). Sovellukset voivat esimerkiksi antaa käyttäjälle hälytyksen, kun kohteen väri on toivottu, tai näyttää jatkuvasti käyttäjälle tekstinä halutun kohteen värin (Bandyopadhyay & Rathod, 2017; Wright, 2022). Kuva 3 demonstroi tekstinä kohteen värin esittävän sovelluksen toimintaa.



Kuva 3. Color Blind Pal -sovellus toiminnassa avustamassa värin tunnistuksessa kameran välityksellä. Sovellus näyttää tunnistetun värin käyttäjälle tekstinä, esimerkissä tunnistettu väri ”Dull Light Blue”. (Wright, 2022).

Värien tunnistamisen ja erottamisen avuksi on luotu myös useita vaihtoehtoisia kuviointimetoodeja, joissa eri värit merkitään kuvaan erilaisilla kuvioilla. Nämä ratkaisut ovat kuitenkin usein epäintuitiivisia ja tarvitsevat käyttäjältä opettelua ollakseen käytännöllisiä. (Geddes et al., 2022).

Tutkimuksissa esiin nousseiden käyttäjäkokemusten mukaan värien tunnistusta tukevien sovellusten käyttäminen on auttanut värisokeita käyttäjiä toimimaan esimerkiksi kemian laboratorio-olosuhteissa aiempaa itsenäisemmin ilman tarvetta toisen henkilön avulle värien tunnistusta vaativissa tehtävissä (Bandyopadhyay & Rathod, 2017) sekä mahdollistanut värisokeille opiskelijoille entistä paremmin saman oppimiskokemuksen kuin tavanomaisen värinäön omaaville opiskelijoille (Wright, 2022).

5 Ymmärtämistä ja suunnittelua tukevat teknologiat

Värisokeus vaikuttaa laajasti moniin värisokean henkilön elämän osa-alueisiin (Barry et al., 2017; Stoianov et al., 2019) ja graafisten käyttöliittymien käytön lisääntyminen nostaa esiin värien saavutettavuuteen liittyviä ongelmia (Lee & dos Santos, 2011). Näiden seikkojen vuoksi on oleellista huomioida värien saavutettavuus värisokeiden käyttäjien näkökulmasta erityisesti värejä käyttäjän toimintaa ohjaavina ominaisuuksina käytäviä palveluita suunniteltaessa. Tavanomaisen värinäön omaavien henkilöiden ymmärrys värisokeudesta on vaihtelevaa. Yli 90 prosenttia verkkosuunnittelijoista on tietoisia värisokeuden olemassaolosta, mutta alle 50 prosenttia suunnittelijoista ottaa huomioon värisokeita käyttäjiä lopputuotteen suunnittelussa (MacAlpine & Flatla, 2016). Yhdessä saavutettavuustyökalujen käyttöä kartoittaneessa tutkimuksessa 14 haastatellusta 78 suunnittelijoista eli noin 18 % kertoi käyttävänsä värisokeutta simuloivia filttäreitä suunnittelussa (Tigwell, 2021).

Tämä tutkielman luku käsittelee tavanomaisen värinäön omaaville henkilöille suunnattuja värisokeuden ymmärtämisessä avustavia teknologioita sekä suunnittelijoille suunnattuja värisuunnittelun saavutettavuudessa avustavia teknologioita. Suurin osa näistä teknologioista on erilaisia värisokeutta simuloivia palveluita, minkä vuoksi simuloiville teknologioille on varattu oma alaluku 5.1 ja muita vähemmän lähdemateriaalissa tarkasteltuja värisuunnittelussa avustavia teknologioita esitellään lyhyesti alaluvussa 5.2.

5.1 Värisokeutta simuloivat teknologiat

Tyypillisen värinäön omaaville henkilöille voi olla haastavaa ymmärtää värisokeuden aiheuttamia muutoksia värinäössä sekä muutoksista seuraavia haasteita, mikä voi johtaa väärinkäsityksiin (MacAlpine & Flatla, 2016). Saavutettavuuden parantamista varten suunnittelijoita tukemaan on luotu saavutettavuusmetodeita ja työkaluja, kuten simulaattoreita (Tigwell, 2021). Paras tapa ymmärtää värisokeutta on verrata muuntamattomia ja värisokeutta simuloivia kuvia toisiinsa (Colour Blind Awareness, 2022b). Saavutettavuuteen liittyviä simulaatioita on kuitenkin myös kritisoitu, sillä ne saattavat aiheuttaa etäännyttää suunnittelijan rajoitteisesta käyttäjästä (Tigwell,

2021). Simulaatiot yksinkertaistavat värisokean henkilön kohtaamia rajoitteita, eivätkä anna simulaation käyttäjän kokea luonnollista ympäristöä värisokean henkilön tavoin (Geddes, 2023). Käyttäjät olisi hyvä osallistaa suunnitteluprosessiin, koska pelkät simulaatiot eivät voi luoda suunnittelijalle kokonaisvaltaista kuvaa käyttöesteistä (Tigwell, 2021).

Ymmärtämisen edistämiseksi on kehitetty useita värisokeutta simuloivia työkaluja (Lee & dos Santos, 2011; MacAlpine & Flatla, 2016). Värisokeussimulaattorit ovat saavutettavuuden vahvistamisessa auttavia täydentäviä työkaluja (S & Singla, 2021), jotka paljastavat kuinka erityyppiset värisokeat henkilöt näkevät maailman (Elrefaei, 2018). Värisokeussimulaattorit ovat jo melko yleisiä ja auttavat välttämään vakavia saavutettavuusongelmia värisuunnittelussa (Lee & dos Santos, 2011). Värisokeussimulaattoreita voidaan hyödyntää saavutettavuuden tarkistamiseen esimerkiksi verkkosivuissa, dokumenteissa, valokuvissa ja taiteessa (Elrefaei, 2018)

Saatavilla olevia simulaatiotyökaluja ovat esimerkiksi puhelimen kameran avulla reaaliaikaisen värin eri värisokeustyyppien kokemuksen mukaisesti reaaliaikaisesti muuntava The Color Blind Pal (Wright, 2022; MacAlpine & Flatla, 2016), koko laitteen työpöydän näkymän värin eri värisokeustyyppien simuloimalla muuntava The Color Oracle (Wright, 2022) sekä yksittäisten verkkosivujen tarkasteluun värisokeussimulaattorin avulla mahdollisuuden tarjoavat Colorblind Web Page Filter (Richardson et al., 2014), Able (Lowry, 2019) ja Color Laboratory (Richardson et al., 2014).

Värisokeussimulaattoreiden käytössä on myös rajoitteita, koska värisokeus kattoterminä kattaa monia erityyppisiä värisokeustyyppieitä. Simuloivia teknologioita voidaan käyttää simuloimaan useimpia yleisesti esiintyviä värisokeustyyppieitä, mutta yksittäiset sovellukset eivät yleensä tarjoa simulaatioita kaikille värisokeustyyppieille ja useimmin mainituissa julkisesti saatavilla olevissa värisokeussimulaattoreissa on tarjolla simulaatioita vain vakaville perinnöllisten puna-viher ja kelta-sini sokeuksien muodoille protanopialle, deuteranopialle ja tritanopialle (MacAlpine & Flatla, 2016, Lee & dos Santos, 2011). Tietyn käyttäjän tarkkaa värisokeustyyppiä ja vakavuusastetta simuloivia työkaluja on myös luotu, mutta ne ovat tavallisesti yleistettyjä työkaluja laskennallisesti haastavampia ja käytössä pääosin vain testiympäristöissä kuviin sovellettuina (MacAlpine & Flatla, 2016).

5.2 Muut värisuunnittelussa avustavat teknologiat

Värisuunnittelun saavutettavuutta edistämään on luotu suunnittelijoille suunnattuja työkaluja, jotka tarjoavat apua saavutettavuuden luomiseen. Saavutettava suunnittelu vähentää rajoitteita kokevien henkilöiden tarvetta esimerkiksi tunnistaa ja hyödyntää erilaisia selviytymisstrategioita sekä käyttää kolmansien osapuolien ratkaisuja

(Tigwell, 2021). Verkkosisältöjen suunnitteluun tarkoitetut ohjeistukset ovat määritelleet rajoja riittävälle kontrastille saavutettavuuden kannalta (WCAG, 2023) ja kontrasti onkin värisuunnittelussa tärkeä saavutettavuuden osa-alue. Kaksi tavanomaisen värinäön omaavalle henkilölle hyvin erilaiselta näyttävää kontrastiltaan samankaltaista väriä voivat aiheuttaa haastavia käyttötilanteita värisokealle käyttäjälle.

Jotkin sovellukset, kuten ColorBrewer, auttavat saavutettavassa värisuunnittelussa tarjoamalla suunnittelijoille suoraan valmiita saavutettavia väriyhdistelmiä (S & Singla, 2021). Toiset ohjelmat analysoivat annetun kuvan tai sivuston värien kontrastia ja kirkkautta algoritmeja hyödyntäen tarkastaen näiden riittävyttä saavutettavuuden näkökulmasta. Tällaisia kontrastin ja kirkkauden tarkastamiseen suunniteltuja sovelluksia ovat esimerkiksi Solor Contrast Analyzer, AccessColor, Able ja Accessibility Color Wheel (Richardson et al., 2014, Lowry, 2019).

Värisuunnittelussa ja erityisesti kontrastia tarkastavia sovelluksia käyttäessä on huomioitava, että verkkosisältöjen suunnittelustandardeissa pelkkää kontrastia ja värejä ei suositella käyttämään ainoana toimintaa ohjaavana tekijänä (WCAG, 2023). Esimerkiksi linkeissä selkeä muotoilu, kuten alleviivaus, on erottuvan värin rinnalla saavutettavuuden kannalta suositeltavaa.

6 Keskustelu

Tämä tutkielma alkoi kiinnostuksesta lähestyä värisokeutta tukevia avustavia teknologioita enemmän käyttäjä- ja vähemmän teknologisesta näkökulmasta. Tavoitteena oli tehdä kattavasti värisokeuteen liittyviä avustavia teknologioita sekä niiden käyttäjäkokemuksia käsittelevä käyttäjäläheinen tutkielma. Useat nimenomaan käyttäjäkokemukseen liittyvät osa-alueet, joista olisin ollut kiinnostunut kirjoittamaan laajemmin, jäivät kuitenkin valitettavan tyngiksi lähdemateriaalin rajoitusten vuoksi.

Tutkielma muotoutui lopulta nykyiseen muotoonsa pääasiallisesti teknologioiden esittelyksi, käyttäjäkokemusten käsittelemisen jäädessä vähäiseksi sivuhuomioksi. Tämä johtui lähdemateriaalin pirstaloituneisuudesta sekä puutteellisuudesta käyttäjäkokemusten käsittelyn osalta. Suuri osa lähteistä käsitteli teknisellä tai esittelevällä tasolla tiettyä värisokeuteen liittyvää avustavaa teknologiaa tai yleisellä tasolla värisokeutta jättäen teknologioiden käyttäjäkokemukset sivuosaan. Käyttäjäkokemustutkimuksesta mainintoja lähdemateriaaleissa oli joko vähän tai ei lainkaan.

Tutkielman puutteellisuus alkuperäiseen suunnitelmaan verrattuna avaa kuitenkin uusia mielenkiintoisia mahdollisuuksia, kun se nostaa esiin puutteita aiemmassa

tutkimuksessa. Värisokeutta tukemaan tarjotaan paljon erilaisia avustavia teknologioita, mutta värisokeuden avustavien teknologioiden käyttäjäkokemusten, toimivuuden sekä käytettävyyden aiempi tutkimus on vähäistä.

7 Yhteenveto

Värisokeus on kattotermi, johon sisältyy useita erityyppisiä perinnöllisiä ja aiheutuneita värinäön heikentymiä. Värisokeuden aiheuttamia haasteita ymmärretään yleisesti parhaimmillaankin heikosti, ja vaikka suurin osa esimerkiksi verkkosuunnittelijoista on tietoisia värisokeudesta, useat huomioivat sen työssään vain joskus tai eivät lainkaan. Värisokeus vaikuttaa merkittävään osaan, noin 4,5 prosenttiin, populaatiosta. Pääosa aiemmasta värisokeutta tukevasta avustaviin teknologioihin liittyvästä tutkimuksesta käsittelee värisuunnittelun haasteita yleistasolla tai pyrkii tietyn teknologian avulla yksittäisen ongelman ratkaisemiseen. Yhtenäistä tutkimusta ja tietoa värisokeuteen liittyvistä avustavista teknologioista on haastava löytää. Tämä tutkielma pyrkii toimimaan esittelyinä sekä saavutettavuussuunnittelussa avustavista että värisokeita käyttäjiä tukevista erilaisista teknologioista.

Teknologian ja tietojenkäsittelytieteiden kentillä tapahtuva nopea kehitys luo mahdollisuuden värisokeille käyttäjille sekä suunnittelijoille suunnattujen avustavien työkalujen kehittämiseksi, mutta graafisten käyttöliittymien lisääntyminen nostaa esiin myös uusia käytettävyyshaasteita. Sekä käyttäjille että suunnittelijoille tarkoitetut palvelut on pääosin suunniteltu tukemaan vain osaa, usein yleisimpiä, värisokeustyyppisiä. Tästä johtuen käyttäjän voi olla tarpeen hyödyntää useampia sovelluksia kattavan kuvan värisokeuden saavutettavuushaasteista saadakseen.

Teknologian kehityksen myötä nykyään tarjotaan monenlaisia saavutettavuutta edistäviä avustavia palveluita. Saatavilla on monia värien erottamista tehostavia sekä värien tunnistamisessa avustavia eri tyyppisiä sovelluksia. Nykyaikaisissa värien erottamista tehostavissa palveluissa käytetään koneoppimiseen ja algoritmeihin perustuvia metodeja säätämään värisokeustyyppin perusteella haastavasti erotettavissa olevia värejä selkeämmiksi käyttäjälle. Värien tunnistamista edistävät teknologiat auttavat värisokeaa käyttäjää tunnistamaan värejä tai muutoksia värissä äänen, värinäählytysten ja/tai tekstisyötteen perusteella. Lisäksi aiemmin kehitettyihin diagnostisiin työkaluihin perustuvia itsenäisesti käytettäviä ja asiantuntijoille suunnattuja sähköistettyjä diagnostisia teknologioita on tarjolla verkkopalveluina ja puhelinsovelluksina. Suunnittelijoille värien saavutettavuuden edistämiseen tarkoitetut verkkopalvelut ovat kirkkautta ja kontrastia tarkastavia, saavutettavia väripaletteja ehdottavia sekä värisokeutta simuloivia. Värisokeussimulaattorit ovat värisokeuden ymmärtämisen edistämiseksi kehitettyjä ja saavutettavuuden

edistämisessä auttavia työkaluja, jotka auttavat tavanomaisen värinäön omaavia henkilöitä tarkastelemaan maailmaa värisokeiden henkilöiden näkökulmasta.

Lähdeluettelo

- Bandyopadhyay, S., & Rathod, B. B. (2017). The Sound and Feel of Titrations: a smartphone aid for Color-Blind and visually impaired students. *Journal of Chemical Education*, 94(7), 946–949.
<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00027>
- Barry, J. A., Mollan, S., Burdon, M. A., Jenkins, M., & Denniston, A. K. (2017). Development and validation of a questionnaire assessing the quality of life impact of colour blindness (CBQoL). *BMC Ophthalmology*, 17
<https://doi.org/10.1186/s12886-017-0579-z>
- Colour Blind Awareness. (2022a). About Colour Blindness - Colour Blind Awareness. Viitattu 5.6.2023. <https://www.colourblindawareness.org/colour-blindness/>
- Colour Blind Awareness. (2022b). Types of Colour Blindness – Colour Blind Awareness. Viitattu 20.6.2023. <https://www.colourblindawareness.org/colour-blindness/types-of-colour-blindness/>
- Elrefaei, L. A. (2018). Smartphone Based Image Color Correction for Color Blindness. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 12(3), 104.
<https://doi.org/10.3991/ijim.v12i3.8160>
- Geddes, C. (2023). Designing Digital Content to Accommodate for Colour Vision Deficiency. *Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '23)*. Article 489, 1–5.
<https://doi.org/10.1145/3544549.3577047>
- Geddes, C., Flatla, D. R., Tigwell, G. W., & Peiris, R. L. (2022). Improving Colour Patterns to Assist People with Colour Vision Deficiency. *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*.
<https://doi.org/10.1145/3491102.3502024>
- Halder, N., Roy, D., Chowdhury, T., & Roy, P. (2015). Image Color Transformation for Deuteranopia Patients using Daltonization. *IOSR Journal of VLSI and Signal Processing*. Doi: 10.9790/4200-05511520
- Lee, J., & dos Santos, W. P. (2011). An adaptive fuzzy-based system to simulate, quantify and compensate color blindness. *Integrated Computer-aided Engineering*, 18(1), 29–40. <https://doi.org/10.3233/ica-2011-0356>
- Lowry, T. (2019). Tackle accessibility in your designs with these useful plugins. *Figma Blog*. (2019, August 16). Figma. <https://www.figma.com/blog/design-for-everyone-with-these-accessibility-focused-plugins/>
- MacAlpine, R., & Flatla, D. R. (2016). Real-Time Mobile Personalized Simulations of Impaired Colour Vision. *Proceedings of the 18th International ACM*

- SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility.
<https://doi.org/10.1145/2982142.2982170>
- Napoli, D., & Chiasson, S. (2018). Exploring the Impact of Colour-Blindness on Computer Game Performance. CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. <https://doi.org/10.1145/3170427.3188555>
- Richardson, R., Drexler, T. & Delparte, D. (2014). Color and Contrast in E-Learning Design: A Review of the Literature and Recommendations for Instructional Designers and Web Developers. MERLOT Journal of Online Teaching and Learning. Vol. 10, No 4, pp. 657-670.
- Ryobi Systems (2020). What is Visolve? - About Visolve.
Viitattu 30.8.2023. <https://www.ryobi.co.jp/products/visolve/en/visolve.html>
- S, M., & Singla, A. (2022). A novel image quality assessment method and coefficient of quality for digital solutions of colour blindness. Iet Image Processing, 16(4), 1111–1123. <https://doi.org/10.1049/ipr2.12213>
- Stoianov, M., Silva, M., d. O., Lobato dos Santos, M. C., Silva R., Ferreira, M. H., de Oliveira Marques, I., & Gualtieri, M. (2019). The impacts of abnormal color vision on people's life: An integrative review. Quality of Life Research, 28(4), 855-862. <https://doi.org/10.1007/s11136-018-2030-1>
- Tigwell, G. W., (2021). Nuanced Perspectives Toward Disability Simulations from Digital Designers, Blind, Low Vision, and Color Blind People. CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. <https://doi.org/10.1145/3411764.3445620>
- Valero, E. M., Huertas, R., Martinez, M. a. T., Gómez-Robledo, L., Hernández-Andrés, J., Nieves, J. C., & Romero, J. (2020). Is it really possible to compensate for colour blindness with a filter? Coloration Technology, 137(1), 64–67. <https://doi.org/10.1111/cote.12505>
- WCAG (2023). Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1. <https://www.w3.org/TR/WCAG21/>
- Wright, C. M. (2022). Leveraging an App to Support Students with Color-Vision Deficiency and Color-Blindness in Online General Chemistry Laboratories. Journal of Chemical Education, 99(3), 1149–1154. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00664>
- Yasin, V., Peniarsih, P., Gozali, A., & Junaedi, I. (2022). Application of expert system diagnosis of color blindness with ishikawa method with microsoft vb 6.0. International Journal of Informatics, Economics, Management and Science, 1(1), 13. <https://doi.org/10.52362/ijiems.v1i1.678>